

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO NATURAL  
POR MATERIAIS GRANULARES POROSOS RESIDUAIS NA FASE PLÁSTICA DE  
CONCRETOS

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil.

Leonardo de Brito Andrade

Florianópolis, março de 2008

Dedico esse trabalho à Daiane minha esposa querida, e à minha filhinha Sofia...minhas meninas.

Da mesma forma que os olhos são a luz do corpo, a consciência é a luz da alma.

(Francisco Fernandez Carvajal)

## Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos expressados abaixo são fruto da consideração pela real ajuda prestada que, de uma forma mais ou menos explícita, contribuíram significativamente para o bom andamento deste trabalho.

Inicialmente, aos meus orientadores, professora Janaíde Cavalcante Rocha, orientadora e motivadora das minhas iniciativas científicas, e professor Malik Cheriaf, co-orientador e colega imprescindível no desenvolvimento do trabalho experimental. Agradeço pelo apoio, compreensão e torcida durante todo o trabalho da tese.

Aos atuais colegas do grupo de pesquisa de Valorização de Resíduos na Construção Civil – ValoRes – nas pessoas de Cecília, Ruben, Ligia, Giovana, Eliz, Gustavo, Jefferson, Caroline, Paulo, pela contribuição, direta ou indireta, no andamento da tese.

Aos caros colegas que já passaram pelo ValoRes durante o desenvolvimento da tese: Caroline, Lúcio Flávio, Niubis, Flora, também pela contribuição à tese.

Ao professor Jean Pera (INSA-Lyon), pela contribuição na pesquisa e no grupo ValoRes.

Aos prezados colegas dos laboratórios vizinhos que integram o Núcleo de Pesquisa na Construção – NPC – GTec, GDA, LABEEE, Infohab, GestCon, LAE, LEE, Gepend, como também seus professores supervisores.

Aos colegas funcionários do LMCC: Luiz Henrique, Renato Lapa, Roque Medeiros.

Aos coordenadores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFSC, pelo atendimento competente e atencioso.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro para a pesquisa com bolsa e taxa de bancada.

Aos órgãos financiadores dessa pesquisa: ao FINEP-HABITARE, à empresa Tractebel e à ANEEL.

Às empresas Protensul, Imbralit e BASF pela contribuição à pesquisa com doação das matérias-primas.

Ainda, sem terem menos expressão, minha mãe Darci, minha sogra Lorena, ao amigo Nabor.

Por fim, a Deus.

# Sumário

---

Sumário.....	6
Lista de figuras .....	9
Lista de tabelas .....	14
Lista de símbolos.....	16
Lista de siglas .....	21
Resumo .....	22
Abstract.....	23
Capítulo 1 - Introdução .....	24
1.1 Justificativa.....	26
1.2 Delimitação do trabalho.....	26
1.3 Objetivos.....	27
1.4 Estrutura da tese.....	27
Capítulo 2 - Revisão bibliográfica .....	30
2.1 Cinética da hidratação do cimento Portland .....	31
2.1.1 Caracterização dos tempos de início e fim de pega.....	35
2.1.2 Considerações sobre calorimetria da hidratação do cimento Portland .....	37
2.2 Retração Plástica do Concreto .....	40
2.2.1 Considerações iniciais .....	40
2.2.2 Pressão Capilar .....	45
2.2.3 Exsudação.....	50
2.2.4 Evaporação .....	52
2.2.5 Efeito da presença de um superplastificante nos parâmetros da retração plástica de concreto.....	58
2.3 Utilização de Agregados Recicláveis em Concreto.....	64
2.3.1 Considerações iniciais .....	64
2.3.2 A cinza pesada (CZP) como agregado miúdo em concreto.....	65
2.3.2.1 Definição .....	65
2.3.2.2 Características físico-químicas das partículas.....	65
2.3.2.3 Comportamento de concretos utilizando cinzas pesadas como agregado miúdo .....	67
2.3.2.4 Considerações sobre agregado poroso em concreto.....	70
2.3.3 O entulho de construção e demolição (RCD) como agregado miúdo em concreto .....	76

2.3.3.1	Definição .....	76
2.3.3.2	Características físico-químicas das partículas .....	80
2.3.3.3	Comportamento de concretos utilizando entulho de construção e demolição como agregado miúdo .....	82
Capítulo 3 -	Materiais e métodos experimentais.....	85
3.1	Materiais .....	85
3.2	Metodologia experimental.....	94
3.2.1	Definição dos traços e dosagem .....	94
3.2.2	Estudo da fixação dos teores de substituição .....	94
3.2.2.1	Considerações sobre o ensaio de granulometria com as mesclas nos teores de substituição natural/resíduo definidos .....	98
3.2.2.2	Procedimento para migração de água por capilaridade nas amostras granulares	
	100	
3.2.3	Estudo inicial em argamassas .....	102
3.2.4	Estudo dos concretos .....	102
3.2.5	Procedimentos experimentais .....	107
3.2.5.1	Ensaio em argamassa.....	109
3.2.5.1.1	Calorimetria .....	109
3.2.5.2	Ensaio em concreto.....	110
Capítulo 4 -	Aspectos da cinética de umidade de materiais granulares reciclados: RCD e CZP	
	114	
4.1	Modo de ação do material granular reciclado como agregado: estudo das mesclas ...	114
4.1.1	Absorção de água por capilaridade.....	114
4.1.2	Perda de água por secagem ao ar.....	127
4.2	Modo de ação de materiais granulares reciclados em concreto: cinética de absorção e perda de água.....	132
4.2.1	Perda de água por secagem ao ar em concretos de CZP .....	133
4.2.2	Absorção de água por capilaridade em concretos de CZP .....	135
4.2.3	Relação entre parâmetros de resistência e absorção dos concretos de CZP .....	141
4.3	Conclusões parciais .....	144
Capítulo 5 -	Influência de materiais granulares reciclados como agregados miúdos na evolução do calor de hidratação de argamassas associadas a concretos .....	146
5.1	Determinação das dosagens experimentais .....	146
5.2	Cálculo dos parâmetros referentes ao ensaio de calorimetria semi-adiabática .....	149

5.3	Ensaio preliminar em pastas de cimento .....	153
5.4	Resultados obtidos do ensaio de calorimetria semi-adiabática .....	154
5.4.1	Varição máxima de temperatura $\Delta T$ e tempo $t_{pico}$ para o pico de calor $Q_i$ .....	156
5.4.2	Influência no calor gerado no tempo $Q_i$ , na taxa de calor gerado no tempo $\Delta Q_i$ e no calor total gerado $Q_{max}$ .....	162
5.4.3	Parâmetros da curva do grau de hidratação no tempo .....	167
5.4.4	Grau de hidratação $\alpha_{20h}$ .....	169
5.4.5	Fim do período de indução $\tau$ .....	171
5.4.6	Taxa máxima de reação $\phi$ .....	174
5.5	Conclusões parciais .....	176
Capítulo 6 -	Análise da incorporação de cinzas pesadas na retração plástica de concretos ..	178
6.1	Análise da cinética das reações de hidratação pela evolução da temperatura e do calor gerado ..	183
6.2	Análise dos tempos de início e fim de pega .....	191
6.3	Análise da perda de água por exsudação .....	195
6.4	Análise da perda de água por evaporação .....	198
6.5	Conclusões parciais .....	201
Capítulo 7 -	Considerações finais .....	205
7.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	214
Capítulo 8 -	Referências bibliográficas .....	216

# Lista de figuras

---

Figura 1: Representação esquemática da evolução de calor durante a hidratação do cimento Portland (adaptado de ESPING, 2007).....	32
Figura 2: Concentração na solução de poros de uma pasta de cimento Portland com relação água/cimento de 0,5 (adaptado de TAYLOR, 1997).....	34
Figura 3: Representação esquemática da hipótese de melhoramento da hidratação do cimento Portland pela incorporação de adição mineral (adaptado de LAWRENCE <i>et al.</i> 2003).....	34
Figura 4: Apresentação esquemática de um calorímetro semi-adiabático (adaptado de JUVAS <i>et al.</i> , 2001).....	38
Figura 5: Diagrama esquemático do aparato de ensaio (adaptado de BAI e WILD, 2002) .....	39
Figura 6: Esquema da mudança volumétrica ocorrida em um concreto nas primeiras 24 horas (adaptado de KRONLÖFF <i>et al.</i> , 1995) .....	41
Figura 7: Organograma dos mecanismos de governo da retração total.....	42
Figura 8: Ilustração do desenvolvimento estrutural da microestrutura do concreto (adaptado de ESPING, 2007).....	43
Figura 9: Fim da retração por secagem pelo endurecimento do concreto após o tempo de pega (adaptado de HOLT, 2001).....	44
Figura 10: Mudanças na pressão de água de poro numa pasta de cimento fresca moldada (adaptado de RADOCEA, 1992).....	46
Figura 11: Ilustração da formação dos meniscos entre as partículas próximas da superfície do concreto devido à evaporação (adaptado de ESPING, 2007).....	47
Figura 12: Relação entre umidade relativa e pressão de poro capilar (escala logarítmica), baseada na lei de Kelvin, a 20°C (adaptado de YANG, 2004).....	50
Figura 13: Ábaco do ACI Hot Weather Concreting, baseado na formulação de Menzel (adaptado de ACI 308-R01) .....	53
Figura 14: Escoamento de ar sobre uma superfície úmida.....	54
Figura 15: Gráfico das fases de estruturação interna do concreto durante a retração plástica adaptado de ESPING e LÖFGREN, 2005) .....	59
Figura 16: Representação esquemática da cinética de hidratação do cimento Portland, segundo MARSHAK <i>et al.</i> , 2004 .....	61

Figura 17: Esquema representativo dos efeitos de aditivos na cinética de hidratação do cimento Portland (adaptado de MARSHAK <i>et al.</i> , 2004).....	62
Figura 18: Parâmetros de hidratação das medições de calor (adaptado de ESPING e LÖFGREN, 2005).....	63
Figura 19: Adsorção de água nas argamassas com cinzas pesadas (SANTOS, 2006).....	67
Figura 20: Composição da água retida de um agregado poroso.....	71
Figura 21: Retração de concreto com (LWA) e sem (NWC) agregados leves (adaptado de EUROLIGHTCON, 2000).....	73
Figura 22: Isotermas de dessorção de concretos com agregados porosos em relação ao conteúdo de umidade inicial (adaptado de EUROLIGHTCON, 2000) .....	74
Figura 23: A organização de classes do resíduo (adaptado de BATAYNEH <i>et al.</i> , 2007).....	76
Figura 24: Comparação das curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e resíduos associadas as zonas da ABNT .....	87
Figura 25: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.....	88
Figura 26: Partículas de RCD obtidas de microscopia ótica .....	89
Figura 27: Análise térmica diferencial do RCD .....	90
Figura 28: Difração de raios-X do RCD.....	90
Figura 29: Massa específica da CZP em função do diâmetro máximo da partícula .....	91
Figura 30: Massa específica da CZP em função do intervalo do diâmetro da partícula .....	92
Figura 31: Micrografia eletrônica de varredura das partículas de CZP e do grão em matriz cimentícia.....	92
Figura 32: Difração de raios X da CZP .....	93
Figura 33: Esquema do molde de fixação dos teores de substituição do AGN pelo resíduo .....	95
Figura 34: Curvas granulométricas das mesclas AGN-RCD .....	98
Figura 35: Curvas granulométricas das mesclas AGN-CZP.....	99
Figura 36: a) vista superior do molde utilizado para a amostra granular; b) Recipiente para a acoplagem da amostra e de saída de água para o ensaio de absorção .....	101
Figura 37: Aparato de ensaio de absorção capilar .....	101
Figura 38: Organograma das mesclas, argamassas e concretos estudados na tese.....	106
Figura 39: Organograma dos ensaios .....	108
Figura 40: Calorímetro semi-adiabático para medição da evolução de calor de hidratação .....	109
Figura 41: Equipamento de deformação linear por retração plástica .....	112

Figura 42: Quantidade de água absorvida nas amostras granulares com RES .....	116
Figura 43: Relação água-mescla/água-referência no estudo com material granular .....	117
Figura 44: Curva típica do índice de absorção de água por capilaridade em amostras granulares – RCD .....	118
Figura 45: Curva típica do índice de absorção de água por capilaridade em amostras granulares – RCD .....	118
Figura 46: Intensidade de absorção de água em relação à amostra de referência e à umidade do agregado granular – RCD .....	119
Figura 47: Intensidade de absorção de água em relação à amostra de referência e à umidade do agregado granular – CZP .....	120
Figura 48: Velocidade de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados – RCD .....	123
Figura 49: Velocidade de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados – CZP .....	124
Figura 50: Taxa de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados –RCD .....	125
Figura 51: Taxa de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados – CZP .....	126
Figura 52: Perda de água por secagem ao ar de amostras granulares – CZP .....	128
Figura 53: Velocidade de perda de água por secagem ao ar nos agregados granulares reciclados – CZP .....	130
Figura 54: Taxa de perda de água por secagem ao ar nos agregados granulares reciclados – CZP .....	131
Figura 55: Percentual de perda de água por secagem ao ar em relação à massa total do corpo-de-prova dos concretos CRT3 .....	134
Figura 56: Percentual de perda de água por secagem ao ar em relação à massa total do corpo-de-prova dos concretos CRT4 .....	134
Figura 57: Absorção de água por capilaridade dos concretos de CZP: CRT3 e CRT4.....	136
Figura 58: Modo de transporte da água por capilaridade em um poro.....	138
Figura 59: Absorção de álcool por capilaridade dos concretos de CZP .....	139
Figura 60: Relação linear entre a resistência à compressão e o módulo de deformação dos concretos de CZP série CRT3 e CRT4.....	142

Figura 61: Relação entre sorptividade e a resistência à compressão dos concretos de CZP série CRT3 e CRT4.....	143
Figura 62: Relação entre sorptividade e módulo de deformação dos concretos de CZP séries CRT3 e CRT4.....	143
Figura 63: Curvas típicas de evolução de temperatura, variação de temperatura e grau de hidratação $\alpha$ .....	152
Figura 64: Curvas típicas de calor de hidratação.....	153
Figura 65: Tempo do pico de calor e variação máxima da temperatura das argamassas sem aditivo SP.....	156
Figura 66: Tempo de pico de calor e variação máxima da temperatura das pastas sem aditivo SP .....	157
Figura 67: Relação a/c em função do teor de resíduo.....	158
Figura 68: Tempo do pico de calor e variação máxima da temperatura das pastas com aditivo SP .....	160
Figura 69: Tempo de pico de calor máximo e variação máxima da temperatura das argamassas com aditivo SP.....	161
Figura 70: Parâmetros do ensaio de calorimetria das argamassas sem aditivo – $Q_i$ , $\Delta Q_i$ , $Q_{20h}$ ...	162
Figura 71: Parâmetros do ensaio de calorimetria das pastas sem aditivo – $Q_i$ , $\Delta Q_i$ , $Q_{20h}$ .....	163
Figura 72: Parâmetros do ensaio de calorimetria das pastas com aditivo – $Q_i$ , $\Delta Q_i$ , $Q_{20h}$ .....	165
Figura 73: Parâmetros do ensaio de calorimetria das argamassas com aditivo – $Q_i$ , $\Delta Q_i$ , $Q_{20h}$ ..	166
Figura 74: Curva típica da evolução do grau de hidratação .....	168
Figura 75: Grau de hidratação $\alpha$ para idade de 20 horas das pastas.....	169
Figura 76: Grau de hidratação $\alpha$ para idade de 20 horas das argamassas .....	170
Figura 77: Fim do período de indução $\tau$ das pastas.....	172
Figura 78: Fim do período de indução $\tau$ das argamassas .....	173
Figura 79: Fator de inclinação $\phi$ das pastas .....	174
Figura 80: Fator de inclinação $\phi$ das argamassas .....	175
Figura 81: Curva típica de deformação por retração plástica $\epsilon$ do concreto .....	179
Figura 82: Curvas típicas dos parâmetros de retração plástica estudados ( $E_{xs}$ : exsudação; $E_{vp}$ : evaporação; $\epsilon$ : deformação por retração plástica; $\Delta T$ : variação da temperatura; $Q_{max}$ : calor gerado ao longo do tempo).....	180

Figura 83: Valores médios da temperatura e umidade relativa .....	181
Figura 84: Curva típica de evolução de temperatura da amostra do ensaio de evaporação .....	184
Figura 85: Influência da variação máxima da temperatura e tempo até a máxima temperatura, na retração plástica dos concretos de CZP .....	185
Figura 86: Pico de calor, calor total em 20 horas e taxa máxima de calor .....	187
Figura 87: Parâmetros da curva do grau de hidratação no tempo .....	189
Figura 88: Taxa de desenvolvimento da deformação por retração plástica .....	190
Figura 89: Determinação dos tempos de início e fim de pega dos concretos pelo método de Vicat modificado .....	192
Figura 90: Tempos de início de pega determinados pelo Vicat modificado, curva de evolução de temperatura e curva do grau de hidratação .....	194
Figura 91: Evolução da ascensão de água por exsudação à superfície.....	196
Figura 92: Perda total de água por exsudação e taxa de perda no tempo total .....	197
Figura 93: Curva típica de perda de água por evaporação ao longo do tempo.....	199
Figura 94: Evaporação e taxa de evaporação no tempo de 20 horas .....	200
Figura 95: Taxa de evaporação do trecho linear.....	201

# Lista de tabelas

---

Tabela 1: Retardo do tempo de pega do concreto com aditivo à base de melamina (HOLT e LEIVO, 2004).....	60
Tabela 2: Critério de eficiência do aditivo (adaptado de MARSHAK <i>et al.</i> , 2004) .....	63
Tabela 3: Solicitações exigidas pelo RILEM, referentes aos agregados reciclados.....	78
Tabela 4: Composição do material de diferentes tipos, segundo a DIN 4226-100 .....	79
Tabela 5: Densidade das partículas e absorção de água após 10 minutos para agregados reciclados minerais, segundo a DIN 4226-100.....	79
Tabela 6: Categorias para valores máximos do teor de finos, segundo a DIN 4226-100 .....	79
Tabela 7: Metodologia de ensaio empregada na caracterização física e química dos agregados .....	86
Tabela 8: Características químicas e físicas do cimento Portland CPI-S 32 .....	86
Tabela 9: Características físicas dos agregados naturais .....	87
Tabela 10: Características físicas dos RES .....	89
Tabela 11: Características químicas dos RES .....	89
Tabela 12: Características do aditivo superplastificante Glenium 51 .....	93
Tabela 13: Características das mesclas segundo o teor de substituição .....	96
Tabela 14: Parâmetros granulométricos das mesclas AGN/RES .....	100
Tabela 15: Traço unitário dos concretos de CZP .....	105
Tabela 16: Ensaio no estado fresco das argamassas e concretos com CZP e RCD.....	107
Tabela 17: Calores específicos considerados para os materiais constituintes dos concretos dessa pesquisa .....	110
Tabela 18: Parâmetros resultantes do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	115
Tabela 19: Teor de água perdido na secagem ao ar das mesclas com CZP .....	127
Tabela 20: Dosagem e propriedades dos concretos de CZP – estudo preliminar.....	132
Tabela 21: Coeficiente de sorptividade dos ensaios com água e álcool dos concretos de CZP..	137
Tabela 22: Constantes características dos fluidos do ensaio de absorção capilar (T=20°C).....	140
Tabela 23: Ângulo de contato aparente dos concretos de CZP .....	141
Tabela 24: Traços unitários em massa das argamassas (relativo ao cimento = 1kg) .....	147
Tabela 25: Relações a/c para as 21 pastas do estudo de evolução do calor de hidratação .....	153
Tabela 26: Teores de SP das pastas do estudo de evolução do calor de hidratação .....	154

Tabela 27: Resultados do ensaio de calorimetria das argamassas.....155

# Lista de símbolos

---

- $\alpha$  – ângulo de contato, segundo MEROUANI, 1987
- $\alpha$  – conversão ou grau de hidratação do cimento
- $\alpha_{20h}$  – grau de hidratação do cimento no tempo de 20 horas de ensaio
- $\alpha_c$  – coeficiente de transferência convectiva de calor
- $\alpha_e$  – ângulo de contato aparente
- $\alpha(t)$  – grau de hidratação do cimento em função do tempo
- a – massa de areia no traço unitário
- A – área da seção transversal
- $A_{anel}$  – área do anel metálico utilizado como volume padrão
- $Abs_i$  – absorção de água do RES no teor de umidade i
- $Abs_{ref}$  – absorção de água por capilaridade da amostra referência M500
- $Abs_{rel}$  – absorção relativa de água por capilaridade do RES no teor de umidade i
- a/c – relação água/cimento
- AFm – monossulfoaluminato de cálcio ou monossulfato
- AFt – etringita
- AGN – agregado miúdo natural
- $AGN_i$  – teor “i” de agregado miúdo natural na mistura
- ATD – Análise térmica diferencial
- $\beta$  – coeficiente médio de transferência convectiva de massa
- $c_0$  – concentração de vapor
- $c_i$  – calor específico do constituinte do concreto
- $c_\infty$  – concentração de vapor de água
- $c_s$  – coeficiente de vapor na saturação
- $C_2S$  – belita, silicato dicálcico
- $C_3A$  – aluminato tricálcico
- $C_3S$  – alita, silicato tricálcico
- $C_4AF$  – ferro-aluminato tetracálcico
- C.C. – coeficiente de curvatura C.C.
- C&D – construção e demolição

$C_p$  – capacidade de calor do ar  
 CPI-S – cimento Portland comum com adição  
 CRT – concreto  
 CRT3 – concreto da série 3  
 CRT4 – concreto da série 4  
 $C_s$  – capacidade térmica da amostra  
 C-S-H – silicato de cálcio hidratado  
 C.U. – coeficiente de uniformidade  
 CZP – cinza pesada  
 $\delta_{ap}$  – massa específica aparente  
 $\delta_u$  – massa unitária no estado solto  
 $\Delta c$  – diferença de concentração de vapor  
 $\Delta \varepsilon / \Delta t$  – taxa de deformação por retração plástica do concreto  
 $\Delta E_{xs-T}$  – taxa de exsudação total  
 $\Delta h$  – variação da frente hidráulica, segundo RADOCEA, 1992  
 $\Delta Q_i$  – taxa de calor gerado no tempo  $i$   
 $\Delta T_{max}$  – variação máxima da temperatura  
 $\Delta W$  – massa de água que saiu da amostra, segundo RADOCEA, 1992  
 $d\varepsilon/dt_1$  – taxa de deformação plástica até a pega inicial, segundo ESPING e LÖFGREN, 2005  
 $d\varepsilon/dt_2$  – taxa de deformação semi-plástica da pega inicial até a pega final, segundo ESPING e LÖFGREN, 2005  
 $d\varepsilon/dt_3$  – taxa de deformação rígida a partir da pega final, segundo ESPING e LÖFGREN, 2005  
 $dI/dt_{abs\_H_2O}$  – taxa de absorção capilar  
 $dx/dt_{abs\_H_2O}$  – velocidade de absorção capilar  
 $\varepsilon$  – deformação por retração plástica do concreto  
 $\varepsilon_1$  – deformação plástica até a pega inicial, segundo ESPING e LÖFGREN, 2005  
 $\varepsilon_2$  – deformação semi-plástica da pega inicial até a pega final, segundo ESPING e LÖFGREN, 2005  
 $\varepsilon_{max}$  – deformação máxima por retração plástica do concreto  
 $e$  – espessura da camada primária dos produtos da hidratação do cimento sem adição mineral

$e'$  – espessura da camada primária dos produtos da hidratação do cimento com adição mineral  
 EDX – espectrometria de dispersão de raios-X  
 EPS – poliestireno expandido  
 $E_{vp}$  – perda de água por evaporação do concreto  
 $E_{vp\_20h}$  – perda de água por evaporação do concreto no tempo de 20 horas de ensaio  
 $E_{vp\_linear}$  – taxa de perda de água por evaporação do concreto no trecho linear da curva  $E_{vp}$  versus  $t$   
 $E_{xs}$  – perda de água por exsudação do concreto  
 $E_{xs-T}$  – perda total de água por exsudação do concreto  
 $\phi$  – taxa de reação máxima  
 $\phi$  – umidade relativa  
 $\gamma$  – tensão superficial do líquido  
 $g_i$  – proporção relativa do constituinte na massa da amostra de concreto  
 $h_{abs}$  – umidade absorvida no ensaio de absorção capilar  
 $h_i$  – teor de umidade  $i$   
 $h_{sec}$  – teor de água perdida na secagem ao ar  
 $I_{abs\_H2O}$  – índice de absorção de água  
 $K$  – coeficiente de permeabilidade, segundo RADOCEA, 1992  
 $K_\alpha$  – parâmetro da conversão ou grau de hidratação, segundo MARSHAK *et al.*, 2004  
 $K_\phi$  – parâmetro da taxa de reação máxima, segundo MARSHAK *et al.*, 2004  
 $K_\tau$  – parâmetro do tempo de indução, segundo MARSHAK *et al.*, 2004  
 $L$  – espessura do corpo-de-prova  
 $\mu_{alc}$  – viscosidade dinâmica da álcool  
 $\mu_{H2O}$  – viscosidade dinâmica da água  
 $m_{am}$  – massa da amostra  
 $m_c$  – massa de cimento  
 $m_{H2Ox}$  – massa de água total no teor de substituição  $x$   
 $m_i$  – massa do material para teor de substituição “ $i$ ”  
 $m_i$  – quantidade do composto do cimento Portland considerado calculado pela fórmula de Bogue  
 $m_{RESx}$  – massa do resíduo no teor de substituição  $x$   
 $m_{ret\_i}$  – massa retirada para formação do teor de substituição de agregados “ $i$ ”

$m_s$  – massa da amostra  
 $m(t)$  – massa da amostra no tempo  $t$   
 $m_t$  – massa para teor de substituição de agregados igual 0%  
 $M_{H_2O}$  – massa de água  
 $M_{H_2O\_REF}$  – massa de água da amostra referência  
 $M_S$ : massa da amostra seca em estufa  
 $M_w$  – peso molar de água  
 $P_1$  – pressão hidráulica, segundo RADOCEA, 1992  
 $P_2$  – pressão hidrostática normal, segundo RADOCEA, 1992  
 $P_a$  – pressão no ar, segundo ESPING, 2007  
 $P_{cap}$  – pressão capilar  
PVC – polivinil acetato  
 $P_w$  – pressão na água, segundo ESPING, 2007  
 $q_{ev}$  – taxa de perda de água por evaporação, segundo ESPING, 2007  
 $Q$  – taxa de perda de água por exsudação, segundo RADOCEA, 1992  
 $Q_{20h}$  – calor de hidratação no tempo de 20 horas de ensaio  
 $Q_i$  – quantidade de calor gerado no tempo  $i$   
 $Q_i'$  – calor de hidratação dos compostos do cimento separados quando hidratados totalmente  
 $Q_\infty$  – calor de hidratação do cimento em um tempo infinito  
 $Q_{max}$  – quantidade do calor total gerado durante o ensaio  
 $Q(t)$  – calor de hidratação do cimento desenvolvido no tempo  
 $\rho_{ar}$  – densidade do ar  
 $\rho_l$  – densidade do líquido  
 $\rho_w$  – densidade da água  
 $r$  – raio do poro  
 $R$  – constante universal dos gases  
 $R_1, R_2$  – raios médios da curvatura da superfície do líquido  
RCD – resíduo de construção e demolição  
REF – amostra referência  
RES – agregado miúdo resíduo  
 $RES_i$  – teor “i” de agregado miúdo resíduo na mistura  
 $RH_0$  – umidade relativa inicial, igual a 100%

$RH_{\infty}$  – umidade relativa no tempo infinito  
 $\sigma_{alc}$  – tensão superficial álcool/ar  
 $\sigma_{H_2O}$  – tensão superficial água/ar  
 $S$  – coeficiente de sorptividade  
 $SP$  – superplastificante  
 $SSS$  – Saturado superfície seca  
 $S(t)$  – estoque de líquido infiltrado  
 $S(t)_{alc}$  – inclinação da reta do gráfico de relação entre o estoque de álcool infiltrado  $S(t)_{alc}$  e a raiz quadrada do tempo  
 $S(t)_{H_2O}$  – inclinação da reta do gráfico de relação entre o estoque de água infiltrada  $S(t)_{H_2O}$  e a raiz quadrada do tempo  
 $\tau_i$  – tempo de indução  
 $t$  – tempo  
 $t_1$  – tempo para que a pressão de água no poro diminui de  $P_1$  para  $P_2$ , segundo RADOCEA, 1992  
 $t_1$  – intervalo plástico até a pega inicial, segundo ESPING e LÖFGREN, 2005  
 $t_2$  – tempo quando a superfície da água perde sua planicidade e a pressão capilar inicia a redução, segundo RADOCEA, 1992  
 $t_2$  – intervalo semi-plástico da pega inicial até a pega final, segundo ESPING e LÖFGREN, 2005  
 $t_{\Delta T_{max}}$  – tempo até a máxima temperatura  
 $T$  – temperatura  
 $T_1$  – temperatura da amostra no início do ensaio  
 $T_i$  – temperatura da amostra no tempo  $i$   
 $U$  – velocidade do vento  
 $UR$  – umidade relativa  
 $V_{AGN_i}$  – volume de agregado miúdo natural ocupado no molde padrão  
 $V_{am}$  – volume da amostra  
 $V_i$  – volume do molde padrão  
 $V_{H_2O}$  – volume de água absorvido da leitura do tubo de Mariotte  
 $V_{RES_i}$  – volume de agregado miúdo resíduo ocupado no molde padrão de ensaio  
 $x(t)$  – altura da franja capilar

# Lista de siglas

---

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Standard Test Method

BS – British Standard

CERIB – Centre d’Etudes et de Recherches de l’Industrie du Béton

DIN – Deutsches Institut für Normung

ENV – Norma Europeia

EUROLIGHTCON – Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete

ISO – International Standards Organization

LVDT – linear variable differential transducer

LWA – light weight aggregate

NBR NM – Normalização brasileira e Mercosul

NEN – Netherlands Normalization Institute Standard

NF – Norme Francise

NWC – normal weight aggregate

PCA – Portland Cement Association

PrEN – Pré-Norma Europeia

QUALIS-CAPES – índice de avaliação de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

ValoRes – laboratório Valorização e Reciclagem de Resíduos Industriais na Construção Civil da Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

# Resumo

---

A influência da incorporação de materiais granulares reciclados na fase plástica de concretos é analisada nesta pesquisa. Os agregados reciclados são provenientes de resíduos (RES) de construção e demolição (RCD) e da queima do carvão mineral para geração de energia (CZP) em substituição ao agregado miúdo natural. Substituições parciais e totais foram realizadas. Inicialmente, uma metodologia de substituição dos RES é proposta, já que há grande dificuldade para o estabelecimento preciso da equivalência de volume entre os RES em relação ao agregado miúdo natural (AGN). Ensaio de absorção de água por capilaridade foram executados em amostras granulares de mesclas AGN-RES e os resultados mostraram grande intensidade de absorção de água pelos RES em comparação ao AGN, principalmente por sua natureza porosa.

A influência dos agregados reciclados RCD e CZP sobre a cinética de hidratação do cimento Portland foi analisada utilizando o ensaio de calorimetria semi-adiabática. Argamassas com proporcionamento dos materiais associado aos traços dos concretos para as medições dos parâmetros da fase plástica foram produzidas e os resultados mostraram uma importante influência dos RES. As argamassas com RCD e CZP mostraram uma tendência de aumento do valor dos parâmetros de calor estudados com o aumento do teor de RES. Nas argamassas com RCD, os principais efeitos foram: o potencial de contribuir com pontos extras de nucleação e uma possível retomada da hidratação de alguma parcela cimentícia anidra. Já nas argamassas com CZP foi devido principalmente ao calor específico menor e menor perda de calor, conseqüentemente maior quantidade de ar interno ao grão, aumentando o isolamento térmico da mistura, sem que houvesse perda de calor.

A análise das modificações na fase plástica de três séries de concretos (S1, S2 e S3) pela incorporação de CZP foi estudada para os seguintes parâmetros: perda de água por exsudação e evaporação, cinética de calor de hidratação, evolução da pega e deformação por retração plástica. Os resultados mostraram que há influência significativa do tipo de dosagem da série e também que o agregado reciclado poroso poderá exercer uma função de reservatório de água para posterior liberação, para o caso de S1. Em S2 e S3 não há uma clara tendência nessa direção.

Por fim, há grande possibilidade da aplicação desses resíduos em concretos sem que conduza a resultados negativos no desempenho de concretos no estado fresco. Isso se comprova por resultados positivos obtidos em alguns teores de substituição nas séries de concretos estudados, principalmente os maiores teores em S1 e menores teores em S2 e S3.

# Abstract

---

Influence of granulate recycled materials in concrete in development of the plastic shrinkage in the fresh state is analyzed in this research. The recycled aggregates are proceeding from residues (RES) of construction and demolition (RCD) and the coal by-products bottom ash (CZP) in replacement to natural fine aggregate. Partial and total substitutions had been carried through. At first, a method of replacement RES is proposal, since it has great difficulty for the accurate establishment of the equivalence of volume between the RCD and the CZP in relation to the natural fine aggregate (AGN). Tests of capillarity water absorption had been carried out in samples to granulate of AGN-RES mix, and the results had shown great potential of water absorption for the RES in contrast to the AGN.

The influence of recycled aggregates RCD and CZP on the kinetic of Portland cement hydration was also analyzed with the test of semi-adiabatic calorimeter. Mortars with mix proportion associated to the concrete for the measurements of the plastic shrinkage parameters had been prepared and the results had shown an important influence of the RES. RCD and CZP mortars had shown a tendency of increase of the heat parameters value studied ( $T_i$ ,  $\Delta T_i$ ,  $Q_i$ ,  $\Delta Q_i$ ,  $Q_{max}$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$ ,  $\varphi$ ) with the increase of the RES content. In RCD mortars, the main effects are the potential to contribute with extra nucleation points and a possible of continued hydration of some part non-hydration of cement particle. However, in CZP mortars the main effects are associated with lesser specific heat coefficient and lesser loss of heat, as a consequence of the bigger amount of internal air in CZP particle, increasing the thermal isolation of the mixture, without loss of heat.

The investigation of the modifications in the plastic shrinkage of three series of concrete (S1, S2 and S3) for the incorporation of RCD and CZP was studied for the following parameters: loss of water by bleeding and evaporation, kinetic of hydration heat, evolution of the setting time and plastic shrinkage deformation.

The results had shown that there is significant influence of the type of mix proportion of the concrete series and also that the porous recycled aggregate will be able to exert a function of water reservoir for later release in series 1. But in series 2 and 3 it does not have a clear trend in this direction.

Finally, it has great possibility of the application of these residues in concrete without it leading to negative results in the performance of concrete in the fresh state. There are some positive results in some replacement content in concrete series, mainly the largest content in series 1 and small content in series 2 and 3.

---

# Capítulo 1 - Introdução

---

Trabalhos referentes à durabilidade dos materiais de construção à base de cimento Portland ressaltam que as características do concreto no estado endurecido estão intimamente ligadas com o comportamento e modificações ocorrentes no seu estado fresco.

O estado fresco, quanto aos constituintes, caracteriza-se pela grande quantidade de água presente na mistura, com umidade relativa interna do concreto de 100% antes de atingir o tempo de início de pega. Após o fim do período de indução, com o início da pega, parte da água contida no concreto é perdida para o ambiente ou sofre transformação química tornando-se parte de ligação química dos novos produtos resultantes da hidratação do cimento.

Com a saída da água para o ambiente externo, por evaporação da superfície exposta do elemento moldado, há uma tendência à contração do concreto por parte das paredes dos poros capilares, que secam e iniciam um processo de aproximação entre si, caracterizando, assim, a retração.

Toda a fenomenologia envolve vários parâmetros intrínsecos e extrínsecos ao concreto, como, por exemplo, a diferença de temperatura e umidade relativa da superfície e do ambiente, a incidência de radiação e vento, o consumo de aglomerante, a presença de finos inertes, a quantidade de água disponível para evaporação.

A retração do concreto é um fenômeno que ocorre tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco, a retração é conhecida como retração plástica e envolve desde o instante de moldagem do concreto até o final da pega e início do endurecimento.

A retração plástica do concreto é um efeito que dificilmente poderá ser totalmente evitado sem que aditivos químicos e materiais minerais especiais façam parte dos materiais constituintes em dosagens especiais.

Consideram-se dois fatores importantes para que ocorra a retração plástica em concretos à base de cimento Portland: a perda de água antes do fim da pega e o desenvolvimento da cinética de hidratação. Caso algum desses sofra interferência, a deformação por retração no estado fresco poderá ser alterada.

Se o desenvolvimento dos produtos de hidratação que darão suporte mecânico ao concreto ocorrer mais rapidamente, mais apto estará o concreto para resistir mecanicamente à deformação imposta pela tendência à aproximação das paredes dos poros capilares pela saída da água. E, se houver alguma forma de contenção ou promoção para que menos água escape do interior do concreto, ou ainda haja um reservatório interno ao concreto para liberação de água, igualmente a perda de água será amenizada e, portanto, menor será a retração plástica.

Sendo assim, a utilização de um material inerte e poroso poderá agir como provedor de um conteúdo de umidade que evite ou pelo menos mitigue a secagem do interior do concreto com um fornecimento contínuo de umidade durante a fase plástica. Caso este material inerte possa ainda promover modificação na cinética de hidratação do cimento, uma possível aceleração do intervalo entre o tempo de início e fim de pega poderá ser conseguida, já que nesse intervalo é onde há maior deformação por retração plástica.

Sabe-se que alguns tipos de resíduos que estão sendo largamente estudados possuem características que se adaptam ao comentado acima. Desses, os gerados pela indústria da construção civil, o resíduo de construção e demolição (RCD), e a cinza pesada (CZP) gerada pela queima do carvão mineral em termelétricas de geração de energia, são fortes candidatos para amenizar ou combater retração plástica de concreto sendo incorporados como agregados com características higroscópicas pela sua porosidade (GHAFOORI e BUCHOLC, 1997; CHERIAF et al., 1999; ANDRADE, 2004).

Na literatura, esses materiais reciclados são incorporados como agregados inertes em substituição ao agregado miúdo natural, tornando o concreto comum um material com grande intensidade de absorção de materiais residuais, contribuindo para a sustentabilidade na construção civil. Contudo, existem lacunas nas avaliações do comportamento desses materiais resíduos quanto ao comportamento no estado fresco.

Diante dessa perspectiva, os materiais granulares reciclados, resíduo de construção e demolição RCD e resíduo do carvão mineral CZP poderão ser incorporados com vista ao melhoramento do desenvolvimento do concreto no estado fresco. Funcionarão permitindo melhor fixação da água evaporável, pela parcela importante de finos, modificando a cinética de hidratação, alterando o intervalo do período de indução e variando a taxa de reação de hidratação após a pega, e, por fim, funcionando como possível fonte reservatória de água, liberando-a à medida que parte da água de trabalhabilidade for perdida para a superfície.

Essa idéia forma o eixo condutor dessa pesquisa, que busca avançar no entendimento científico dos fenômenos.

## ***1.1 Justificativa***

É fundamental ressaltar a abordagem que torna válida a relevância do tema, que é a potencialização da aplicação de novos materiais e materiais reciclados em concreto com base no melhoramento de características e de consumo de rejeitos.

Diante das perspectivas lançadas nas pesquisas já realizadas sobre o assunto da utilização de RCD e CZP como agregado miúdo para concretos, um estudo aprofundado no tema proposto, sobre o comportamento de concretos no estado fresco, poderá contribuir para melhor esclarecer aspectos da utilização desses materiais resíduos.

Essa pesquisa está sendo motivada pelo conjunto de resultados já alcançados nas pesquisas desenvolvidas no laboratório do grupo de Valorização e Reciclagem de Resíduos Industriais na Construção Civil – ValoRes (BAZUCO, 1999; XAVIER, 2001; KREUZ, 2002; ANDRADE, 2004; LUZ, 2005; SANTOS, 2006; SCHAEFER, 2007).

Considerando uma possível contribuição, a medição dos parâmetros do ensaio de calorimetria semi-adiabática e sua relação com a presença dos materiais reciclados, e também a relação com a retração plástica dos concretos, podem ser tidos como inovadores no meio científico comum.

## ***1.2 Delimitação do trabalho***

Como o trabalho se dará com base na utilização de resíduo de construção e demolição e de cinza pesada como materiais substitutos ao agregado miúdo natural, os resultados da pesquisa não serão inovações no estado da arte para o determinado assunto de retração plástica.

Também os resultados da tese não serão estendidos para todos os materiais porosos ou recicláveis, ficando restrita para a utilização desses resíduos especificamente, donde procederá toda a abordagem conclusiva e que valerá as discussões pertinentes.

## ***1.3 Objetivos***

Tem-se por objetivo geral analisar o efeito da aplicação dos agregados porosos de construção e demolição, RCD, e cinzas pesadas de carvão mineral, CZP, nos parâmetros retração plástica.

Para se alcançar o objetivo geral proposto, uma série de objetivos específicos são importantes de se realizar:

- Avaliação da intensidade de absorção e liberação de água dos agregados reciclados RCD e CZP;
- Determinação dos teores de substituição do agregado miúdo natural pelos resíduos para a composição das mesclas;
- Avaliação da cinética de hidratação através da calorimetria semi-adiabática em argamassas associadas aos concretos de RCD e CZP;
- Identificação dos parâmetros de cinética de hidratação por calorimetria semi-adiabática e dos parâmetros concernentes à retração plástica no intervalo entre o início e o fim da pega dos concretos de CZP.

## ***1.4 Estrutura da tese***

A tese encontra-se estruturada em 8 capítulos e 8 anexos.

O primeiro capítulo da tese, ***Introdução***, apresenta o tema discorrendo sobre a idéia central, o fio condutor que norteou o desenvolvimento da pesquisa. Compreende a justificativa, a delimitação dessa pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos, bem como a apresentação geral da estrutura da tese.

O segundo capítulo, *Revisão bibliográfica*, fornece a fundamentação teórica do tema abrangendo a análise do comportamento no estado fresco do concreto, desde o desenvolvimento da cinética de hidratação do cimento Portland até a abordagem teórica do fenômeno de retração plástica nos materiais cimentícios.

A segunda parte da revisão bibliográfica é dirigida às características e avanços alcançados com a utilização de resíduos em concretos como agregados, em substituição principalmente à parte fina – miúdo – dos agregados.

O terceiro capítulo, *Materiais e métodos experimentais*, apresenta a metodologia empregada e as características dos materiais utilizados, com amplo estudo das características dos materiais utilizados. Apresenta os dois materiais resíduos a serem estudados: RCD e CZP.

O quarto capítulo, *Aspectos da cinética de umidade de materiais granulares reciclados: RCD e CZP*, foi organizado com o objetivo de detalhar os resultados alcançados por um dos principais aspectos para a utilização desses materiais reciclados granulares: a intensidade de absorção de água por capilaridade e perda de água por secagem ao ar.

Nesse capítulo, um método de migração de umidade por absorção capilar é proposto. Os resultados alcançados mostram a eficácia do aparato e a velocidade de resposta para a obtenção dos dados.

O quinto capítulo, *Influência de materiais granulares reciclados como agregados miúdos na evolução do calor de hidratação de argamassas associadas a concretos*, compreendeu o estudo da calorimetria semi-adiabática em argamassas produzidas na mesma proporção que a dos concretos estudados no capítulo seguinte, com e sem aditivo superplastificante.

Este capítulo abrangeu ainda os resultados preliminares em pastas de mesmas relações a/c das argamassas sem aditivo, e em pastas com aditivo e mesmas relações a/c fixas das argamassas.

No sexto capítulo, *Análise da incorporação de cinzas pesadas na retração plástica de concretos*, os resultados do estudo referente à retração plástica dos concretos foram apresentados. Os ensaios que envolvem o fenômeno são tratados separadamente e, ao final, são relacionados entre si para se ter uma caracterização global da retração plástica mediante a análise dos principais fatores de influência.

O sétimo capítulo, *Conclusões*, apresenta os comentários finais dos resultados e discussões, e as sugestões para futuras pesquisas, a partir dos conceitos e limitações dessa tese.

Por meio de publicações em periódicos internacionais e nacionais e em congressos de âmbito nacional, essa pesquisa refletiu seu caráter meritório para o avanço técnico-científico.

Ao todo, quatro artigos foram, até esta data, submetidos e aceitos em periódicos indexados. Três em periódicos internacionais de alta conceituação pelo índice QUALIS-CAPES e um artigo em periódico nacional. Os mesmos encontram-se listados abaixo e o texto completo dos artigos, já publicados, nos endereços correspondentes.

1. ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. **Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete.** Construction & Building Materials, 2008. ([doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.05.003](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.003))
2. ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. **Influência das cinzas pesadas de carvão mineral em substituição ao agregado natural na produção de concretos.** Revista IBRACON de Materiais, 2008. (Aceito para publicação)
3. ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. **Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete.** Cement and Concrete Research, v. 37, p. 231-241, 2007. ([doi:10.1016/j.cemconres.2006.11.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.001))
4. ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. **Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement.** Waste Management (Elmsford), v. 27, p. 1190-1199, 2007. ([doi:10.1016/j.wasman.2006.07.020](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.020))

Os artigos em congressos nacionais foram 2 e estão listados abaixo:

1. SALVADOR, F.S., ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. Análise da influência de cinzas pesadas como agregado miúdo em concreto na absorção capilar e retração plástica. In: 11º ENTAC, 2006, Florianópolis. XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - A Construção do Futuro, Anais, 2006. p. 4329-4338.
2. ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. Estudo da Incorporação de Cinzas Pesadas de Termelétricas como Agregado Miúdo em Concretos. In: I ClaCS'04 / 10º ENTAC, 2004, São Paulo. Construção Sustentável - Construcción Sostenible, Anais, 2004.

---

## Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

---

O concreto apresenta duas fases, dois estágios distintos em relação às propriedades mecânicas: fase ou estado fresco e fase ou estado endurecido.

Fundamentalmente, o estado fresco difere-se do estado endurecido pela possibilidade de manipulação do material e pelas características mecânicas de resistência e durabilidade.

O estado fresco compreende o intervalo de tempo desde a mistura dos materiais constituintes do concreto até o início do endurecimento, que se caracteriza pelo fim do tempo de pega do cimento e pelo desenvolvimento das propriedades mecânicas e das características concernentes à durabilidade. Sendo assim, a partir do fim da pega e início do desenvolvimento da resistência mecânica, o estado endurecido inicia e continua por toda a vida útil do material.

Os materiais cimentícios são materiais que são fabricados para serem utilizados segundo suas características de resistência mecânica, dureza, rigidez. Porém é inevitável que esses materiais, até atingirem o estado endurecido, passem pelo estado fresco. Portanto, do ponto de vista de interferência, é bastante razoável que haja ligação entre as duas fases, isto é, que a anterior – fase fresca – passe isenta ou com o mínimo de alteração possível para que a posterior – fase endurecida – não fique com algum dano patológico ou comprometida na resistência mecânica e durabilidade.

Partindo-se do intento de que um entendimento da hidratação do cimento permite um melhor entendimento do processo de retração plástica, torna-se justificável uma revisão do processo que transcorre com a hidratação, levando-se em conta a cinética das reações com o estudo da evolução da curva de calor até a formação da rede capilar inicial, compreendendo o processo da pega do cimento.

## ***2.1 Cinética da hidratação do cimento Portland***

Do ponto de vista químico, a hidratação do cimento Portland consiste em uma série de reações entre os minerais presentes no clínquer, o sulfato de cálcio e a água. Essas reações iniciam imediatamente com o contato com a água e iniciam também simultânea e sucessivamente em diferentes taxas, com as reações iniciais influenciando as reações seguintes. Os participantes do processo de hidratação do cimento Portland são: alita ( $C_3S$ ), belita ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), ferro-aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), óxido de cálcio livre ( $CaO$ ), sulfatos álcalis ( $K_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ), sulfato de cálcio na forma de di-hidratado ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), hemi-hidratado ( $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ ) ou anidrita integrada ao clínquer ( $CaSO_4$ ), e água ( $H_2O$ ).

O desenvolvimento da hidratação do cimento Portland depende basicamente de três processos (LEA, 2004):

- da taxa de dissolução das fases envolvidas;
- da taxa de nucleação e crescimento de cristais dos hidratos formados;
- da taxa de difusão de água e íons dissolvidos através do material hidratado já formado.

Nesse desenvolvimento, alguns fatores determinam a cinética do processo de hidratação do cimento Portland: a história do processamento do clínquer, incluindo taxa de aquecimento, temperatura máxima de queima e taxa de resfriamento, a quantidade e forma cristalina do sulfato de cálcio presente no cimento, a finura do cimento, a relação água/cimento, as condições de cura, a temperatura de hidratação, a presença de aditivos químicos na mistura (LEA, 2004).

As reações químicas entre o cimento anidro e a água durante a pega e o endurecimento liberam calor que resulta na elevação da temperatura do concreto fresco. Dessa forma, a seqüência de hidratação pode ser muito bem entendida levando-se em consideração o ensaio de calorimetria e observando-se a curva resultante da medição da temperatura ou do calor gerado em função do tempo.

O calor de hidratação consiste no calor químico das reações de hidratação e no calor de adsorção da água na superfície do gel formado no processo (NEVILLE, 1981).

A curva de evolução da taxa de calor (figura 1) é dividida e apresentada segundo a cronologia de processos químicos devido às reações de hidratação do cimento Portland.

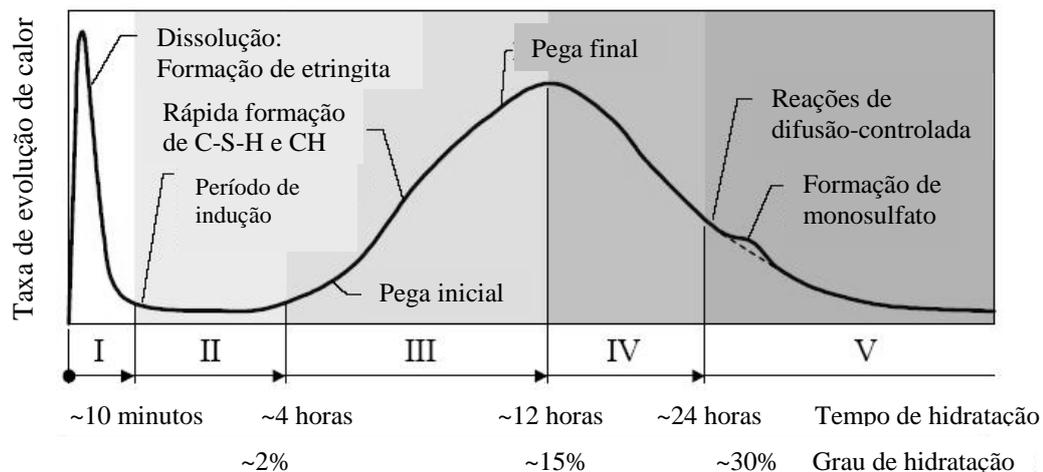


Figura 1: Representação esquemática da evolução de calor durante a hidratação do cimento Portland (adaptado de ESPING, 2007)

A primeira parte da curva (I), correspondente ao pico inicial, é devido à uma combinação de reações exotérmicas de molhagem do cimento Portland e das reações iniciais de dissolução. Nessa fase, ocorre uma rápida dissolução de espécies iônicas, em que os álcalis dissolvem-se completamente em segundos ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ). O sulfato de cálcio, na forma de hemihidrato, também dissolve ( $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ) até a saturação da solução. A hidratação da etapa I está bastante associada com um aumento da concentração de  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$ , porém a concentração de íons silicatos permanece muito baixa (LEA, 2004). Ainda nessa fase, o  $C_3A$  dissolve e reage com  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  produzindo etringita (AFt), que precipita na superfície do grão de cimento formando uma capa gelatinosa. Essa deposição sobre a superfície do grão de cimento funciona como uma barreira entre o material não hidratado e a solução, causando uma elevação na concentração de íons dissolvidos na fase líquida que estão em contato permanente com o grão anidro.

A segunda parte da curva (II), também conhecida como período de indução ou período de dormência, apresenta-se com uma redução significativa na taxa de hidratação de todos os componentes. A concentração do hidróxido de cálcio na fase líquida alcança o seu ponto máximo e então inicia um decaimento de concentração. O  $SO_4^{2-}$  consumido para a formação da AFt permanece constante após uma dissolução adicional do sulfato de cálcio.

A parte da curva que contém o pico principal (III) é chamada período de aceleração e caracteriza-se pela nucleação de crescimento dos principais produtos de hidratação do cimento Portland. Esses produtos que se desenvolvem a partir do  $C_3S$  são o silicato de cálcio hidratado

(C-S-H) e a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). A portlandita precipita e provoca a redução gradual da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na fase líquida. Ocorre a redução de concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$  pela nova formação de AFt e também pela sua adsorção na superfície do C-S-H formado. Nessa etapa, segundo TAYLOR (1997), a calorimetria pode sugerir que os processos de hidratação do cimento como um todo e a reação de hidratação somente do  $\text{C}_3\text{S}$  sejam similares. Porém há diferenças importantes na natureza do produto formado e também onde o C-S-H formado no estágio intermediário (III) começa a se depositar. Contudo, para ambos os casos, parece que as reações iniciais desaceleram devido ao depósito de uma camada de produto nas superfícies de cimento anidro e devido também ao bloqueio das concentrações para essas mesmas superfícies a fim de alcançarem valores de solubilidade ideal de nucleação.

A quarta parte da curva da taxa de evolução de calor (IV), segundo a figura 1, é conhecida como período de pós-aceleração e inicia após o fim de pega. Este período está relacionado com a redução gradual da taxa de hidratação com o processo controlado por difusão e/ou reações topoquímicas, que se perpetuam durante a hidratação tardia do conteúdo restante de cimento anidro.

A quinta parte da curva (V) mostra um pequeno pico de calor que corresponde à formação do monossulfoaluminato de cálcio ou simplesmente monossulfato (AFm) a partir da conversão da AFt ou da hidratação da fase ferrita  $\text{C}_4\text{AF}$  (TAYLOR, 1994).

Em relação aos íons na solução de poros, é importante salientar que grandes concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  são alcançados rapidamente. Segundo TAYLOR (1997), numa pasta de cimento é possível verificar que, entre 2 e 12 horas, as concentrações mudam relativamente pouco, indicando um equilíbrio aproximado entre a continuidade da dissolução das fases do cimento e a precipitação dos produtos (figura 2). Entre 12 e 15 horas, as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  caem bruscamente e a solução, após isso, é essencialmente a dos hidróxidos ou sulfatos alcalis. Essa queda brusca corresponde a um novo crescimento de AFt.

Dentro da cinética de hidratação do cimento Portland, é interessante comentar que há uma hipótese de melhoramento do processo de hidratação com a incorporação de partículas minerais na mistura, provocando uma diminuição da espessura da camada hidratada formada ao redor do grão de cimento (LAWRENCE, *et al.*, 2003).

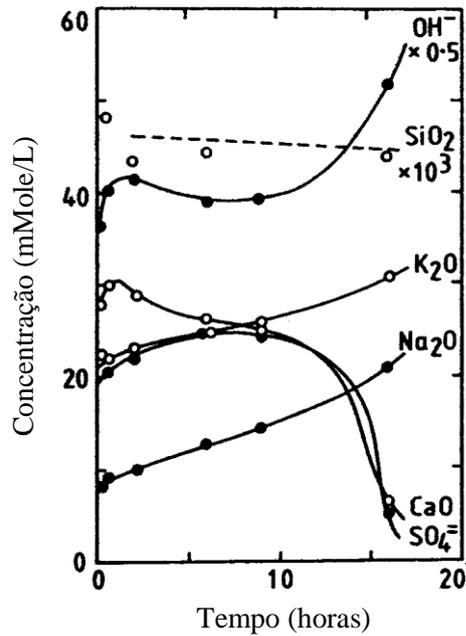


Figura 2: Concentração na solução de poros de uma pasta de cimento Portland com relação água/cimento de 0,5 (adaptado de TAYLOR, 1997)

Quando a parte anidra passa a ser hidratada por fenômenos de difusão, a presença de partículas finas minerais facilita o processo (figura 3).

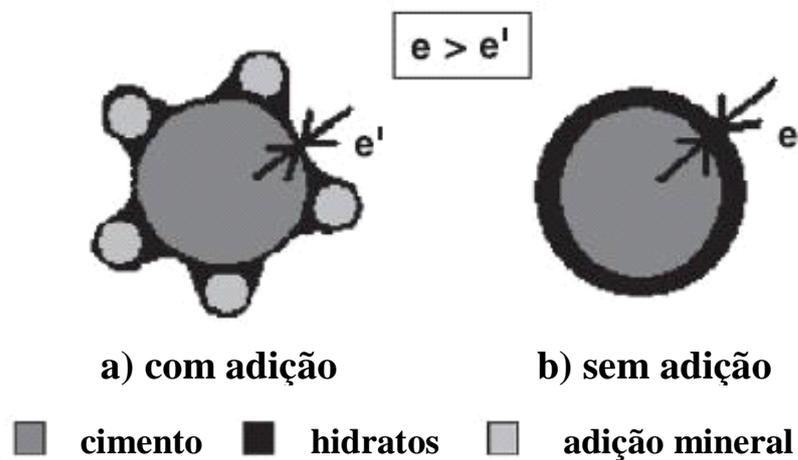


Figura 3: Representação esquemática da hipótese de melhoramento da hidratação do cimento Portland pela incorporação de adição mineral (adaptado de LAWRENCE *et al.* 2003)

Conseqüentemente, se as partículas minerais são suficientemente finas e próximas dos grãos de cimento, então isso pode levar a um melhoramento da hidratação do cimento Portland.

O autor explica o fato afirmando que a nucleação heterogênea é um processo físico que leva a uma ativação química da hidratação do cimento Portland. A nucleação dos hidratos por outras partículas minerais pode catalisar o processo de nucleação por redução da barreira de energia relativa ao grão de cimento.

Qualitativamente, segundo STUMM (1990), fundamentando a afirmação de LAWRENCE *et al.* (2003), se a superfície do substrato sólido (adição mineral) combina bem com o cristal (produto hidratado), a energia interfacial entre os dois sólidos é menor do que a energia interfacial entre o cristal e a solução líquida, e, dessa forma, a nucleação poderá ocorrer sobre a superfície de um substrato sólido com uma relação de saturação menor do que na solução de poro.

O estudo de LANGAN *et al.* (2002) já apresentava resultados que verificaram as afirmações de LAWRENCE *et al.* (2003), mas preveniam para o caso de se utilizar um material mineral reativo pozolânico. Segundo os autores, quando cinza volante foi utilizada em pastas binárias com cimento Portland, houve uma redução de  $\text{Ca}^{2+}$ . Esse fato foi atribuído ao consumo por parte da cinza volante – reação pozolânica. Sugere-se que a cinza volante agiu como um fixador de  $\text{Ca}^{2+}$  removendo os íons da solução. Esse fato reduziu a concentração de Ca nas primeiras horas e atrasou a nucleação e cristalização do C-S-H e do  $\text{Ca(OH)}_2$ , retardando a hidratação.

A reação pozolânica desenvolve-se lentamente, manifestando-se essencialmente após 28 dias. A presença de cinzas volantes modifica a hidratação do clínquer na medida em que:

- agem na cinética de hidratação;
- diluem e consomem a portlandita pela reação pozolânica;
- modificam a composição dos hidratos do clínquer e produzem seus próprios hidratos.

A cinética da reação pozolânica das cinzas volantes depende de vários fatores (área específica, composição, inclusão de fatores cristalinos na fase vítrea, teor de álcalis e de sulfatos etc.).

### **2.1.1 Caracterização dos tempos de início e fim de pega**

Para melhor compreender a cinética de hidratação do cimento Portland no concreto fresco faz-se necessário explorar o intervalo entre o tempo de início e fim de pega que terão influência significativa na fenomenologia de retração plástica.

É importante frisar que as propriedades reológicas, ou de consistência, de uma pasta fresca de cimento Portland dependem da relação água/cimento, da finura dos grãos do cimento Portland e de sua composição.

Entende-se por pega um processo no qual a pasta de cimento Portland – e por conseguinte o concreto produzido – é convertida em um material rígido que perdeu sua deformabilidade, passando a resistir a esforços externos suficientes para comportar-se como um sólido. Essa mudança no material reflete-se e caracteriza-se por uma mudança brusca da viscosidade aparente. Essa mudança de viscosidade não é a mesma que ocorre no material alguns minutos após a mistura dos constituintes, em que ocorre uma flocculação das partículas de cimento Portland, ocasionando um aumento da viscosidade da pasta e, assim, do concreto.

Junto com a flocculação logo após a mistura, o aumento de viscosidade aparente ocorre devido à hidratação progressiva do cimento Portland, algumas horas depois da hidratação inicial, resultando em um aumento gradual da relação sólido/líquido. Dessa forma, acontece o enrijecimento da superfície das partículas de cimento hidratadas levando à precipitação dos hidratos então formados. Como a quantidade de material hidratado aumenta, o número de contatos entre as partículas também aumenta e então surge uma rede tridimensional contínua de material sólido, caracterizando o tempo de início de pega. Com o progresso sistemático do processo descrito, o material cimentício passa do estado fresco para o estado endurecido, quando então já possui rigidez suficiente para ser considerado como uma matéria sólida (LEA, 2004).

BRANDŠTETR *et al.* (2001) comentam a relevância da possibilidade de estimativa do tempo de início de pega por medidas calorimétricas, pois o início da pega coincide com a retomada do processo de hidratação, com o início do período de aceleração pós-indução, caracterizando, pelo ensaio de calor, o início da evolução da produção de C-S-H e etringita.

Os autores comentam que a medição de calor para esta consideração é mais interessante pelo método do calorímetro semi-adiabático, uma vez que, através das curvas resultantes da medição de temperatura da amostra, é possível verificar o curso da evolução das reações imediatamente após a mistura dos componentes sob condições específicas.

Os autores realizaram ainda a confirmação do início de pega utilizando-se o método da agulha de Vicat para as pastas de cimento, em que os dados corroboraram perfeitamente os resultados da calorimetria (BRANDŠTETR *et al.*, 2001)

Utilizando um calorímetro semi-adiabático, tipo de Langavant, HAMMER *et al.* (2007) deduziram o tempo de início de pega de um ponto da curva de evolução de calor do concreto, em que a evolução de calor atingiu 12 kJ por quilo de cimento Portland.

Já CUSSON e HOOGEVEEN (2005) e CUSSON e HOOGEVEEN (2007) utilizaram o método proposto por MINDESS *et al.* (2002) que considera o tempo de início de pega com o momento do ensaio de calorimetria em que a taxa de evolução da temperatura inicia um crescimento agudo, logo após o período de dormência. E, depois disso, quando se atinge um pico na mesma curva, se dá o tempo de fim de pega.

Durante o período de dormência, a taxa de evolução da temperatura do concreto é igual a zero. Após algumas horas, essa taxa começa a elevar-se linearmente, o que significa que a hidratação do cimento Portland reinicia as reações e ocorre o tempo de início de pega, como anteriormente explicado (CUSSON e HOOGEVEEN, 2007).

## **2.1.2 Considerações sobre calorimetria da hidratação do cimento**

### **Portland**

As reações de hidratação do cimento Portland são essencialmente exotérmicas. Como já comentado, a quantidade de calor gerado fornece informações bastante interessantes sobre as reações químicas que ocorrem no processo de hidratação.

Para a medição da quantidade de calor numa amostra de um material à base de cimento Portland, normalmente se opta por um de três métodos de ensaio (TAYLOR, 1997; LEA, 2004):

- calor de dissolução, que mede a quantidade de calor do cimento hidratado e de um ainda não hidratado, em uma determinada idade, pela diferença dos valores resultantes da mistura do cimento – novo e antigo – com ácido nítrico e ácido fluorídrico. Essa diferença revela o quanto de calor foi gerado de hidratação do cimento na idade em estudo;
- calorimetria semi-adiabática, que mede o desenvolvimento da temperatura, e por transformação matemática, do calor gerado, da amostra colocada em um recipiente fechado, isolado e mantido num ambiente de temperatura controlada. Nesse método não se evita a perda de calor, mesmo que se restrinja ao máximo;
- calorimetria de condução, ou isotérmica, que possibilita a medição do fluxo de calor, ou taxa de evolução de calor liberado, na hidratação do cimento. O calorímetro de ensaio é

colocado dentro de um banho com temperatura controlada e uma célula de condução leva o calor gerado pela amostra no calorímetro para o banho.

Considerando alguns aparatos de medição simplificada do calor de hidratação de concreto, pode-se citar a pesquisa de JUVAS *et al.* (2001), publicada pelo Nordest NT BUILD 388, que consiste em uma caixa de 250x250x250 mm<sup>3</sup> feita com um material isolante (poliestireno expandido) com uma cavidade para a moldagem da amostra recém produzida (figura 4). A temperatura da amostra e da redondeza são medidas com um transdutor tipo termopar, conectado ao computador.

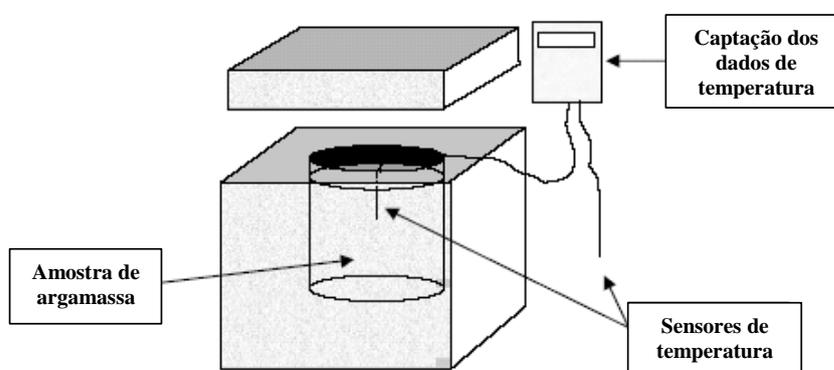


Figura 4: Apresentação esquemática de um calorímetro semi-adiabático (adaptado de JUVAS *et al.*, 2001)

BAI e WILD (2002) apresentam um sistema semelhante ao apresentado anteriormente, em que foi usado um molde cúbico de madeira compensada, que foi completamente revestido por uma camada de poliestireno expandido de 100 mm dentro de outro molde cúbico de madeira compensada de 400 mm (figura 5). Esse método é um tipo de calorímetro semi-adiabático de Langavant que foi usado por FRÍAS *et al.* (2000).

Segundo o escopo da recomendação técnica RILEM TC 119-TCE1: Calorímetro adiabático e semi-adiabático para determinação do aumento de temperatura no concreto devido ao calor de hidratação do cimento (1997), um dos fatores mais importantes associados com a fissuração térmica em concreto (podendo ser originada no estado fresco por retração plástica) é a evolução e distribuição de aumento de temperatura numa seção em qualquer tempo após a moldagem.

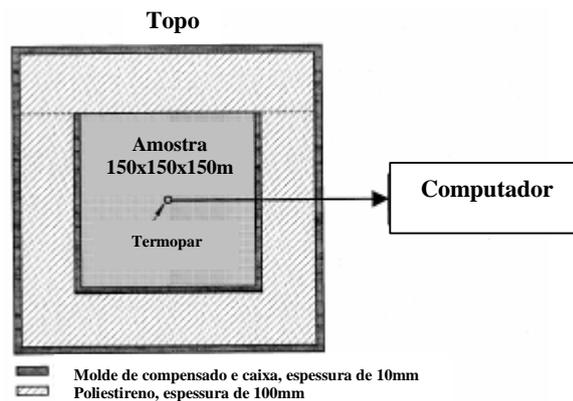


Figura 5: Diagrama esquemático do aparato de ensaio (adaptado de BAI e WILD, 2002)

Um dado importante para a obtenção dos parâmetros de calorimetria é a capacidade térmica da amostra. O documento do RILEM, quando trata da determinação da capacidade térmica da amostra de concreto, ressalta que os valores experimentais não são melhores do que os valores calculados, obtidos de um conhecimento da composição do concreto e dos valores do calor específico dos componentes. O cálculo da capacidade térmica  $C_s$ , em J/K, da amostra pode ser feito pela equação 1:

$$C_s = m_s \cdot \sum(g_i \cdot c_i) \quad (1)$$

Onde,

$m_s$ : massa da amostra, em kg

$g_i$ : proporção relativa do constituinte na massa da amostra, em kg/kg

$c_i$ : calor específico do constituinte, em kJ/kg.K

Um dado importante destacado por LAWRENCE *et al.* (2003) é a possibilidade de calcular o grau de hidratação da amostra de cimento Portland a partir do parâmetro da quantidade de calor obtido através do ensaio de calorimetria em um determinado tempo. Os autores definem o grau de hidratação do material em um determinado tempo,  $\alpha(t)$  em %, através da relação do calor envolvido no ensaio,  $Q(t)$  em J/g de cimento, e o calor total teórico de hidratação do cimento Portland,  $Q_\infty$  em J/g de cimento.

$$\alpha(t) = \frac{Q_{\max}}{Q_{\infty}} \quad (2)$$

Sendo,

$$Q_{\infty} = \Sigma(m_i \cdot Q_i) \quad (3)$$

Onde,

$m_i$ : é a quantidade do composto do cimento Portland considerado, em %, calculado pela fórmula de Bogue ou por ensaio de difração de raios-X

$Q_i$ : é o calor de hidratação dos compostos separados quando hidratados totalmente, J/g de composto

Segundo LEA (2004), os valores de  $Q_i$  para os principais compostos do cimento Portland são:  $C_3S = 510$  J/g,  $C_2S = 260$  J/g,  $C_3A = 1100$  J/g,  $C_4AF = 410$  J/g.

## ***2.2 Retração Plástica do Concreto***

### **2.2.1 Considerações iniciais**

Há uma diferença entre os volumes inicial e final de um concreto. Essa diferença é devida à perda de água mais a variação de volume em função das reações químicas. Tão logo as reações químicas de hidratação do cimento Portland iniciam, um processo de mudança volumétrica começa a ocorrer. Na figura 6, encontra-se esquematizada a mudança volumétrica que ocorre entre o início do processo – contato inicial do cimento com água – e o final do estado fresco no tempo de fim de pega.

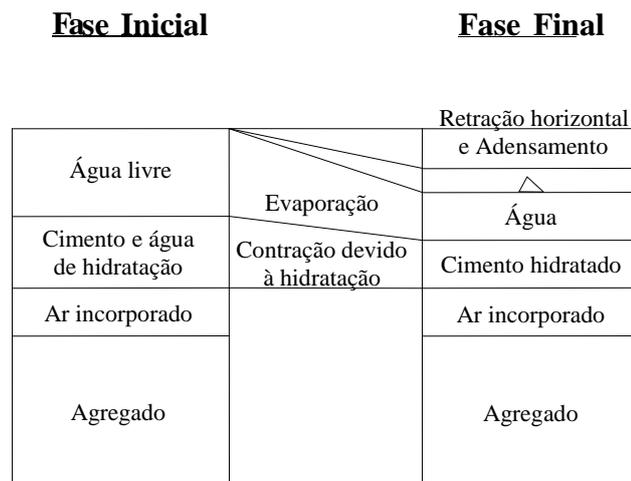


Figura 6: Esquema da mudança volumétrica ocorrida em um concreto nas primeiras 24 horas (adaptado de KRONLÖFF *et al.*, 1995)

As mudanças ocorridas nas primeiras 24 horas do concreto, após o contato do cimento e água, referem-se ao adensamento e retração (KRONLÖFF *et al.*, 1995; ESPING, 2007). O adensamento, que provoca uma mudança volumétrica no sentido vertical, diz respeito ao fenômeno de sedimentação das partículas sólidas imersas na água, como é o caso do concreto. A matéria sólida formada pelas partículas de cimento Portland e agregados tende a ocupar níveis cada vez mais próximos da superfície inferior de um elemento de concreto devido à forças gravitacionais (POWERS, 1960; RADOCEA, 1992). Com as partículas sólidas em sedimentação, a água passa a ocupar níveis mais próximos da superfície superior do elemento moldado (MEHTA e MONTEIRO, 2005). Dessa forma, com a saída dessa água que ascende à superfície, o elemento de concreto passa a ter menor dimensão na direção vertical em relação à dimensão inicial antes da moldagem. Esse fenômeno ocorre somente antes de se atingir o tempo de início de pega, isto é, antes da formação da rede capilar inicial (POWERS, 1960).

Após o tempo de início de pega, com o surgimento de um esqueleto sólido ordenado e de um sistema de poros inicial, o mecanismo de controle das possíveis mudanças volumétricas, ou retração total, passa a ser controlado por um conjunto de efeitos interconectados, conforme o organograma da figura 7.

KOVLER e ZHUTOVSKY (2006) explicam que a retração do concreto é uma deformação permanente dependente do tempo, e a sua medição é somente em um ambiente com temperatura constante numa amostra sem carregamento e sem restrição.

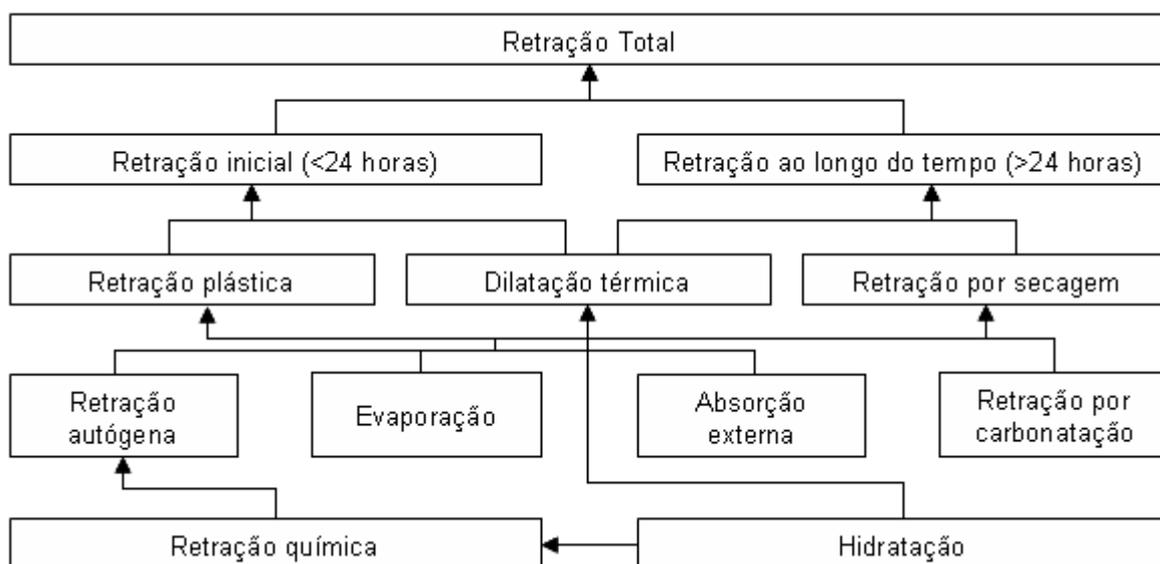


Figura 7: Organograma dos mecanismos de governo da retração total

Há dois principais fatores que provocam a retração plástica nas primeiras idades do concreto (BARCELO *et al.*, 1999): retração por evaporação, relativa à perda de água do concreto no estado fresco; e retração por reações químicas e hidratação, que resulta em retração autógena e/ou retração química.

A retração conhecida como química refere-se à redução volumétrica devido às reações do cimento Portland ou aglomerante com a água, em que o volume final da mistura é menor do que o volume inicial considerando-se os volumes individuais dos constituintes.

Já a retração autógena é uma retração do volume externo do elemento de concreto moldado, sem restrição, que ocorre em condições isotérmicas, isto é, sem diferencial de temperatura, em que a amostra (elemento) está selada sem que haja possibilidade de perda de água do interior do concreto, ou seja, sem troca de matéria alguma com o ambiente como, por exemplo, a evaporação da água ascendida por exsudação. Ela se origina da retração química com envolvimento do efeito da restrição interna da estrutura de sólidos – agregados – e da contração dos poros capilares vazios.

Caso o elemento moldado de concreto não seja isolado, permitindo a perda da água que sobe à superfície por exsudação, é conveniente que a retração que se esteja medindo seja considerada retração plástica por secagem, ou simplesmente retração plástica.

O mecanismo da retração plástica pode ser entendido como uma relação tensão-deformação, a qual surge da ação de um tipo particular de esforço na superfície de um material plástico, a taxa

de carregamento é determinada não somente pelas condições climáticas em torno do material, mas também por suas propriedades físicas (RADOCEA, 1992).

Segundo alguns autores, há uma consideração de análise do concreto, dentro das primeiras 24 horas, bastante pertinente para o entendimento da retração plástica (HOLT, 2001; MEHTA e MONTEIRO, 2005; ESPING e LÖFGREN, 2005).

Afirma-se que o concreto atravessa 3 fases de estruturação interna distintas, segundo a figura 8:

- a) fase plástica: estado em que o concreto possui comportamento visco-elástico e ainda é trabalhável, antes de atingir o tempo de início de pega;
- b) fase semiplástica: ocorre após o início da pega, com o concreto começando a formar o esqueleto sólido auto-portante, numa fase de transição do fluido para o rígido;
- c) fase rígida: após o fim de pega, com o desenvolvimento da resistência mecânica e a continuidade da hidratação.

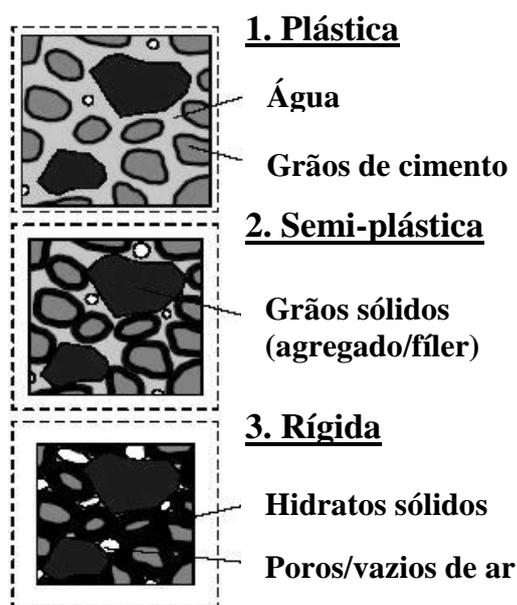


Figura 8: Ilustração do desenvolvimento estrutural da microestrutura do concreto (adaptado de ESPING, 2007)

Dessa forma, o termo retração plástica refere-se às fases a e b, até o fim da pega (NEVILLE, 1981; HOLT, 2001; MINDESS *et al.*, 2002).

HOLT (2001), num estudo com argamassa utilizando um elemento selado e não selado, com dimensões tipo uma laje plana, propõe ainda mais algumas considerações importantes sobre as

fases que transcorrem desde o contato primeiro da água com as partículas de cimento Portland e o tempo de fim de pega. A autora inicia comentando que o ponto, após o estabelecimento do esqueleto sólido inicial, em que o concreto pode suportar os esforços de retração na secagem, é de aproximadamente 2 horas (figura 9).

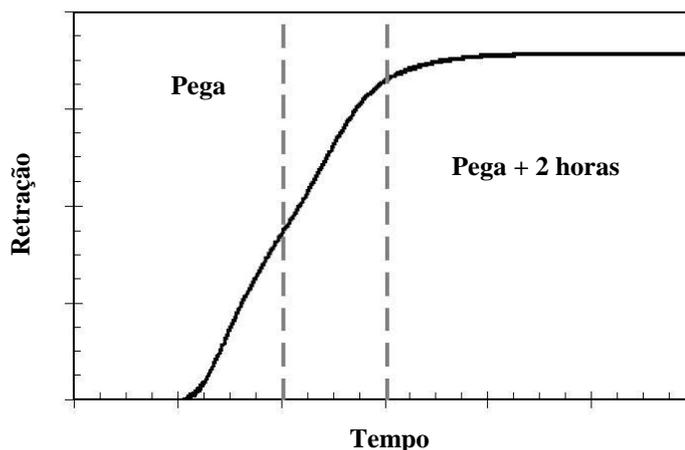


Figura 9: Fim da retração por secagem pelo endurecimento do concreto após o tempo de pega (adaptado de HOLT, 2001)

As fases propostas da retração plástica horizontal medida são:

- estágio inicial (30-90 minutos): há limitação do equipamento utilizado devido às forças que regem o adensamento vertical;
- estágio controlado pela exsudação (90 minutos-4 horas): influenciado por uma possível absorção da água exsudada por uma pequena sucção capilar. Em retração autógena, esse fato causa expansão;
- estágio controlado pela pressão capilar (> 4 horas): após a água exsudada ter sido evaporada ou absorvida, a pressão capilar desenvolve-se, sendo essa pressão a causadora da retração;
- estágio controlado pela temperatura I (5-8 horas): as reações de hidratação do cimento Portland podem ocasionar expansão térmica, sendo esta possível de ultrapassar a retração causada pela pressão capilar, do estágio C;
- estágio controlado pela temperatura II (> 8 horas): com o fim das reações iniciais de hidratação do cimento Portland, há um resfriamento que poderá causar retração.

Em relação ao fenômeno que origina a retração plástica, alguns autores exploraram o tema e hoje se tem um consenso quanto a sua causa fundamental.

É sempre importante ressaltar que a retração que ocorre nas primeiras idades do concreto, seja ela plástica, autógena ou química, ou a combinação entre elas, tem se tornado um problema significativo por tender a provocar o surgimento de fissuras nas estruturas. Algumas condições, tais como redução do diâmetro máximo do agregado, aumento da quantidade de finos incorporados, presença de aditivos químicos que tenham efeito retardador, aumento da quantidade de aglomerantes, deficiência da etapa de cura, contribuem para esse problema.

A fissuração por retração plástica não é uma deficiência física, mas um efeito de uma seqüência complexa de sobreposição de deformações que ocorrem no concreto (ESPING, 2007). Caso a retração não seja uniforme ou se houver restrição, esforços de tração são desenvolvidos, podendo resultar em fissuras, já que o concreto tem ainda baixa resistência.

### **2.2.2 Pressão Capilar**

Segundo WITTMANN (1976), quando a água da superfície do concreto que sobe por exsudação seca devido à evaporação, e sendo a taxa de evaporação maior do que a taxa de transporte da água livre para a superfície por exsudação, o concreto passa a uma condição de superfície seca. Esse fator leva à formação de um complexo sistema de meniscos da água dos poros onde atua a pressão do ar (atmosférica).

Diz-se ser um complexo sistema de meniscos uma vez que o concreto é formado por um sistema de capilares desordenados do ponto de vista de sentido e direção.

Pode-se definir a pressão capilar como sendo a diferença entre a pressão atmosférica que atua acima do menisco formado entre as paredes num poro capilar, devido à tensão superficial entre o líquido e a parede sólida, e a pressão abaixo do menisco do mesmo poro capilar.

Buscando avançar mais eficazmente na definição e monitoramento da pressão capilar, RADOCEA (1992) propõe uma explicação do fenômeno que é aceita hoje pelo meio científico. Ao estudar uma pasta de cimento Portland, o autor afirma que, imediatamente após a moldagem da pasta, as partículas de cimento são mantidas inteiramente no líquido, e a pressão hidráulica<sup>1</sup>  $P_1$ , conforme figura 10, ultrapassa a pressão hidrostática normal  $P_2$ , na mesma profundidade.

---

<sup>1</sup> Pressão hidrostática normal mais a modificação da pressão causada pela presença de sólidos em suspensão.

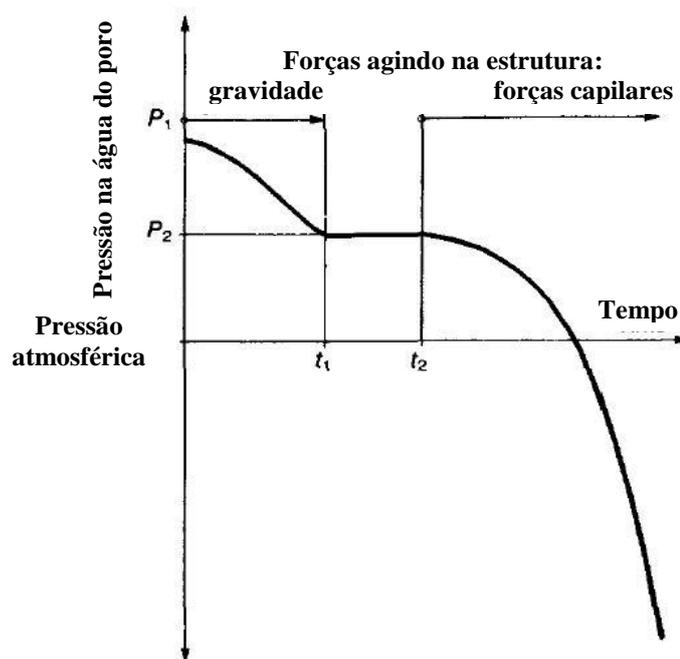


Figura 10: Mudanças na pressão de água de poro numa pasta de cimento fresca moldada (adaptado de RADOCEA, 1992)

Devido à sedimentação dos grãos de cimento, a pressão de água no poro diminui de  $P_1$  para  $P_2$  durante certo período de tempo  $0-t_1$ . A pressão inicial  $P_1$  depende da densidade da pasta e da profundidade do instrumento de medição (RADOCEA, 1992). O tempo total de exsudação é uma função da relação água/cimento e do tipo de cimento Portland. Já a taxa de progresso da pressão durante o período  $0-t_1$  é uma função da velocidade de adensamento das partículas, da qual depende a densidade da mistura (POWERS, 1960; RADOCEA, 1992).

Durante o período  $t_1-t_2$ , quando a superfície da pasta é coberta por uma camada plana de água, nenhuma mudança na pressão capilar ocorre. Atingindo o tempo  $t_2$ , quando a superfície da água perde sua planicidade, a pressão capilar inicia a redução novamente. Os principais fatores que determinam  $t_2$  são a quantidade de exsudação, a taxa de evaporação e as propriedades químicas do cimento (RADOCEA, 1991).

Assim, o aumento na pressão capilar após  $t_2$  é efetivamente a resposta da estrutura quando certa quantidade de água é removida do material. Assim, uma possível aproximação, proposta por RADOCEA, para resolver o problema do mecanismo da retração plástica, é determinar simultaneamente a mudança de volume, a quantidade de água evaporada e a pressão capilar.

No concreto, a água dos meniscos possui, dessa forma, uma curvatura entre as partículas mais próximas da superfície ou do ponto onde a pressão do ar alcance internamente a mistura (figura 11).

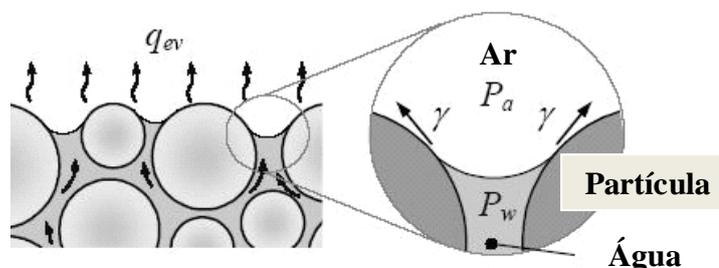


Figura 11: Ilustração da formação dos meniscos entre as partículas próximas da superfície do concreto devido à evaporação (adaptado de ESPING, 2007)

Se a pressão do fluido é menor do lado convexo do menisco, pressão do ar, do que no lado côncavo, pressão da água, então há um surgimento de uma pressão negativa na água do poro. Assim, surgem forças resultantes de contração entre as partículas (POWERS 1960). Conseqüentemente, a distância média entre as partículas tende a ser reduzida e a pasta de cimento contrai, levando à contração todo o elemento de concreto (WITTMANN, 1976). Essas forças capilares de contração são inversamente proporcionais ao raio de curvatura do menisco, e, portanto, o esforço de tensão capilar gerado aumenta com a diminuição do diâmetro dos poros e o espaço entre as partículas (ESPING, 2007). Essas forças resultantes de contração ou forças capilares são também conhecidas como pressão capilar.

Os parâmetros mais significativos que podem levar à diminuição do diâmetro dos poros do concreto e do espaço entre as partículas da mistura e, por conseguinte, a um aumento da pressão capilar são: 1) a redução da relação água/cimento, pois o material se torna mais denso e menos permeável e o transporte interno de água para a superfície é menos eficaz; 2) o aumento do consumo de cimento; 3) o aumento da finura das partículas, também com incorporação de finos (inertes ou não); 4) entre outros.

Sobre a incorporação de finos ao concreto, inertes ou não, e os efeitos que resultam na análise da retração plástica, AL-AMOUDI *et al.* (2004) e AL-AMOUDI *et al.* (2007) comentam que, em relação aos finos, as variáveis consideradas em seus estudos para a influência na retração plástica foram:

- quanto à adição: a superfície específica do fino, no caso a sílica ativa, seu estado de densificação, parâmetro relevante nesse material, e o peso específico ou massa unitária;
- quanto a matriz cimentícia: a geometria dos poros entre os grãos de cimento Portland.

As análises dos autores mostraram que nos concretos onde foram utilizados os finos de sílica a retração plástica apresentou valores de até 70% de aumento, medidas em amostras planas tipo laje, em relação a concretos sem a presença de sílica ativa.

Os mesmos autores ao utilizar a configuração da sílica ativa com maior massa unitária e maior superfície específica, isto é, sílica ativa não densificada, a retração plástica foi maior do que o concreto sem sílica ativa e com sílica ativa tipo densificada.

Já RAVINA (1986), ao utilizar outro fino bastante corrente, a cinza volante, como substituição parcial do cimento Portland, observou que, mesmo com o retardo no início da pega dos concretos pela presença da cinza volante, não foi possível estabelecer uma tendência de elevação ou diminuição da retração plástica em relação ao concreto referência.

É provável que o autor acima tenha desprezado alguma consideração ou algum efeito nos seus ensaios realizados, pois se sabe que todo o retardo no tempo de início de pega possibilita um maior tempo para exsudação e conseqüentemente uma maior retração plástica.

Retomando a análise da figura 11, a pressão capilar é definida pela diferença das pressões no ar ( $P_a$ ), do lado côncavo da superfície, e no lado convexo na água ( $P_w$ ).

A pressão capilar pode ser descrita pela equação de Laplace (equação 4), que relaciona pressão e raio capilar, e pela equação de Kelvin (equação 5), que relaciona pressão e umidade relativa.

$$P_{cap} = \gamma \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) \quad (4)$$

Onde,

$P_{cap}$ : pressão capilar, em Pa

$\gamma$ : tensão superficial do líquido, em N/m

R1, R2: raios médios da curvatura da superfície do líquido, em m

$$P_w = P_a + \frac{RT\rho_w}{M_w} \cdot \ln \varphi \quad (5)$$

Onde,

$P_w$ : pressão da água, em Pa

$P_a$ : pressão do ar, em Pa

$R$ : constante universal dos gases, em J/(mol.K)

$T$ : temperatura, em K

$M_w$ : peso molar de água, em kg/mol

$\rho_w$ : densidade da água, em kg/m<sup>3</sup>

$\varphi$ : umidade relativa, em %

Pode-se considerar pela lei de Laplace, que  $R_1=R_2=r$  [m], e, na lei de Kelvin, que a pressão atmosférica do ar é igual a zero. Dessa forma, as equações (6) e (7), respectivamente de Laplace e de Kelvin, podem ser escritas como:

$$\text{Equação de Laplace: } P_{cap} = \frac{2 \cdot \gamma}{r} \quad (6)$$

$$\text{Equação de Kelvin: } P_{cap} = \frac{RT\rho_w}{M_w} \cdot \ln \varphi \quad (7)$$

A equação de Kelvin mostra que uma pequena variação na umidade relativa interna do concreto, devido à saída de água por exsudação, por exemplo, leva a uma pressão capilar grande (figura 12).

É interessante citar, de acordo com RADOCEA (1992), que, antes da pega, a pressão capilar não consegue ser medida e assume-se valor zero, pois o concreto possui umidade relativa interna igual a 100% e não possui uma rede capilar formada. Porém, segundo ESPING e LÖFGREN (2005), que analisaram concretos de alto-desempenho, ao iniciar a fase de aceleração das reações de hidratação do cimento Portland, inicia-se igualmente uma fase de aceleração ou desenvolvimento acentuado da pressão capilar (pode ser considerada negativa, uma vez que há uma pressão de atração de partículas, ou seja, pressão negativa), para os concretos expostos à secagem. Isso ocorre somente porque há surgimento de poros vazios no sistema.

Por fim, pode-se afirmar que a ação da pressão capilar em concretos é a causa fundamental da retração plástica (WITTMANN, 1976).

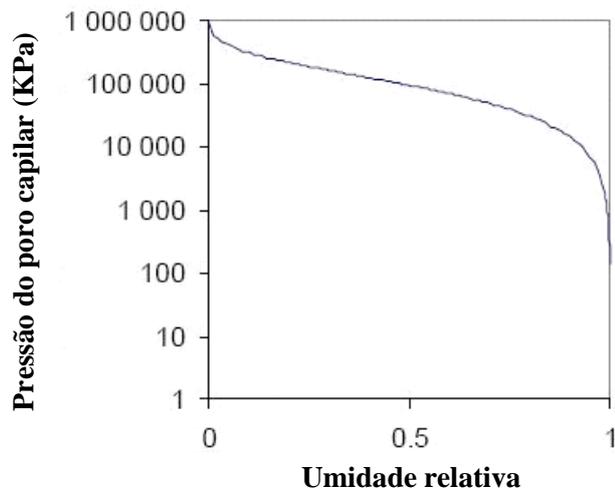


Figura 12: Relação entre umidade relativa e pressão de poro capilar (escala logarítmica), baseada na lei de Kelvin, a 20°C (adaptado de YANG, 2004)

Ao afirmar que a pressão capilar é a causadora direta da retração plástica, faz-se necessário verificar o que pode causar efetivamente a pressão capilar.

### 2.2.3 Exsudação

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2005), exsudação é o fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície de uma mistura cimentícia recém-moldada e compactada, porém antes de atingir o tempo de início de pega. A água é separada por segregação porque os sólidos em suspensão tendem a mover-se para baixo, ocupando níveis menores de altura no elemento, devido à forças gravitacionais. É resultado também da incapacidade de os sólidos reterem água por adsorção superficial.

A exsudação tem um impacto fundamental na durabilidade do concreto, pois, se houver exsudação excessiva, acarretará em enfraquecimento da ligação entre a matriz cimentícia e a superfície abaixo do agregado e induzirá a uma não uniformidade da resistência associada com a não uniformidade da proporção de volume de sólidos (JOSSERAND *et al.*, 2006).

De acordo com RADOCEA (1992), os principais fatores que influenciam as propriedades de exsudação são os mesmos que governam a distância interpartículas e o grau de dispersão das partículas: relação água/cimento, superfície específica dos grãos e forças interpartículas, tanto do cimento Portland como de partículas inertes finas.

Uma curva da quantidade de água perdida por exsudação, que relaciona a quantidade de água que ascende à superfície por unidade de área *versus* o tempo, está normalmente dividida em duas partes (POWERS, 1960; RADOCEA, 1992): uma linha reta que indica uma taxa constante de exsudação, seguida por um período de diminuição de taxa.

Segundo POWERS (1960), a constância da taxa de exsudação mostra que os grãos de cimento permanecem distribuídos discretamente durante o período de dormência, sem mudanças significativas na forma e tamanho. Ele considerou que a massa da pasta é composta de camadas idênticas de partículas que caem através da água em uma taxa constante, que pode ser descrita pela lei de Darcy (equação 8):

$$Q = K \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (8)$$

Onde,

Q: taxa de exsudação, em m/s

K: coeficiente de permeabilidade, em m/s

$\Delta h$ : variação da frente hidráulica, em m

L: espessura do corpo-de-prova, em m

Alem dos parâmetros já comentados, que podem influenciar a perda de água por exsudação, alguns autores exploram pontos convenientes de acordo com a relevância neste trabalho. NEVILLE (1981) ressalta que a presença de alto teor de C<sub>3</sub>A pode influenciar na diminuição da exsudação.

TOPÇU e ELGÜN (2004) afirmam que a quantidade de agregado e o tipo afetam a exsudação, sendo que agregados contendo alta quantidade de finos aumentam a estabilidade da mistura, porém o acréscimo de água para obter a trabalhabilidade poderá aumentar a exsudação, pois, mesmo com o agregado mais fino, a demanda de água pode ter como resultante um excesso de água que não foi possível ficar fixa nos finos incorporados.

Os autores concluíram que: 1) quando se aumenta o consumo de cimento, a exsudação diminui; 2) quando a relação água/cimento aumenta a exsudação aumenta; 3) quando o consumo de água por metro cúbico aumenta, mantendo o mesmo consumo de cimento por metro cúbico e mesma relação água/cimento, a exsudação também aumenta.

Já WAINWRIGHT e AIDER (1995) verificaram que houve redução da capacidade e taxa de exsudação com a diminuição da finura do cimento, ou seja, material mais fino. Eles frisam que seria importante investigar também a forma cristalográfica dos constituintes do cimento Portland, pois esse parâmetro poderia influenciar.

RADOCEA (1992) analisou ainda um método que possibilita a medição da pressão de água, que fornece um real implemento do grau de dispersão das partículas de cimento na água e das propriedades de exsudação da pasta de cimento Portland.

Em pastas, para relação água/cimento normal, somente o tempo total de exsudação pode ser determinado. O autor assumiu que a pasta de cimento é composta de camadas idênticas de partículas que adensam através da água em uma mesma taxa. Essa hipótese, já comentada acima, foi confirmada pelo fato de a pressão relativa em diferentes profundidades ser idêntica.

## **2.2.4 Evaporação**

O ACI propõe, através do ACI Hot Weather Concreting, um ábaco da estimativa da taxa de evaporação da superfície do concreto fresco (figura 13). Esse ábaco é baseado nas fórmulas de Menzel, considerando a evaporação de grandes áreas expostas à secagem (BERHANE, 1984).

A evaporação é um processo no qual um líquido é convertido em vapor ou gás. Isso acontece quando: a) energia térmica é absorvida pelo líquido, por exemplo, por incidência de radiação solar; ou b) quando a pressão de vapor acima da superfície do líquido é menor do que no próprio líquido, permitindo, assim, que as moléculas de água escapem do líquido como vapor.

Os parâmetros de entrada do ábaco do ACI referem-se aos fatores que influenciam diretamente se uma superfície tende a evaporar mais ou menos. São eles: velocidade do vento, incidência de radiação solar, temperatura do ambiente, temperatura da superfície (concreto) e umidade relativa do ambiente.

É provável que a mais significativa delas seja a incidência de ar escoando sobre a superfície do concreto ou velocidade do vento.

UNO (1998) comenta que o processo de evaporação é acelerado se o vento estiver presente para continuamente remover as moléculas de água. A perda de energia da superfície da água evaporada significa que a temperatura da água da superfície diminui, reduzindo, portanto, a velocidade de evaporação.

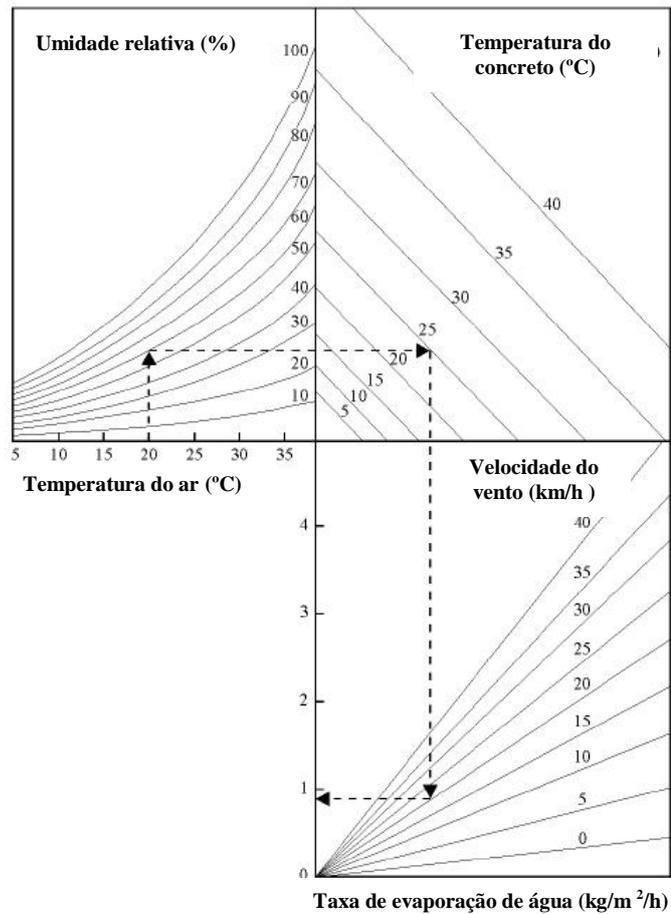


Figura 13: Ábaco do ACI Hot Weather Concreting, baseado na formulação de Menzel (adaptado de ACI 308-R01)

De acordo com a figura 14, considera-se uma condição de escoamento. O ar com velocidade  $U$  e a concentração de vapor de água  $c_\infty$  escoam sobre uma superfície úmida. Se as condições da superfície são tais que a concentração de vapor  $c_0$  na superfície excede  $c_\infty$ , uma transferência convectiva de massa ocorrerá.

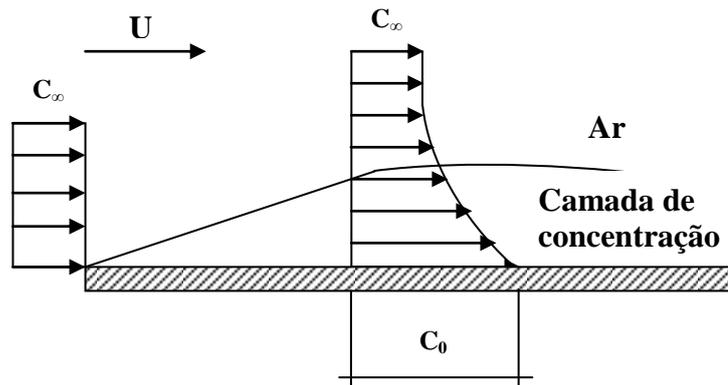


Figura 14: Escoamento de ar sobre uma superfície úmida

A taxa de evaporação  $q_{ev}$ , em  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  pode ser aproximada pela equação 8.

$$q_{ev} = \beta \cdot \Delta c \quad (8)$$

Onde,

$\beta$ : coeficiente médio de transferência convectiva de massa

$\Delta c$ : diferença de concentração, em  $\text{kg/m}^3$

Se a temperatura na superfície for igual à temperatura do ar, a taxa de evaporação pode ser expressa como uma função do gradiente de umidade, equação 9

$$q_{ev} = \beta \cdot c_s \cdot \Delta RH = \beta \cdot c_s \cdot (RH_0 - RH_\infty) = \beta \cdot c_s \cdot (1 - RH_\infty) \quad (9)$$

Onde,

$c_s$ : coeficiente de vapor na saturação, com grande dependência da temperatura, em  $\text{kg/m}^3$

$RH_0$ : umidade relativa inicial, igual a 100%

$RH_\infty$ : umidade relativa no tempo

A determinação do coeficiente de convecção depende de várias propriedades do fluido, tais como, densidade, viscosidade, condição térmica, calor específico, além da geometria da superfície e das condições de escoamento (INCROPERA, 1985).

Um valor aproximado do coeficiente de convecção pode ser calculado usando a equação 10 de LEWIS (1922) *apud* RADOCEA (1992).

$$\beta = \frac{\alpha_c}{\rho_{ar} \cdot C_p} \quad (10)$$

Onde,

$\alpha_c$ : coeficiente de transferência convectiva de calor

$\rho_{ar}$ : densidade do ar, em kg/m<sup>3</sup>

$C_p$ : capacidade de calor do ar, em kJ/kg.K

Para a velocidade do vento menor do que 10m/s, o coeficiente de transferência convectiva de calor pode ser aproximado usando a equação 11 de CLAESSON (1984) *apud* RADOCEA (1992)

$$\alpha_c = 5 + 4.5U - 0.14U^2 \quad (11)$$

Onde,

U: velocidade do vento, em m/s

Assim,

$$q_{ev} = \frac{5 + 4.5U - 0.14U^2}{\rho_{ar} \cdot C_p} \cdot c_s \cdot (1 - RH_{\infty}) \quad (12)$$

Dessa forma, pode ser visto que a velocidade do vento, a umidade relativa e a temperatura são os principais fatores que afetam a taxa de evaporação.

Na prática de experimentos, a taxa de evaporação da superfície de uma amostra é calculada a partir das medições da quantidade de água evaporada  $q_{ev}$  em função do tempo t

$$q_{ev} = \frac{\Delta W}{A \cdot \Delta t} \quad (13)$$

Onde,

$\Delta W$ : massa de água que saiu da amostra, em kg

A: área de superfície da amostra exposta para secagem, em m<sup>2</sup>

A umidade relativa é entendida como a relação da quantidade de umidade presente em uma unidade de volume de ar por uma quantidade de umidade do ar na saturação. Quando a umidade relativa alcança 100%, a evaporação cessa. Quando outras forças, por exemplo, o vento, substitua o ar saturado por ar não saturado, o valor da umidade relativa começa a baixar.

Já para o efeito da temperatura do ar e do concreto, é importante salientar que é a temperatura da água que exsudada na superfície que é significativa para o estabelecimento da diferença de pressão de vapor entre o ar e a superfície de água exsudada. UNO (1998) comenta que há uma dificuldade em medir a temperatura da lâmina de água exsudada na superfície do concreto. Por isso, é conveniente assumir a temperatura da água na superfície como a mesma temperatura do concreto.

McCARTER e SALEH (2001) comentam que o pico da taxa de evaporação se deu quando foi atingida a máxima temperatura no concreto. E BERHANE (1984) mostrou que a mistura com maior temperatura apresentou a maior taxa de evaporação.

Para as considerações da incidência de radiação solar, é conveniente assumir que a radiação afeta todo o ar do ambiente, como também a temperatura do concreto. Para se ter uma ordem de grandeza, para se converter 1 grama de água líquida para vapor é necessário somente 2,5 kJ (540 cal). UNO (1998) cita uma medição, em um dia de verão na Austrália, de energia solar incidente em 1m<sup>2</sup> sendo igual a 20 MJ, ou seja, 8000 vezes maior.

HASANAIN *et al.* (1989) chegaram a reduções de até 50% na taxa de evaporação ao colocar as amostras de concreto abrigadas da radiação solar, para curar à sombra, mantendo a mesma temperatura e umidade relativa.

O ábaco do ACI citado ainda é um instrumento utilizado em trabalhos técnicos de construção, mas para o desenvolvimento científico entrou em desuso. AL-FADHALA e HOVER (2001) comentam a dificuldade na simples aproximação através do ábaco de Menzel:

- o critério de alto risco da taxa de evaporação, na consideração da fissuração por retração plástica, depende da taxa de exsudação. Para concretos de alto-desempenho, há incorporação de finos que podem levar à taxa de exsudação igual a zero;
- o ábaco de Menzel é voltado para uma superfície perfeitamente coberta de água e não para uma superfície porosa como o caso do concreto.

A segunda questão foi levantada após os autores confirmarem experimentalmente que a taxa de perda de água por evaporação de uma superfície de concreto é igual à evaporação de uma bandeja plana com água somente quando a superfície do concreto é coberta com uma lâmina uniforme de água de exsudação.

BERHANE (1984) critica o método do ACI ao expor que a fórmula de Menzel pode não ser aplicável para a estimativa da taxa de evaporação para concreto fresco, em nenhuma condição climática, devido à perda de planicidade bastante comum da lâmina de água na superfície do concreto.

A discussão da fórmula de Menzel exposta por HASANAIN *et al.* (1989) resultou em 3 considerações convenientes:

- o gráfico pode ser aceitável para estágios antes da pega com água exsudada;
- o gráfico subestima a taxa de evaporação para o estágio pós-pega, sem a presença de água de exsudação;
- o gráfico superestima a taxa inicial de evaporação para uma superfície sob a sombra.

Segundo McCARTER e SALEH (2001), após a pega há uma grande dificuldade de perda de água, em comparação com os valores obtidos antes da pega, pois a água permanece na estrutura capilar em formação da pasta endurecida.

Os mesmos autores propõem uma análise da curva da taxa de evaporação ao longo do tempo e a dividem em 3 regiões para o ensaio até 72 horas:

- 1) Período inicial de 0 a 3 horas, no qual a taxa de secagem é constante, aumentando gradualmente para um máximo em 6 horas;
- 2) Período de redução significativa da taxa de secagem entre 6 e 24 horas;
- 3) Período de redução lenta da taxa de secagem até um valor quase constante, em 72 horas.

Exsudação e evaporação estão bastante interligadas. Se a taxa de evaporação da superfície exceder um máximo referencial a perda de umidade pode exceder a taxa de água que ascende à superfície por exsudação. MINDESS *et al.* (2002) apresentam esse valor máximo como sendo  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ .

Sobre a taxa de evaporação máxima, que tende a ocasionar problemas de fissuração por retração plástica, alguns países têm em seus códigos e recomendações valores diferentes, sendo uns mais conservadores que outros. Cita-se, por exemplo, o ACI que recomenda taxa de evaporação máxima de  $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ . No Canadá, esse valor é de  $0,75 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ . A referência australiana é de  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ .

## **2.2.5 Efeito da presença de um superplastificante nos parâmetros da retração plástica de concreto**

A produção de concretos, para modernas técnicas de aplicação estrutural, necessita da presença de um aditivo químico que modifique as propriedades no estado fresco. O aditivo químico mais utilizado é o que permite que parte da água seja reduzida, quando se busca elevação da resistência mecânica, ou que permite uma maior fluidez, modificando a reologia do concreto. Esse grupo de aditivos é conhecido como redutor de água.

Os comentários sobre os aditivos devem ater-se mais aos efeitos dos superplastificantes em concretos e outros materiais cimentícios, já que os concretos dessa pesquisa foram todos produzidos com esse aditivo.

A interação do superplastificante com o cimento Portland inclui 3 modos de ação:

- i) adsorção das moléculas de superplastificante por forças de *Van der Waals* e forças eletrostáticas aos grãos de cimento Portland (COLEPARDI, 1998; YAMADA e HANEHARA, 1999);
- ii) redução da força de atração entre os grãos de cimento Portland com cargas opostas – defloculação –, e indução das forças de repulsão entre as partículas devido às altas cargas negativas dos grãos de cimento Portland pelo superplastificante adsorvido – dispersão (JOLICOEUR e SIMARD, 1998);
- iii) ação estérica entre as moléculas do polímero adsorvido e os grãos de cimento Portland vizinhos (JOLICOEUR e SIMARD, 1998).

Alguns efeitos preocupantes da incorporação dos superplastificantes em concretos, em que a meta é a redução de água da mistura, são: a reduzida taxa de exsudação, a redução do diâmetro dos poros e a alta quantidade de cimento, que resulta em grande quantidade de reações químicas. É consenso que concretos contendo superplastificantes têm reduzido a taxa de exsudação, tornando-se particularmente susceptíveis à fissuração por retração plástica (MINDESS *et al.*, 2002).

Na pesquisa de ESPING e LÖFGREN (2005), em concretos contendo superplastificante foi testada a retração plástica. A presença do aditivo aumentou a magnitude da retração. HOLT (2001) explica que esse efeito ocorre devido à melhor dispersão das partículas de cimento. Outra explicação dada por LURA e JENSEN (2005) é que os agentes químicos do superplastificante podem diminuir a tensão superficial da água da solução do poro, resultando em retardo das reações de hidratação do cimento e, com isso, retardo da pega.

Sobre esse retardo de pega pela diminuição da tensão superficial da água em função da incorporação do aditivo superplastificante, CABRERA *et al.* (1992) ressaltaram que há um retardo também na pressão capilar. O atraso na pressão capilar, se se considerar que atrasa o alcance da máxima pressão capilar, que causa a máxima retração, poderia resultar em uma menor retração plástica.

De acordo com os períodos de mudança da microestrutura propostos por autores já citados, ESPING e LÖFGREN (2005) comentam que a utilização do superplastificante elevou a taxa de retração plástica dos concretos nos períodos plástico e semiplástico. Conforme a figura 15, a elevação da retração plástica nos períodos plástico e semiplástico referem-se a  $d\varepsilon/dt_1$  e  $d\varepsilon/dt_2$ .

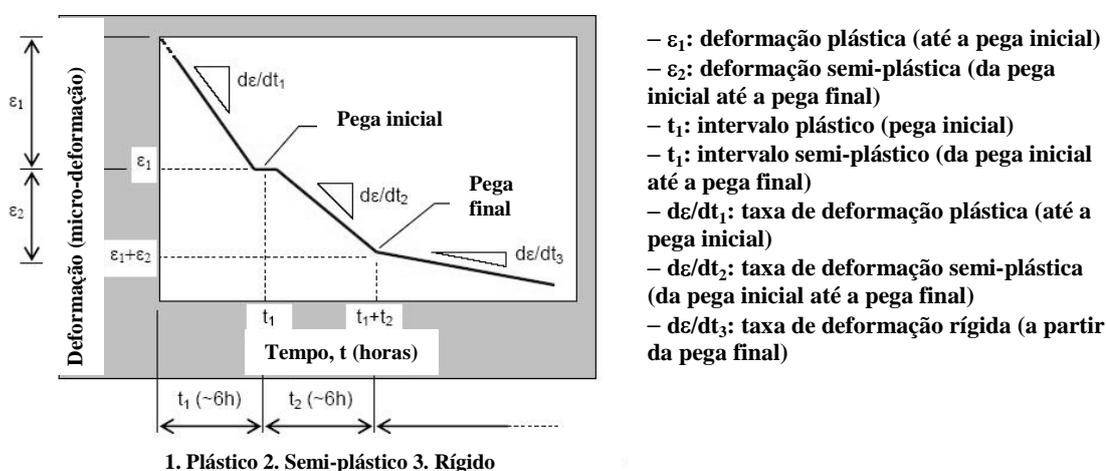


Figura 15: Gráfico das fases de estruturação interna do concreto durante a retração plástica adaptado de ESPING e LÖFGREN, 2005)

Após a pega, o efeito relatado pelos autores foi oposto, com a taxa de retração plástica diminuindo com o aumento do teor de superplastificante ( $d\varepsilon/dt_3$ ).

É interessante verificar também que a presença do aditivo superplastificante elevou o intervalo do período plástico  $t_1$ , e nenhuma mudança no intervalo do período semiplástico  $t_2$  pode ser observada. Isso em virtude de o aditivo superplastificante tender a um retardo na pega do concreto, retardando assim as primeiras reações do período de aceleração da hidratação do cimento Portland (ESPING e LÖFGREN, 2005).

O resultado experimental de HOLT (2001) mostrou um aumento significativo de 78% na retração plástica medida em concreto contendo um aditivo superplastificante em relação a um concreto referência sem aditivo.

Com relação à modificação causada pela incorporação de superplastificante em concreto, na tabela 1, HOLT e LEIVO (2004) mostram seus resultados experimentais em concretos com relação água/cimento 0,45 e superplastificante com base química de melamina.

Tabela 1: Retardo do tempo de pega do concreto com aditivo à base de melamina (HOLT e LEIVO, 2004)

Teor de SP melamina (%)	Tempo de início de pega (h:min)	
	Cimento branco	Cimento Portland
0,0	4:10	3:40
0,5	4:20	3:50
1,0	6:00	4:30
1,5	7:30	5:00

AL-AMOUDI *et al.* (2004) e AL-AMOUDI *et al.* (2007) também verificaram um efeito retardador de alguns aditivos superplastificantes utilizados, no qual o de maior retardo foi o aditivo à base de éter policarboxilato, que será utilizado nesta pesquisa. Os autores comentam ainda que o aumento do tempo antes da pega final tende à elevação do tempo para se atingir a deformação máxima por retração plástica.

Já ATIS (2002) relacionou o retardo causado pelo aditivo superplastificante, no caso da pesquisa do autor um aditivo com base formaldeído, com o atraso para se atingir o pico de temperatura, com maior atraso quanto maior o teor de aditivo superplastificante.

Toda a mudança que se pode medir pelos tempos de pega se consegue visualizar através de alguma modificação nas curvas calorimétricas das amostras consideradas.

Nessa direção, MARSHAK *et al.* (2004) comentam que a análise termocinética, através das curvas de calor, durante a hidratação do cimento Portland, pode ajudar a avaliar a eficiência de um aditivo e sua compatibilidade com o tipo de cimento em questão.

As curvas calorimétricas das reações de hidratação do cimento Portland são similares às curvas de cinética de conversão para reações heterogêneas gerais, conforme apresentado na figura 16.

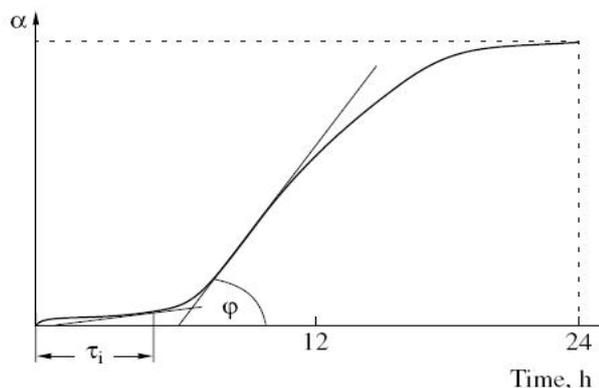


Figura 16: Representação esquemática da cinética de hidratação do cimento Portland, segundo MARSHAK *et al.*, 2004

A cinética de hidratação, pela curva de conversão, pode ser qualificada de acordo com a identificação de 3 parâmetros característicos: tempo de indução  $\tau_i$ , taxa de reação máxima  $\phi$  e conversão em 24 horas  $\alpha$ .

O efeito de um aditivo na mesma curva cinética de hidratação pode ser representado por 3 esquemas com posterior combinação entre eles, conforme a figura 17, proposta por MARSHAK *et al.* (2004), e o critério resultante de eficiência do aditivo entendido, conforme a tabela 2.

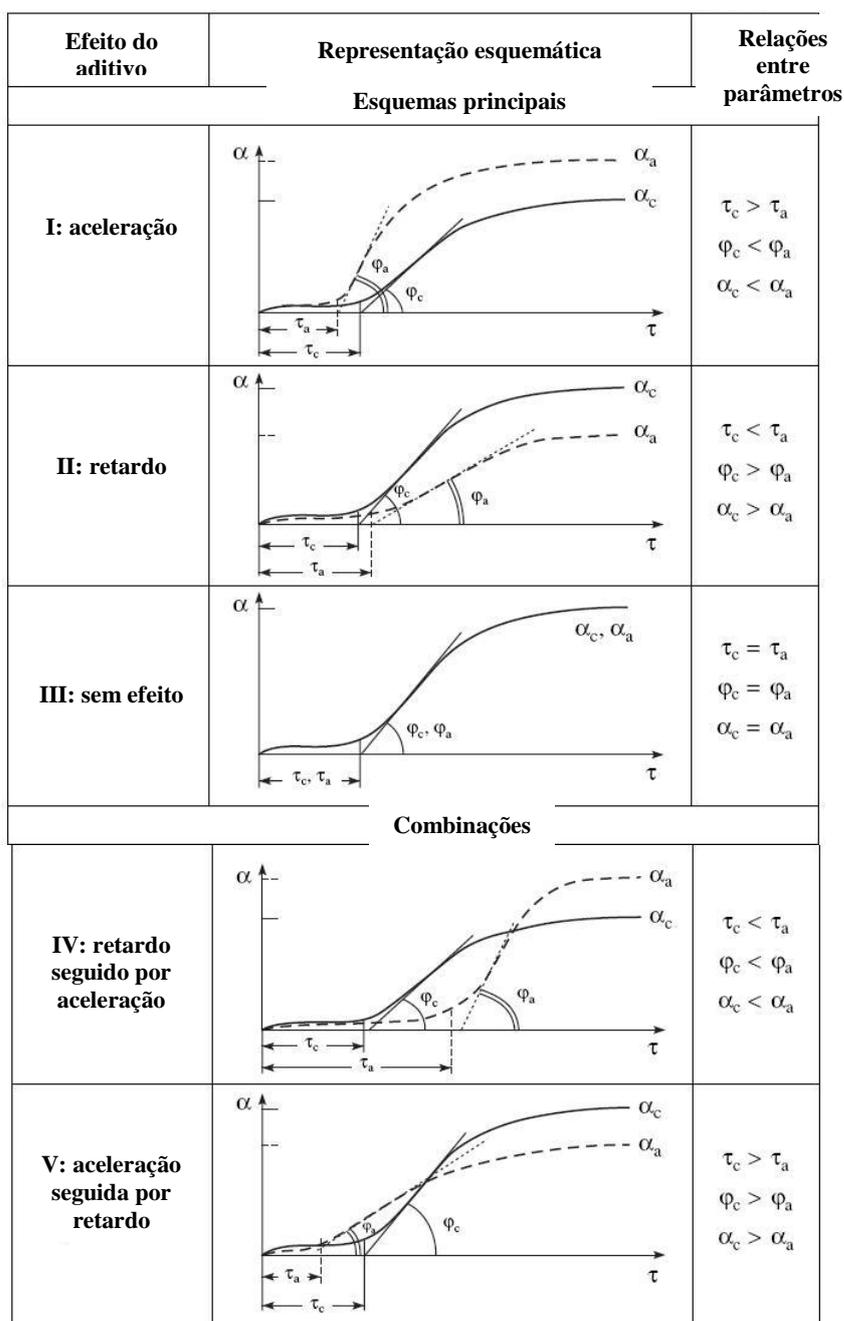


Figura 17: Esquema representativo dos efeitos de aditivos na cinética de hidratação do cimento Portland (adaptado de MARSHAK *et al.*, 2004)

Tabela 2: Critério de eficiência do aditivo (adaptado de MARSHAK *et al.*, 2004)

Critério	Parâmetro	Expressão
Tempo de indução $\tau_i$	$K_\tau$	$K_\tau = \frac{\tau_a}{\tau_c}$
Taxa máxima de reação $\varphi$	$K_\varphi$	$K_\varphi = \frac{\varphi_a}{\varphi_c}$
Conversão $\alpha$	$K_\alpha$	$K_\alpha = \frac{\alpha_a}{\alpha_c}$

Os resultados de BRANDŠTETR *et al.* (2001) indicaram que o superplastificante utilizado apresentou um intenso efeito de retardo. Os autores analisaram a curva de calor e relacionaram o primeiro pico com características endotérmicas, inverso às reações exotérmicas normais do cimento Portland, a adsorção do aditivo superplastificante à superfície dos grãos de cimento, que foi mais evidente com o aumento do teor de aditivo.

ESPING e LÖFGREN (2005) propõem também uma análise da curva de calor obtida do monitoramento de concretos com aditivo superplastificante, conforme a figura 18.

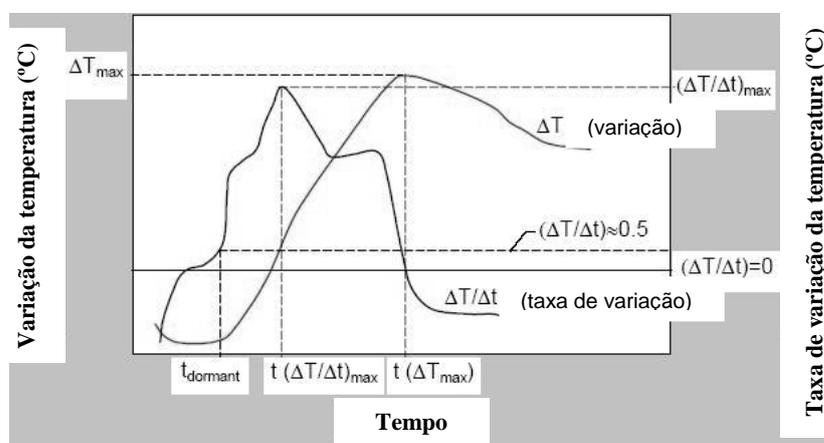


Figura 18: Parâmetros de hidratação das medições de calor (adaptado de ESPING e LÖFGREN, 2005)

Quanto à influência do aditivo superplastificante na evaporação da água da superfície de concretos, os experimentos de ESPING e LÖFGREN (2005), em concretos com diferentes relações água/cimento (0,3-0,6), mas com mesmo consumo de cimento e diferentes teores de superplastificante para cada relação água/cimento estudada, resultaram em maiores quantidades

de evaporação quanto maior foi o teor de superplastificante. Os autores verificaram também um aumento no tempo de início e fim de pega, que influencia indiretamente o aumento da evaporação.

## ***2.3 Utilização de Agregados Recicláveis em Concreto***

### **2.3.1 Considerações iniciais**

No passado, a prática comum para a maioria dos materiais resíduos foi o encaminhamento para deposição em aterros ou lagoas de estabilização. Por causa do aumento dos custos associados com a deposição, regulamentações ambientais das agências governamentais – bem como dos órgãos privados – têm promovido com grande ênfase investimentos no crescimento do número de programas e pesquisas que estudam o desenvolvimento alternativo de métodos para uso ambientalmente seguro dos resíduos e com rentabilidade para o setor (KUMAR *et al.*, 2004).

O concreto é um material que proporciona uma variada gama de possibilidades de modificação de suas características através da utilização de aditivos químicos, adições minerais e também pela incorporação de alguns materiais que podem exercer a mesma função de uma matéria-prima natural.

A incorporação de materiais diferentes dos constituintes naturais comuns pode ser tanto de materiais naturais, passando por materiais sintetizados artificialmente, como, por fim, materiais residuais de processos industriais.

Essa pesquisa tratará de dois desses materiais com potencial possibilidade de reciclagem para incorporação em concretos, no papel de agregados finos ou miúdos: a cinza pesada CZP, e o entulho de obra resíduo de construção e demolição, RCD.

## **2.3.2 A cinza pesada (CZP) como agregado miúdo em concreto**

### **2.3.2.1 Definição**

Como definição, a cinza pesada é um subproduto da queima de carvão mineral pulverizado de usinas termelétricas e de co-geração de energia, consistindo na porção das partículas que são muito pesadas para permanecerem em suspensão com os gases da chaminé. Por isso, a cinza se deposita ao lado das paredes e adensa no fundo da grelha/forno, onde é coletada e transportada para estocagem, após deposição ou uso (GHAFOORI e BUCHOLC, 1997).

Normalmente dois tipos de fornos de carvão pulverizado queimado são utilizados: secos e úmidos. Cada um produz um tipo distinto de cinza pesada: seca ou úmida.

Nos fornos com fundo úmido, a cinza é coletada numa condição líquida pela manutenção da temperatura da escória bem acima da temperatura de fusão. Um orifício preenchido com água é posicionado abaixo do forno para receber a escória fundida. O produto resultante depositado na água é conhecido como cinza pesada, sendo esse material com aparência granular, vítrea e angulosa ou esférica, constituindo-se principalmente de sílica e alumina, podendo ser chamadas de cenosferas, do grego *kenos* (buraco) e *sphaira* (esfera), apresentando grande porosidade inicialmente preenchida com ar ou outros gases (KUMAR *et al.*, 2004; KOLAY e SINGH, 2001; GHAFOORI e BUCHOLC, 1997).

### **2.3.2.2 Características físico-químicas das partículas**

Algumas pesquisas propõem a utilização da cinza pesada como material substituto ao cimento Portland com função de aglomerante. Em virtude da baixa pozolanicidade existente no material, essa hipótese de uso pode ser descartada para quando o material é utilizado *in-natura*.

O estudo de CHERIAF *et al.* (1999) indicou que a atividade pozolânica da cinza pesada pode ser melhorada com uma moagem adequada para utilização como aglomerante e como adição. Os índices de atividade com cimento Portland na medição da resistência, determinados em argamassas padronizadas segundo a normalização europeia ENV 450, atingiu 0,88 aos 28 dias e 0,97 aos 90 dias. Segundo os autores, esses valores permitem a utilização da cinza pesada em concreto como componente aglomerante.

Em pesquisas publicadas recentemente, foram estudadas misturas de cinza pesada, sem moagem, com cimento Portland e também com outros tipos de resíduos, como cinza volante e resíduo de minério de estanho, objetivando o emprego desses materiais recicláveis como aglomerante (KULA *et al.*, 2001; KULA *et al.*, 2002; TARGAN *et al.*, 2002; TARGAN *et al.*, 2003). Os resultados obtidos mostraram que a cinza pesada, sem moagem, com cimento Portland provoca redução na resistência inicial das pastas. Os valores de resistência atingem valores consideráveis somente após 60 dias, atingindo valor comparável com amostras de 100% de cimento Portland na idade de 90 dias.

Mesmo sob essas condições favoráveis, o mais interessante, por não ocasionar custos de refinamento (moagem), é a utilização da cinza pesada como agregado miúdo para concreto. CHERIAF *et al.* (1999) comentando sobre isso expressam que a utilização potencial da cinza pesada é determinada mais pelas suas características físicas, tais como granulometria e forma do grão. A textura normalmente grosseira, fundida e vítrea da cinza pesada a torna um substituto ideal para agregados naturais. Essa textura, visualizada através de micrografia eletrônica de varredura, revela que o material possui uma superfície rugosa, além disso as partículas tendem a ser angulares e porosas. GHAFORI e BUCHOLC (1996) alertam para a questão de a forma irregular e angular com superfície muito porosa demandar grande quantidade de água para obter o grau de lubrificação necessário para a trabalhabilidade da mistura.

Segundo SANTOS (2006), as cinzas pesadas apresentam características higroscópicas marcantes. Num estudo em argamassas de revestimento, o teor de cinzas pesadas em substituição ao agregado natural resultou em um maior conteúdo de umidade absorvido nos poros do material mostrado na figura 19.

SANTOS (2006) explica que o aumento é devido a um aumento da quantidade de microporos ( $\phi < 20 \text{ \AA}$ ) e de mesoporos ( $20 \text{ \AA} < \phi < 500 \text{ \AA}$ ). Isso se dá pela incorporação da cinza pesada devido a sua característica porosa.

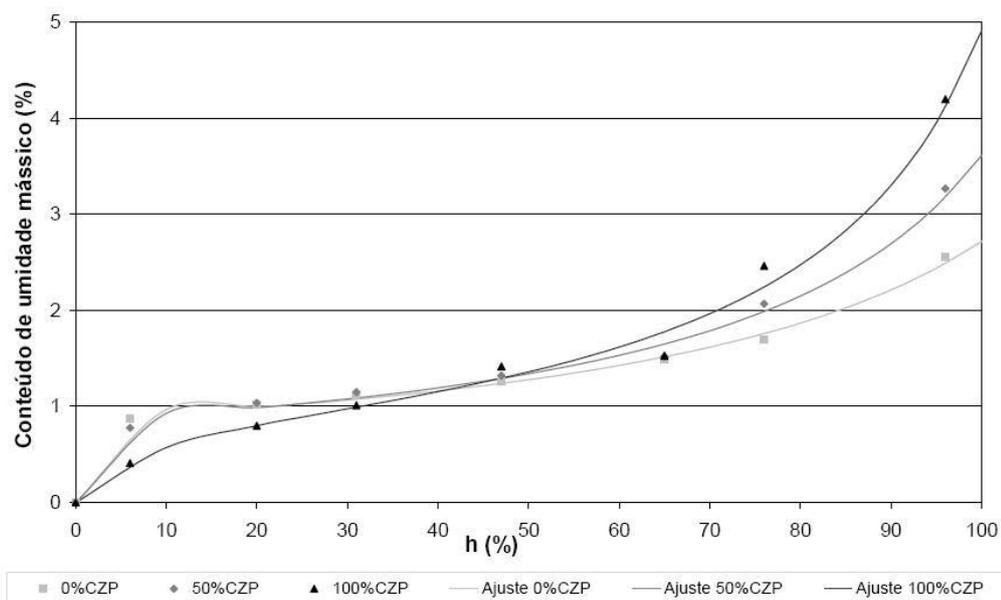


Figura 19: Adsorção de água nas argamassas com cinzas pesadas (SANTOS, 2006)

### 2.3.2.3 Comportamento de concretos utilizando cinzas pesadas como agregado miúdo

Num estudo que abrangeu teores de substituição de agregado miúdo natural por cinza pesada de 50% e 100% na produção de concretos estruturais, GHAFOORI e BUCHOLC (1996) comentam que, quando uma relação água/cimento igual foi utilizada em todos os concretos, os que continham cinza pesada resultaram em misturas mais secas, com menor trabalhabilidade do que o concreto de referência. Isso é atribuído às diferenças na forma dos grãos de cinza pesada (arredondada ou angular), a textura superficial (lisa ou rugosa) e a grande quantidade de finos, como também na dificuldade na determinação da absorção e umidade verdadeira do agregado de cinza pesada.

BAI *et al.* (2005) explicam que a estrutura dos poros das partículas de cinza pesada é considerada a causa de um possível aumento da intensidade de transporte de umidade. Esse fato ficou comprovado já que as propriedades de penetrabilidade de água foram afetadas para teores acima de 30% de substituição de agregado natural por cinza pesada em concretos com resistência à compressão da ordem de 40 MPa a 60 MPa, mesmo que esta não tenha sido afetada significativamente. Porém não é interessante limitar a utilização da cinza pesada somente por esse fato, pois se acredita que a natureza dos poros do agregado tenha um efeito benéfico na

redução da retração do concreto (COLLINS e SANJAYAN, 1999; KOHNO *et al.*, 1999), devido ao efeito da cura interna através de uma lenta liberação de umidade das partículas porosas saturadas (WEBER e REINHARDT, 1997; BENTZ e SNYDER, 1999). Assim, com a estrutura da partícula porosa e uma alta capacidade de absorção, a cinza pesada pode atuar como agente de cura interna operando como reservatório de água em concreto como funcionam outros materiais leves.

Nessa direção, BAI *et al.* (2005) obtiveram resultados em que se observou uma redução na retração por secagem ao longo do tempo, mas também na resistência à compressão, tudo para uma mesma relação água/cimento em relação ao concreto de referência. Já para uma mesma consistência, houve uma equivalência de resistência à compressão entre os concretos com e sem cinzas pesadas, porém um aumento na retração por secagem, sendo maior quanto maior o teor de substituição do agregado miúdo por cinza pesada.

NISNEVICH *et al.* (2001) reforçam a necessidade de uma grande quantidade de água para a consistência comparativamente ao concreto com material natural. A maior quantidade de água é resultado da absorção pela estrutura porosa da cinza pesada e da adsorção pela superfície irregular de seus grãos.

Em relação à influência da cinza pesada nos tempos de início e fim de pega, GHAFUORI e BUCHOLC (1997) e TARGAN *et al.* (2002) concluíram, em seus estudos, que a presença da cinza pesada não afetou significativamente tanto concretos como pastas. GHAFUORI e BUCHOLC (1997) comentam que, como há maior demanda de água, se espera que a alta relação água/cimento influencie os tempos de início e fim de pega. Porém o fato não foi verificado. Os mesmos autores acrescentam ainda que, quando um superplastificante foi usado em mesclas de areia natural e cinza pesada, o tempo de início de pega dos concretos caiu 9% em média.

Com vistas numa maior quantidade de água presente nos concretos com cinzas pesadas buscando ser atingida uma trabalhabilidade especificada, é consenso que haverá maior perda de água por exsudação. Isso foi comprovado nos experimentos de GHAFUORI e BUCHOLC (1997), em que foi observado que houve acréscimo com o aumento do teor de cinzas pesadas no concreto.

GHAFUORI e BUCHOLC (1997) frisaram ainda que, quando um superplastificante foi utilizado em conjunto com uma mescla de areia natural e cinza pesada com mesmos volumes, a exsudação foi reduzida para um valor bem próximo do concreto referência.

GHAFUORI e BUCHOLC (1997) mostram, em ensaios de variação de volume nas primeiras idades, que a incorporação de cinzas pesadas reduziu a retração plástica (aproximadamente 35%

menos em relação ao concreto referência). Os concretos com e sem cinza pesada apresentaram uma tendência semelhante com respeito ao consumo de cimento na retração plástica. Para os concretos com mesclas de areia natural e cinza pesada (mesmo volume de material seco), a ordem de grandeza da retração plástica foi aproximadamente a média da encontrada para os concretos somente com agregados naturais e somente com cinzas pesadas. Isso é explicado devido à taxa de exsudação, a qual também cai para aproximadamente metade comparando-se os dois tipos de matriz, com e sem cinza pesada. Também a utilização de superplastificante modificou os resultados de retração plástica, aumentando para dosagens de concretos de mesclas com agregados naturais e cinzas pesadas.

Como pode ser previsto, devido a um maior consumo de água comandado pelas características físicas e intensidade de absorção, foi observado, em algumas pesquisas, que as propriedades de resistência à compressão dos concretos contendo cinza pesada (substituição parcial ou total) foram menores do que as do concreto referência. Porém, com a evolução do tempo de cura, a resistência à compressão dos concretos contendo cinzas pesadas se aproximou dos valores obtidos no concreto referência (GHAFOORI e BUCHOLC, 1997; NISNEVICH *et al.*, 2003).

Quando for o caso de considerar a resistência do agregado, é recomendada, para a produção de concretos com cinzas pesadas, a formação de uma estrutura mais densa e mais resistente da pasta para compensar a baixa resistência da cinza pesada porosa (NISNEVICH *et al.*, 2003).

E, sendo assim, o módulo de elasticidade também ficará comprometido pela alta deformabilidade da fase agregado. Em relação a isso, GHAFOORI e BUCHOLC (1997) explicam que o valor mais elevado do módulo de elasticidade obtido pelo concreto de referência é devido à porosidade reduzida, ao aumento do módulo de elasticidade da pasta devido à menor relação água/cimento, e principalmente a maior massa específica e rigidez do agregado natural.

Dessa forma, alerta NISNEVICH (1997) para a possibilidade do aumento da resistência do concreto leve com agregados porosos através da utilização de uma pasta de cimento de alta resistência. Nesse caso, áreas de concentração de deformação podem ser observadas nos agregados, nos quais o módulo de elasticidade é menor do que o módulo da pasta de cimento. Ou seja, a concentração de deformação leva à formação de microfissuras por processos de carregamento, que então levam ao desenvolvimento de fissuras de maior ordem de grandeza.

#### **2.3.2.4 Considerações sobre agregado poroso em concreto**

Numa crescente investida científica e tecnológica para o desenvolvimento de conhecimentos e conceituações teóricas da atuação de materiais recicláveis em bases cimentícias, a incorporação de agregados porosos, leves ou não, em concretos é fonte de um rico avanço nessa área. Por possuírem propriedade de absorção de líquido, os agregados recicláveis de significativa porosidade são fontes para estudos da sua influência em concretos do ponto de vista das propriedades de transporte.

A crescente carência de fontes de matérias-primas naturais tem feito com que a exploração de novos materiais para uso como componente do concreto ganhe uma maior amplitude científica, tecnológica e cultural. Muitas têm sido as publicações de teses e artigos em congressos e periódicos de pesquisas e estudos de caso sobre o assunto.

No momento atual, são muitos os materiais recicláveis que já estão inseridos no processo de fabricação do concreto ou que possuem potencial para fazer parte como nova tecnologia.

O fato de alguns materiais recicláveis para concreto possuírem características diferenciadas em relação aos materiais naturais frente às propriedades de transporte aumenta o interesse científico e a necessidade tecnológica para desenvolvimentos com visão prática para utilização como agregados porosos, leves ou não.

De acordo com o *Concrete Information do PCA (1972) – Structural Lightweight Concrete*, agregados leves para concretos estruturais são materiais que possibilitam a produção de concretos com massa específica menor do que aproximadamente  $1850 \text{ kg/m}^3$ , e possuem absorção de água entre 5% e 20%. Agregados normais geralmente absorvem de 1% a 2% de água por massa de agregado seco. Estes normalmente contêm alguma umidade no interior do processo de amostragem e absorvem muito pouca água durante as operações de mistura. A quantidade de água requerida pode ser ajustada facilmente para compensar a absorção no concreto fabricado com agregado normal.

Em contraste com isso, agregados leves podem absorver grande percentual de água em relação à massa de agregado seco, dependendo da estrutura dos poros, baseado no ensaio de absorção por 24 horas.

A retenção de água, conforme a figura 20, pode ser definida como a água necessária para preencher completamente os poros abertos do agregado poroso e completar as irregularidades da superfície da partícula sob condições normais de gravidade (KASEMCHASIRI e TANGTERMSIRIKUL, 2007).

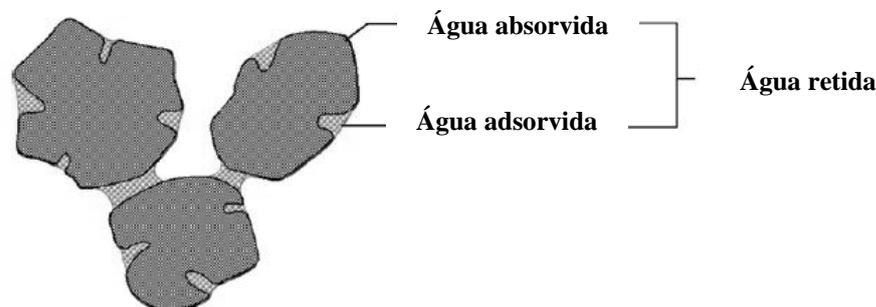


Figura 20: Composição da água retida de um agregado poroso

Sobre as considerações teóricas da incorporação de agregados leves em concretos, WEBER (1999) comenta que a idéia principal é criar no concreto um meio de fornecimento de água que seja independente do meio ambiente, que ofereça continuidade à hidratação do cimento e para equilibrar a umidade relativa na pasta de cimento durante a secagem e o endurecimento. Agregados leves podem estocar uma grande quantidade de água. Sua distribuição uniforme na pasta de cimento e um transporte contínuo da água do agregado leve para a pasta de cimento transforma cada grão de agregado leve em um fornecedor de água para o concreto.

Com o endurecimento do concreto, ocorrem, na pasta de cimento, a formação e o desenvolvimento do sistema de poros. Os raios desses poros são menores do que os raios dos poros dos agregados leves, gerando assim um meio para o aparecimento de um gradiente de umidade. As forças capilares da pasta de cimento são suficientes para absorver a água dos grãos de agregados leves e transportá-la para a pasta de cimento onde a reação com o cimento não hidratado pode ocorrer.

Como as forças de sucção nos poros capilares são inversamente proporcionais ao quadrado do raio, poros capilares menores da pasta de cimento possuem forças de sucção maiores nos menores poros. Assim, a diferença na pressão (como condição para transporte de água do agregado leve para a pasta de cimento) surge. Essa cinética cessa quando a umidade relativa no agregado leve e na pasta de cimento atingem o equilíbrio. Esse tempo de fornecimento de água é dado pelo intervalo entre o início da saída de água no estado líquido e o fim da saída de vapor, com taxas mais altas nas menores idades do concreto e mais baixas em idades mais avançadas.

Agregados pré-umidificados, mas não saturados, são geralmente utilizados para controlar a uniformidade do concreto com agregados leves. A uniformidade do concreto depende da

uniformidade da umidade dos agregados. A pré-umidificação deve ser feita no mínimo 24 horas antes da mistura para permitir tempo para a umidade se distribuir uniformemente no agregado.

É interessante notar que um agregado leve inicialmente úmido normalmente contém mais água absorvida total após um tempo de imersão curto em água do que um agregado leve seco imerso no mesmo intervalo de tempo. A provável razão para isso é que uma quantidade pequena de água, que somente umidifica uma partícula de agregado, não permanece nos poros superficiais, mas migra por difusão para dentro e preenche os pequenos poros internos (NEVILLE, 1981). De acordo com HANSON *apud* NEVILLE (1981), esse fenômeno permite que os poros superficiais maiores sejam preenchidos com água assim que, na imersão, esses sejam abertos para um influxo de água quase tão grande quanto quando o agregado não contém nenhuma água absorvida.

NIEDZWIEDZKA (2005) explica que a microestrutura das camadas da superfície da estrutura do concreto com agregados porosos não é muito bem determinada. Sabe-se que essas camadas são feitas na sua maioria de pasta de cimento (WEBER e REINHARDT, 1997), e que sua porosidade é maior do que a porosidade de outras regiões da estrutura do concreto. Quando o concreto fresco é exposto ao ar, a água evapora. Isso resulta numa considerável redução de resistência à compressão. Simultaneamente, sistemas formados por microfissuras surgem se não houver uma cura úmida apropriada. Para concretos de alto desempenho, quando a relação água/cimento é baixa e a microestrutura é muito densa, uma cura adequada nas primeiras idades é necessária para que as propriedades previstas do concreto sejam alcançadas.

Segundo VOLKWEIN (1991) *apud* WEBER e REINHARDT (1997), a água dos agregados leves é transportada primeiramente por sucção capilar e a seguir por difusão de vapor e subsequente condensação capilar do agregado leve para a pasta de cimento, contribuindo desse modo para a continuidade da hidratação. Novos produtos de hidratação preenchem os poros ou microfissuras, que devem ter ocorrido por processos de autodessecação. O resultado da utilização de agregados leves pré-umidificados é um concreto que suporta uma cura deficiente. A estrutura da pasta de cimento hidratado é mais compacta e menos microfissuras são observadas.

LURA *et al.* (2001) lembram ainda que não somente a quantidade de água total contida nos agregados leves afeta os processos de cura interna, mas também sua distribuição.

É interessante considerar que há dois tipos de poros nos agregados porosos: 1) poros pequenos isolados, 2) poros grandes conectados, com os agregados graúdos contendo uma grande quantidade de poros do segundo tipo, enquanto nos agregados miúdos o primeiro tipo é o dominante (ZHUTOVSKY *et al.*, 2004).

O relatório e recomendação EUROLIGHTCON (2000), que trata da utilização de agregados porosos em concreto, expõe, sobre o tópico de controle de retração plástica, algumas considerações importantes.

O texto mostra que, quando o agregado poroso não possuir um nível de umidade interna suficiente, os grãos poderão absorver parte de água de mistura após a moldagem (figura 21).

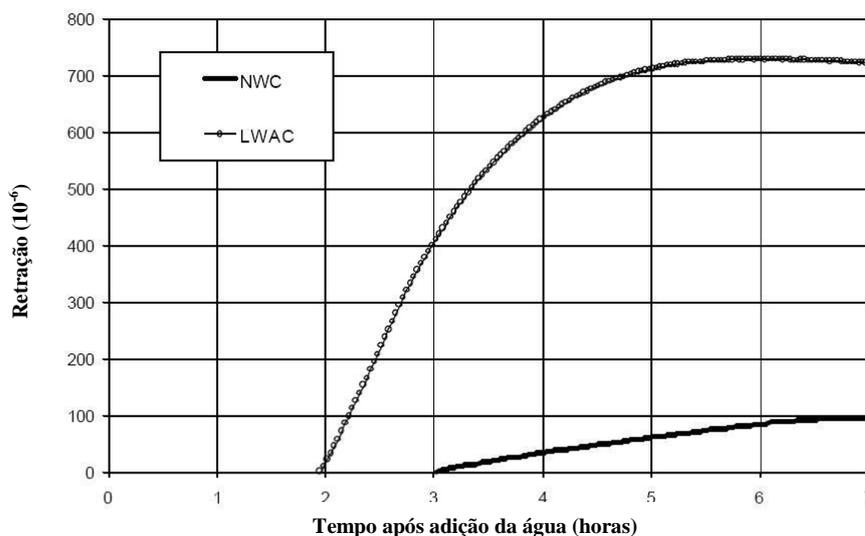


Figura 21: Retração de concreto com (LWA) e sem (NWC) agregados leves (adaptado de EUROLIGHTCON, 2000)

Nota-se que a retração do concreto com agregado poroso inicia mais cedo e atinge um valor máximo de maior magnitude do que o concreto com agregado normal (EUROLIGHTCON, 2000).

Essa absorção pode levar também a uma menor perda de água por exsudação e, assim, aumentar a retração.

Entretanto, se o agregado leve apresentar um sistema com poros grandes, uma parte maior da absorção pode ocorrer durante as etapas de mistura, transporte e adensamento. Com isso, qualquer retração adicional poderá ser desprezada, caso o agregado leve não seja adequadamente umedecido antes da mistura.

O EUROLIGHTCON (2000) salienta muito bem a possibilidade de demonstrar a disponibilidade da água no agregado poroso através de isotermas de adsorção (figura 22).

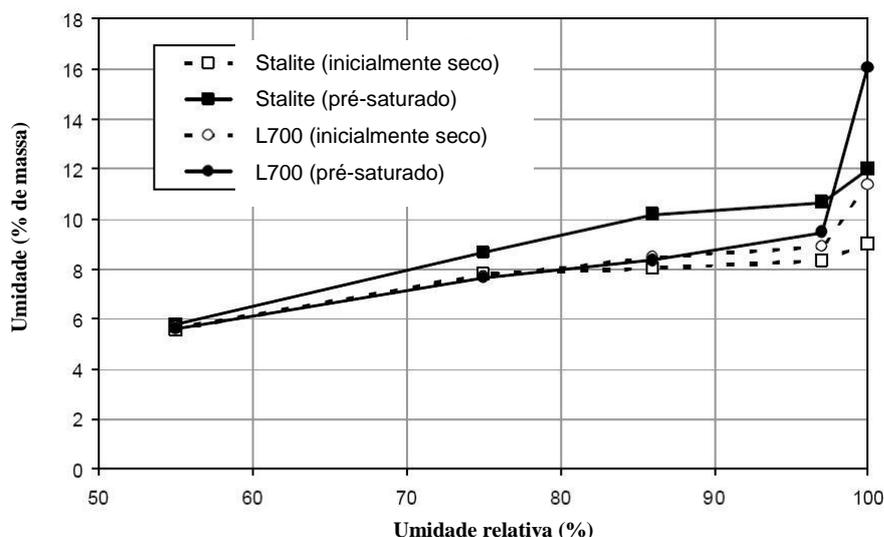


Figura 22: Isotermas de desorção de concretos com agregados porosos em relação ao conteúdo de umidade inicial (adaptado de EUROLIGHTCON, 2000)

Os resultados da figura 22 indicaram que o sistema de poros do agregado poroso tem diâmetro maior do que os poros da pasta de cimento Portland e que uma parte muito grande da umidade do agregado poroso evapora antes de a pasta iniciar a secagem. Dessa forma, a disponibilidade de água no agregado poroso é maior. Contudo, pode haver casos de agregado poroso com sistema de poros menores, que apresentam diferenças no comportamento com menos água disponível (EUROLIGHTCON, 2000).

A utilização de um agregado poroso é uma via bastante interessante para controle ou redução da retração do concreto, como exposto acima.

A recomendação europeia EUROLIGHTCON (2000) apresenta resultados ligados à utilização dos materiais finos como agregados porosos leves para a atenuação ou controle da retração nas primeiras idades. O documento mostra que uma pequena quantidade de partículas de agregado leve poroso fino, em estado de saturação, com um teor de água ao menos correspondente ao volume de poros correspondente à retração teórica do concreto, e estes com permeabilidade suficientemente alta, pode ser suficiente para um controle total da retração no estado fresco de concreto. Porém, como a retração, nas primeiras idades, diminui com o aumento da quantidade de água disponível no sistema de poros, o efeito de reservatório para cura interna, promovido pelo agregado leve poroso fino, pode ser amenizado pela alta demanda de água exigida devido a sua finura.

Em vista desse último ponto apresentado, ZHUTOVSKY *et al.* (2004) reduziram o diâmetro da partícula de agregado leve poroso, utilizada como agente de cura interna, buscando diminuir a proximidade da pasta com o agregado, isto é, a distância para a qual a água de cura interna contida no agregado poroso deverá de deslocar. Essa perspectiva é um avanço para a redução do efeito da elevação na demanda de água pela incorporação do agregado poroso fino, com a conseqüente diminuição do seu efeito de agente de cura interna.

Os resultados de ZHUTOVSKY *et al.* (2004) comprovaram a hipótese apresentada com uma redução benéfica, mas não foi possível tornar o agregado fino poroso totalmente eficaz, resultando em uma pequena perda de eficiência na liberação de água para cura interna.

Os autores explicaram o fato levando em consideração que, com a diminuição da relação água/cimento, há também uma diminuição da permeabilidade interna do concreto que diminuirá a intensidade de trânsito de fluido, e, assim, a propriedade de cura do agregado fino poroso. Contudo, se a distância pasta-agregado diminuir até atingir um ponto chamado crítico, então a diminuição do diâmetro do agregado poroso fino poderá se tornar eficaz com o material, contribuindo efetivamente no controle da retração do concreto (ZHUTOVSKY *et al.*, 2004).

É conveniente ainda considerar que os agregados porosos exercem uma influência no desenvolvimento de calor dos concretos no estado fresco. A elevação da temperatura no concreto com agregado poroso tende a ser maior do que uma mistura sem agregado poroso, pois o agregado leve poroso possui menor capacidade térmica. Esse efeito pode resultar em uma elevação da retração durante o processo de resfriamento do concreto, já no estado endurecido. Por outro lado, a capacidade de isolamento é maior, tendendo a um resfriamento mais lento, que pode equilibrar com o efeito de resfriamento maior em concretos com agregados leves porosos em comparação a concretos sem agregados porosos (EUROLIGHTCON, 2000).

## 2.3.3 O entulho de construção e demolição (RCD) como agregado miúdo em concreto

### 2.3.3.1 Definição

Considerando a geração de resíduos, o impacto ambiental pode ser reduzido por meio de ações mais sustentáveis com a utilização de qualquer resíduo inerte. Também pensando nos resíduos da construção civil, BATAYNEH *et al.* (2007) propõem, para essa categoria, uma organização de classes do resíduo. Bastante difundida é a idéia de manejo do resíduo, buscando reduzir, reutilizar ou reciclar (figura 23), evitando-se até, quando possível, a deposição em aterros.

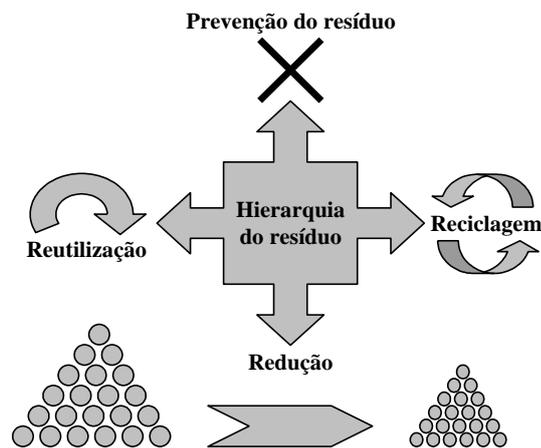


Figura 23: A organização de classes do resíduo (adaptado de BATAYNEH *et al.*, 2007)

O entulho de construção e demolição (C&D) representa um dos componentes de maior quantidade dos resíduos sólidos gerados de atividades urbanas. Os componentes majoritários dos resíduos C&D incluem madeira, concreto, argamassa, cerâmica, asfalto (pavimento e capeamento), parede de gesso, papelão, metal, solo, rocha e vegetação (da limpeza de terreno). Como os resíduos de C&D representam uma porção significativa do fluxo de resíduo, são alvos de políticas de redução e reciclagem. Muitos fatores ditam o sucesso da reciclagem de resíduos

de C&D, incluindo o pagamento das taxas de aterro, a magnitude da atividade C&D ocorrendo em uma área e a viabilidade de mercados para reuso dos componentes do resíduo de C&D<sup>2</sup>.

Segundo BATAYNEH *et al.* (2007), os materiais resíduos de C&D devem ser mantidos em locais limpos e separados, de tal maneira que possam ser utilizados ou reciclados de uma forma eficiente.

Embora alguma separação dos componentes do resíduo de C&D possa ocorrer nos locais da construção e demolição, a maioria dos resíduos de C&D misturados, que são reciclados, são separados e recuperados em centrais de processamento.

A redução dos entulhos pode ser melhorada inicialmente com o estudo dos detalhes de projeto da construção, para garantir o uso eficiente dos materiais, somando-se cuidados de redução, que devem ser aplicados continuamente. BATAYNEH *et al.* (2007) sugerem que a utilização dos resíduos de C&D que possam ser reciclados deve ser considerada desde o projeto inicial da estrutura.

As operações das centrais de processamento utilizam uma combinação de equipamentos mecânicos (transportador de correia, tanques de flutuação, magnetos) e métodos manuais (catação de materiais específicos) para separar o resíduo de C&D misturado para um valor comercialmente reutilizável.

A eficiência do processo de reciclagem do resíduo C&D é fundamental para excluir problemas de variabilidade do produto resultante. A classificação do RILEM COMMITTEE 121-DRG (1994) exalta que uma das maiores dificuldades na reciclagem de resíduos de demolição é a própria variabilidade e a qualidade variável dos agregados reciclados.

HANSEN (1992) comenta que, quando a fonte de agregados reciclados é um centro de reciclagem de resíduos de construção, o entulho pode ser coletado de várias fontes diferentes, ocasionando não uniformidade das propriedades dos agregados.

Para melhor contextualizar, citam-se os códigos que regem a utilização de agregados reciclados de construção e demolição do Rilem e da DIN.

O RILEM (1994) propõe a classificação de agregados graúdos reciclados em 3 categorias:

---

<sup>2</sup> Entende-se aqui, neste trabalho, por entulho de construção e demolição todo e qualquer resíduo mineral inerte composto por mistura de materiais à base de cimento Portland (concretos argamassas, pastas, grautes) e materiais à base de cerâmica (tijolos, telhas, revestimentos). Salvo casos em que o material contiver somente um ou outro resíduo, contudo no texto estará descrita a origem do resíduo utilizado.

- Tipo I: agregados que são originados de entulho de alvenaria;
- Tipo II: agregados que são originados de entulho de concreto;
- Tipo III: agregados constituídos de uma mescla de agregados reciclados e naturais. Sendo um mínimo de 80% de matéria-prima natural e um máximo de 10% de agregado tipo I.

De acordo com a DIN 4226-100 (2000), recomendação alemã para agregados reciclados, os diversos tipos de materiais são definidos como:

- Tipo I: gráudo de concreto/areia de concreto
- Tipo II: gráudo de construção<sup>3</sup>/areia de construção
- Tipo III: gráudo de alvenaria/areia de alvenaria
- Tipo IV: gráudo de mistura/areia de mistura

O Rilem recomenda que, para a aplicação dos agregados reciclados na produção de concretos estruturais, as características dos materiais devem preencher todas as especificações do código, definidas na tabela 3. Os limites da DIN 4226-100 estão mostrados nas tabelas 4 a 6.

Tabela 3: Solicitações exigidas pelo RILEM, referentes aos agregados reciclados

Solicitações necessárias	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Método de ensaio
Densidade mínima da partícula seca (kg/m <sup>3</sup> )	1500	2000	2400	ISO 6783 & 7033
Absorção máxima de água (%)	20	10	3	ISO 6783 & 7033
Quantidade máxima de material com SSS<2200 kg/m <sup>3</sup> (%)	-	10	10	ASTM C123
Quantidade máxima de material com SSS<1800 kg/m <sup>3</sup> (%)	10	1	1	ASTM C123
Quantidade máxima de material com SSS<1000 kg/m <sup>3</sup> (%)	1	0,5	0,5	ASTM C123
Quantidade máxima de impurezas (metais, vidro, material mole, material betuminoso) (%)	5	1	1	Visual
Quantidade máxima de metais (%)	1	1	1	Visual
Quantidade máxima de matéria orgânica (%)	1	0,5	0,5	NEN 5933
Quantidade máxima de finos (<0,063 mm) (%)	3	2	2	PrEN 933-1
Quantidade máxima de areia (<4 mm) (%)	5	5	5	PrEN 933-1
Quantidade máxima de sulfato (%)	1	1	1	BS 812, parte 118

<sup>3</sup> Referente ao resíduo de concreto e argamassa

Tabela 4: Composição do material de diferentes tipos, segundo a DIN 4226-100

Elementos		Composição do material, % em massa			
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Concreto, agregados minerais em conformidade com E DIN 4226-1		≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Clínquer, tijolo sem poros		≤ 70	≤ 30	≥ 80	
Areia proveniente de rocha calcária				≤ 5	
Outras quantidades de minerais <sup>a</sup>		≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Teores extras	Asfalto	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
	Mineral <sup>b</sup>	≤ 2	≤ 2	≤ 2	
	Sem mineral <sup>c</sup>	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	

<sup>a</sup> Teores de outros minerais como, por exemplo: tijolos com poros, concreto leve, concreto poroso, concreto poroso obtido de entulho, estuque,...

<sup>b</sup> teores extras de minerais são, por exemplo: vidro, cerâmica, metais,...

<sup>c</sup> teores extras de não minerais são, por exemplo: borracha, matéria plástica artificial, madeira, vegetação, papel, outros

Tabela 5: Densidade das partículas e absorção de água após 10 minutos para agregados reciclados minerais, segundo a DIN 4226-100

	Agregados minerais reciclados			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Densidade mínima das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	2000		1800	1500
Valor da flutuação da densidade das partículas (kg/m <sup>3</sup> )	± 150			Sem limite
Absorção máxima de água após 10 minutos (% em massa)	10	15	20	Sem limite

Tabela 6: Categorias para valores máximos do teor de finos, segundo a DIN 4226-100

Agregados minerais	Fração máxima passante na peneira 0,063mm (% da fração)	Categorias f
Agregado mineral graúdo	1,0	f <sub>1,0</sub>
	1,5	f <sub>1,5</sub>
	3	f <sub>3</sub>
	4	f <sub>4</sub>
Mistura de agregados graúdos	2	f <sub>2</sub>
	11	f <sub>11</sub>
Agregados minerais finos (areias)	4	f <sub>4</sub>
	10	f <sub>10</sub>
	16	f <sub>16</sub>
	22	f <sub>22</sub>
	Sem limite	f <sub>SL</sub>

### 2.3.3.2 Características físico-químicas das partículas

Devido à extensa variabilidade das fontes geradores de resíduos de C&D, as propriedades físico-químicas dos produtos reciclados do entulho tornam-se sensivelmente inconstantes, levando à necessidade de ações que promovam maior confiabilidade na manutenção dessas propriedades (RAHAL, 2007). A heterogeneidade apresentada pelo resíduo de C&D faz com que o concreto produzido a partir dele – o entulho entrando como agregado – tenha uma variabilidade significativa das suas propriedades, principalmente reológicas e mecânicas.

Algumas causas da variabilidade do entulho podem ser descritas: 1) presença da argamassa antiga em agregados reciclados de diferentes matrizes cimentícias (concretos de diferentes resistências, por exemplo); 2) constituição mineral do entulho de C&D; 3) granulometria, incluindo a presença de grande quantidade de materiais menores do que 75µm (HANSEN, 1992; MIRANDA e SELMO, 2006).

KATZ (2003) inclui ainda que, para materiais que contenham cimento Portland, a capacidade de cimentação residual de algum cimento anidro contribui para a variabilidade de agregados reciclados. Entretanto, o mesmo autor verificou que a idade do material original, quando britado, não influenciou os resultados dos novos concretos produzidos com esses agregados, para um nível de resistência particular adotado pelo autor.

Essa capacidade de cimentação residual comentada por KATZ (2003) foi estudada por POON *et al.* (2006), que chama de autocimentação a cimentação residual do cimento anidro remanescente. Os autores observaram modificações nos concretos com agregados reciclados de concretos britados e concluíram que foi a argamassa da parte fina reciclada a principal causa do fenômeno. Os resultados de difração de raios-X, de pH, de resistência à compressão e de permeabilidade mostraram que as frações mais significativas foram as menores que 0,15 mm e entre 0,30 mm e 0,60 mm.

Esses mesmos autores, num artigo publicado em 2004, mostraram, através da análise dos componentes dos agregados reciclados derivados de concretos britados, que a parte inerte – agregado graúdo e agregado miúdo – corresponde a um valor entre 65% e 70%, em volume, e a parte correspondente à matriz cimentícia – pasta de cimento Portland – a 30% a 35%. Diante disso, é bastante razoável que se dê uma atenção para o fenômeno da cimentação residual ou autocimentação.

Entretanto, muito se tem avançado no conhecimento e principalmente na utilização dos resíduos de C&D para a produção de concretos, argamassas e outros produtos da construção civil. O interesse no desenvolvimento de novas pesquisas é o aporte que há por recomendações e normas técnicas que amparam a utilização desses materiais.

Estudos recentes comprovam que o agregado graúdo reciclado de concreto, por exemplo, pode ser utilizado com sucesso como substituto parcial ou total de agregados naturais, para a produção de novos concretos com classe de resistência normal (KATZ, 2003; TOPÇU e SENDEL, 2004; POON *et al.*, 2004) e de alta resistência (LIMBACHIYA *et al.*, 2007).

Embora o entulho de C&D tenha se tornado mais popular como agregado na produção de concretos, há uma limitação de aplicação para a fração fina menor do que 5 mm (HANSEN, 1992). O autor explica que isso é devido aos efeitos nas propriedades do concreto.

No entanto, segundo POON *et al.* (2002) e POON e CHAN (2007), o agregado miúdo de concretos britados pode ser usado na fabricação de tijolos e blocos, já que a trabalhabilidade não é um fator determinante para a produção dos elementos, pois se utiliza um concreto conhecido como seco, *dry concrete*.

EVANGELISTA e DE BRITO (2007) observam que se poderia melhorar a grande variabilidade da parte fina de agregados britados de entulho de C&D fixando as fontes de obtenção, como, por exemplo, resíduos provenientes da indústria de elementos pré-moldados de concreto.

Num estudo conduzido pelos pesquisadores MIRANDA e SELMO (2006), com a finalidade de aplicação dos agregados miúdos reciclados de C&D em argamassas, sem função estrutural, viu-se que a incorporação de tais materiais aumenta a variabilidade dos resultados de propriedades das argamassas estudadas. Os autores consideram muito importante o agregado reciclado ser um material de baixo custo, e também alertam para a necessidade de se estudar melhor métodos de dosagem considerando a variabilidade intrínseca dos agregados reciclados de C&D e a variabilidade gerada nas propriedades das argamassas. O mesmo afirmou ETXEBERRIA *et al.* (2007).

Por fim, MIRANDA e SELMO (2006) sugerem utilizar a quantidade, em massa, de material que passa na peneira 75 $\mu$ m como um parâmetro prático de controle de propriedades no estado fresco de argamassas, como trabalhabilidade e retenção de água.

Um dos maiores desafios que se podem encontrar na dosagem de concretos e argamassas com agregados reciclados provenientes de C&D é a capacidade de absorção por parte do agregado reciclado. Este fator eleva a dificuldade de controle das propriedades no estado fresco, como

consistência, coesão, exsudação, retração plástica. Por conseguinte, influencia também a fase seguinte: resistência mecânica e durabilidade do concreto endurecido (POON *et al.*, 2006).

É interessante ressaltar que, quanto mais seco o agregado estiver, quanto mais poroso, de menor diâmetro e quanto mais fluida for a mistura que envolve o grão reciclado, maior será a quantidade de água absorvida (LEITE, 2001).

ETXEBERRIA (2004) apresenta, em seus resultados experimentais, valores da ordem de 5% de aumento da demanda de água em concretos com agregados reciclados graúdos. Já, para agregados reciclados miúdos, pode-se aumentar até 15%.

No aumento da demanda de água para dar trabalhabilidade, a textura e a forma do grão do agregado reciclado de C&D também influenciam bastante. BRITO *et al.* (2005) mostraram que, para concretos agregados finos de origem cerâmica (tijolos, blocos e telhas), os valores resultaram em maior consumo de água, já que a forma do grão foi vista como sendo mais alongada com bordas mais agudas.

### **2.3.3.3 Comportamento de concretos utilizando entulho de construção e demolição como agregado miúdo**

Da análise do comportamento de concretos, em geral, o meio técnico se pronuncia na direção de que a incorporação de resíduos de C&D como material substituto ao agregado natural não leva à melhora técnica. Entenda-se técnica como sendo características no estado fresco, como trabalhabilidade, retração plástica, e características no estado endurecido, resistência mecânica e durabilidade.

Porém, é inevitável entender que o uso dos materiais resíduos não se limita a uma visão a partir somente de características técnicas comumente analisadas (resistência e durabilidade). É imprescindível analisar a incorporação do entulho de C&D do ponto de vista do alívio no impacto ambiental (deposição e extração) e também na economia de não utilizar parte da quantidade de agregados naturais repostos na forma de agregados reciclados.

Mesmo que esse trabalho não tenha a finalidade de contribuir para o diagnóstico do alívio no impacto ambiental e nem de comparação de valores e índices econômicos, há grande interesse em despertar para mais um ponto de análise, que é o comportamento no estado fresco de concretos. Sem desprezar, no entanto, uma breve apreciação dos resultados mais recentes do estado endurecido.

Ao utilizar agregados finos reciclados de C&D na produção de concretos a partir de resíduos provenientes de blocos e tijolos cerâmicos, CHEN *et al.* (2003) concluíram que as propriedades mecânicas desses concretos não atingiram os limites da amostra de referência. Os autores ressaltam que é mais significativa a perda de resistência mecânica quanto menor for a relação água/cimento. Em um concreto com a/c igual a 0,38, a redução foi de 40%, e, para a/c igual a 0,60, redução de 25%.

Essa tendência é largamente explorada e comentada no meio científico. BAZUCO (1999) explica que, devido à resistência do agregado reciclado ser menor, o limite de ruptura do corpo-de-prova é comandado pelo próprio agregado reciclado e não pela matriz cimentícia, como é mais comum para concretos de resistência normal.

A idade do concreto também é um parâmetro importante de se analisar, já que, para as primeiras idades, os agregados reciclados de C&D influenciam menos na resistência (SOBERÓN, 2002).

Outro fator ainda importante de se levar em consideração é a qualidade do material de origem do resíduo de C&D. POON *et al.* (2004) verificaram que concretos com agregados reciclados provenientes de um concreto de alta resistência desenvolveram maiores resistências do que concretos que utilizaram agregados reciclados provenientes de um concreto de resistência normal. Os autores atribuíram os resultados à diminuição da porosidade da zona de transição pasta-agregado por parte dos agregados reciclados de concreto de alta resistência.

Para agregados reciclados de origem cerâmica, PADMINI *et al.* (2002) concluem que a resistência não foi afetada em função da resistência do tijolo cerâmico de onde originou o resíduo.

KHATIB (2005) mostrou que não houve perda de resistência dos concretos quando o teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados finos não foi maior do que 20% e de agregados reciclados graúdos do que 30%. Mas ressalta que, após esses limites, há uma redução sistemática da resistência com o aumento do teor de agregados reciclados.

Já BINICI (2007) chegou a teores de até 60% de substituição do agregado natural por agregado reciclado fino de origem cerâmica sem a perda de similaridade de resistência do concreto com resíduos em relação ao concreto com agregados naturais.

É importante salientar que os níveis de resistência dos trabalhos acima nem sempre são os mesmos, impossibilitando parcialmente a validação comparativa entre trabalhos. Isso pois verifica-se um potencial resultante mostrado pelos pesquisadores citados.

Quanto ao estudo de absorção de água no ensaio por capilaridade, percebe-se que o processo de absorção dos concretos com agregados naturais e agregados reciclados de C&D são bastante similares e obedecem à mesma lei (WIRQUIN *et al.*, 2000). No trabalho de LEVY e HELENE (2004), foi observado que a menor quantidade de água absorvida nos concretos com agregados reciclados graúdos foi no teor de substituição de 20%, tanto com o graúdo de concreto como o de alvenaria. Os autores afirmam que esse efeito foi devido ao melhoramento do fator de compactação dos agregados por parte da incorporação de resíduos de C&D.

---

# Capítulo 3 - Materiais e métodos experimentais

---

Um programa experimental foi elaborado em virtude do escopo da tese que visa à avaliação do estado fresco de concretos com a incorporação de agregados miúdos provenientes de resíduos industriais e de construção e demolição, como materiais substitutos dos agregados miúdos naturais. Para isso, é fundamental caracterizar os materiais constituintes das misturas, bem como o proporcionamento dos concretos e os teores de substituição aplicados.

É fundamental também a definição e detalhamento dos ensaios realizados nos concretos visando obter os dados necessários para a avaliação do comportamento no estado fresco.

## ***3.1 Materiais***

Os agregados empregados na pesquisa foram: agregado miúdo natural (areia quartzosa), agregado graúdo natural (brita granítica) e dois resíduos utilizados na substituição da areia natural (AGN): cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral (CZP) e agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) provenientes de uma unidade de beneficiamento. A tabela 7 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização física e química que foram executados nos agregados naturais e resíduos usados na pesquisa.

Tabela 7: Metodologia de ensaio empregada na caracterização física e química dos agregados

Propriedade	Materiais Testados	Ensaio/Método
Análise Química <sup>1</sup>	RCD e CZP	Fluorescência de Raios X
Massa Específica <sup>2</sup>	Brita	Método da Balança Hidrostática NBR NM 53/2003
	AGN, RCD e CZP	Método do Picnômetro – NBR 6508/84
Composição Granulométrica	Areia, Brita, RCD e CZP	NBR NM 248/2003 – Determinação da Composição Granulométrica
Teor de Material Pulverulento	Areia, Brita, RCD e CZP	NBR NM 46/2003 – Determinação do Teor de Material Pulverulento
Perda de Massa ao Fogo	RCD e CZP	NBR NM 18/2004 – Análise Química do Cimento Portland – Determinação da Perda de Massa ao Fogo / Método A
Análise térmica diferencial (ATD)	RCD e CZP	Segundo LUZ (2005)

<sup>1</sup> O equipamento utilizado foi um EDX-700, da marca Shimadzu, Laboratório **ValoRes** da UFSC

<sup>2</sup> O ensaio do picnômetro para os agregados miúdos resíduos necessitou ser executado promovendo a saída das bolhas de ar internas às partículas do RCD e CZP por meio de fervura

O cimento Portland utilizado foi um CPI-S 32, da marca Votoran, da Votorantim cimentos. Suas características químicas e físicas estão mostradas na tabela 8, fornecida pelo fabricante. A escolha do cimento deve-se ao fato de este conter baixa quantidade de adições minerais normalizadas, que possibilita a avaliação da interação dos resíduos com um aglomerante formado praticamente de clínquer puro.

Tabela 8: Características químicas e físicas do cimento Portland CPI-S 32

ENSAIOS FÍSICOS	Unidade	Média	ENSAIOS QUÍMICOS	Unidade	Média
Peneira 200	%	2,26	Perda ao Fogo	%	3,46
Peneira 325	%	14,25	SiO <sub>2</sub>	%	18,40
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3685	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,51
Água de consistência normal	%	25,36	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,04
Início de pega	h:min	2:56	CaO	%	61,51
Fim de pega	h:min	3:56	MgO	%	6,25
Expansão à quente	mm	1,39	SO <sub>3</sub>	%	3,10
Resistência 1 dia	MPa	19,5	Resíduo insolúvel	%	0,82
Resistência 3 dias	MPa	28,3	C <sub>3</sub> S	%	67,00
Resistência 7 dias	MPa	32,2	C <sub>2</sub> S	%	2,28
Resistência 28 dias	MPa	42,6	C <sub>3</sub> A	%	6,81
Massa específica	kg/dm <sup>3</sup>	3,12	C <sub>4</sub> AF	%	9,26

FONTE: Laudo técnico Cimento Votoran

O agregado miúdo natural (AGN) utilizado foi uma areia de rio, que pode ser classificada, segundo critérios de composição granulométrica, dentro da zona utilizável, de acordo com a norma brasileira NBR 7211/2005 – Agregado para concreto, posicionando-se mais próxima da parte superior da faixa de classificação. Pela versão antiga de 1983 da mesma norma, a areia utilizada poderia ser classificada como uma areia média com tendência à grossa. As suas características físicas estão mostradas na tabela 9.

Tabela 9: Características físicas dos agregados naturais

Parâmetro - Material	Areia	Brita
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,641	2,621
Diâmetro Máximo (mm)	4,8	9,5
Módulo de Finura	3,17	5,52
Classificação do Agregado (NBR 7211 “versão antiga”)	Zona 3 – Média	B0
Material Pulverulento (%)	2,0	2,6

A curva de distribuição granulométrica está mostrada na figura 24, que inclui também as curvas dos agregados miúdos resíduos RCD e CZP.

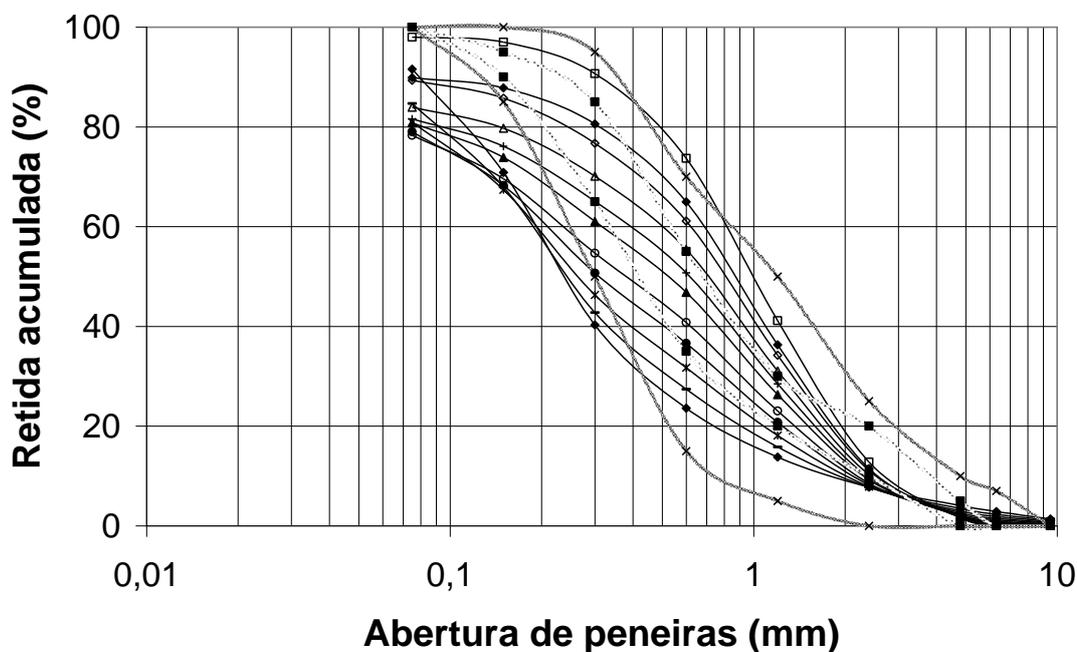


Figura 24: Comparação das curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e resíduos associadas as zonas da ABNT

O agregado graúdo natural utilizado é uma brita de origem granítica, com diâmetro máximo de 9,5mm. Pela norma brasileira NBR 7211, em sua versão passada de 1983, pode ser classificado como brita B0 ou pedrisco.

As características físicas estão mostradas na tabela 9, e a curva da distribuição granulométrica na figura 25.

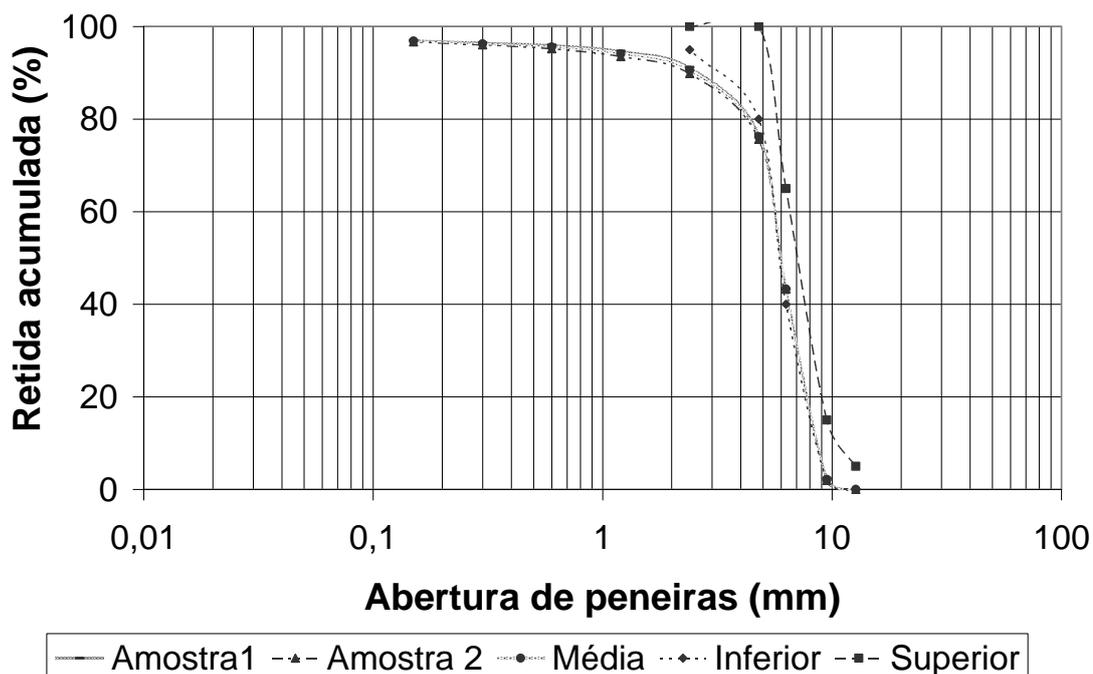


Figura 25: Curva granulométrica do agregado graúdo natural

Os resíduos (RES) empregados na substituição do agregado miúdo natural (AGN) foram: cinza pesada (CZP) e resíduo de construção e demolição (RCD).

O RCD miúdo usado na substituição do agregado miúdo natural foi obtido de uma usina recicladora de entulho de construção e demolição proveniente da construção civil, localizada em Belo Horizonte, em Minas Gerais. As características físicas dos resíduos estão mostradas na tabela 10. As características químicas estão mostradas na tabela 11.

Tabela 10: Características físicas dos RES

Parâmetro - Material	RCD	CZP
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,486	2,054
Diâmetro Máximo (mm)	4,8	4,8
Módulo de Finura	2,40	2,53
Material Pulverulento (%)	10,0	9,5

Tabela 11: Características químicas dos RES

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	ZnO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	Perda ao Fogo
<b>RCD</b>	61,43	ND	5,59	2,24	28,28	0,69	1,29	0,1	0,07	0,12	0,01	0,01	0,18	8,19
<b>CZP</b>	50,46	28,35	10,69	3,81	2,07	1,57	0,34	0,18	0,09	0,07	0,03	0,03	0,03	2,30

A figura 26 mostra partículas de RCD através de um microscópio ótico.



Figura 26: Partículas de RCD obtidas de microscopia ótica

A análise térmica diferencial foi realizada segundo procedimento utilizado por LUZ (2005) e está mostrada na figura 27. A difração de raios-X do RCD está apresentada na figura 28.

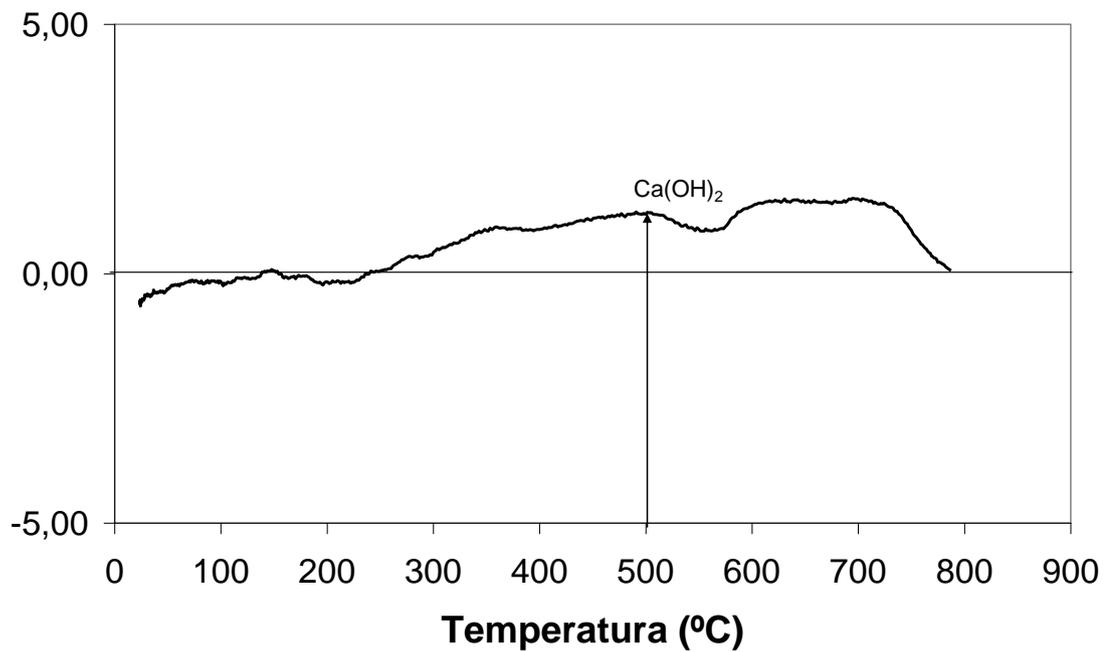


Figura 27: Análise térmica diferencial do RCD

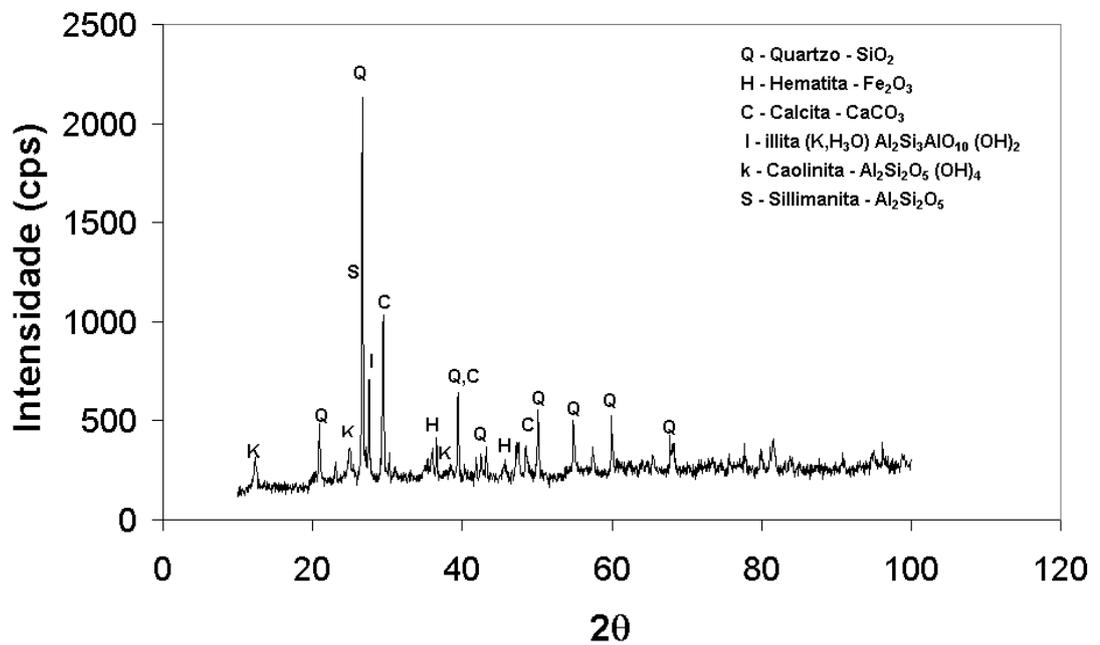


Figura 28: Difração de raios-X do RCD

A cinza pesada desta pesquisa foi coletada junto a esteira do pós queima do carvão mineral, na unidade C da usina de Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo, em Santa Catarina. Suas características físicas estão apresentadas na tabela 10 e as características químicas na tabela 11.

Para melhor entender a influência da porosidade da partícula de CZP as massas específicas de algumas faixas de diâmetro máximo e de intervalos de tamanho do grão de CZP foram determinadas, conforme mostrado nas figuras 29 e 30.

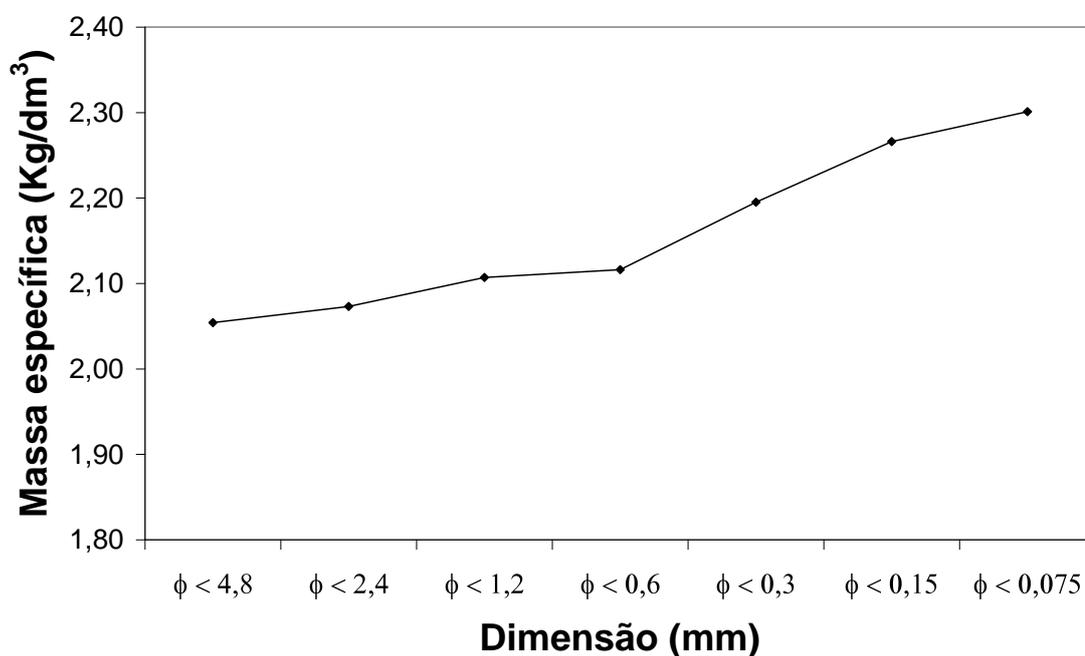


Figura 29: Massa específica da CZP em função do diâmetro máximo da partícula

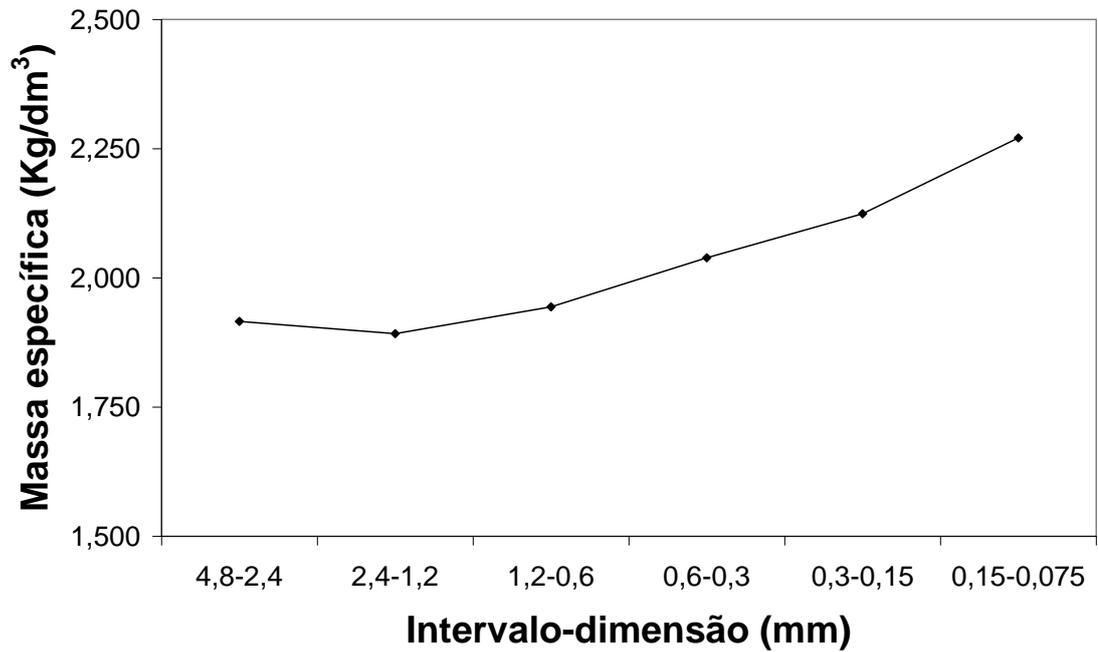


Figura 30: Massa específica da CZP em função do intervalo do diâmetro da partícula

Segundo as figuras 29 e 30, pode-se afirmar que quanto menor o diâmetro, maior a massa específica. Dessa forma, três situações são possíveis de existir quando o diâmetro das partículas de CZP diminui: 1) o grão possui menor porosidade aberta; 2) o grão possui forma mais arredondada com menos reentrâncias, resultando em menor superfície específica; e 3) os casos 1 e 2 ocorrendo simultaneamente.

A micrografia eletrônica de varredura da partícula de CZP pode ser vista figura 31.

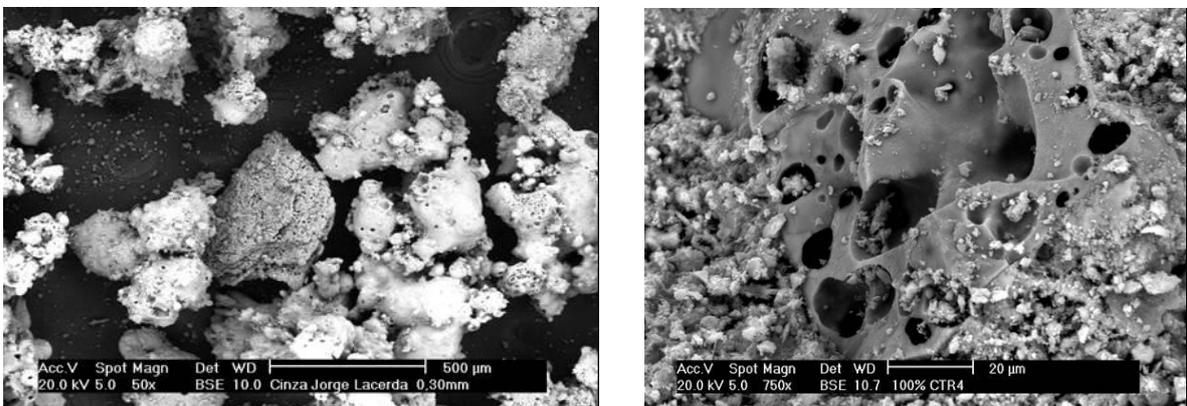


Figura 31: Micrografia eletrônica de varredura das partículas de CZP e do grão em matriz cimentícia

A figura 32 mostra o resultado do ensaio de difração de raios-X, onde se nota a predominância de quartzo e mulita.

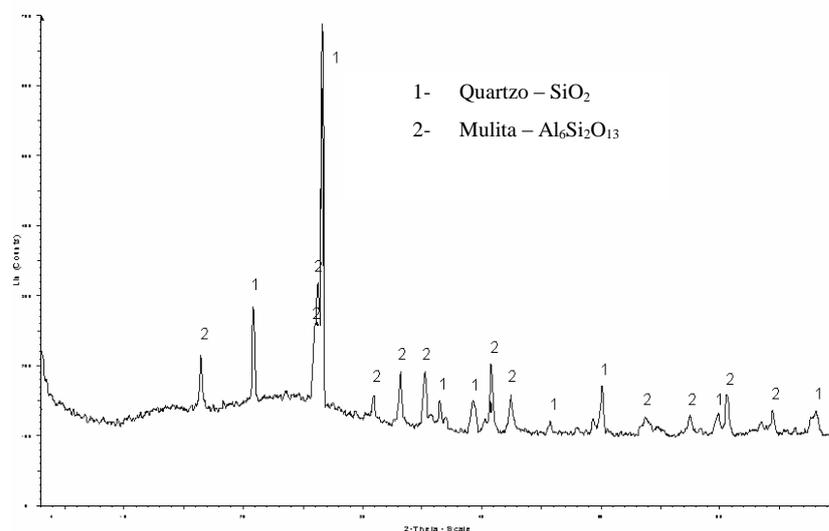


Figura 32: Difração de raios X da CZP

O aditivo utilizado foi um redutor de água de alta eficiência superplastificante (SP), com base química de éter policarboxilato, comercialmente conhecido como Glenium 51, fabricado pela BASF construction chemicals. As características do superplastificante mostradas na tabela 12 foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 12: Características do aditivo superplastificante Glenium 51

Característica	Resultado
pH	6,63
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,068
Teor de sólidos (%)	30,3

FONTE: Laudo técnico BASF construction chemicals

Ao longo do texto, o teor de SP apresentado é uma medida em relação a massa de cimento na dosagem ou no traço unitário.

## ***3.2 Metodologia experimental***

### **3.2.1 Definição dos traços e dosagem**

Para a composição do concreto buscou-se utilizar um traço que proporcionasse uma quantidade de cimento semelhante ao de alguns trabalhos pesquisados (WITTMANN, 1976; RADOCEA, 1992; AL-AMOUDI et al., 2007) que buscaram avaliar a influência de diversos parâmetros na retração plástica de concretos. A relação água/cimento (*a/c*) também foi definida segundo esse critério.

Adotou-se inicialmente uma proporção de cimento e agregado miúdo natural (AGN) de 1:2,36, em massa.

Antes de definir os traços finais dos concretos, um estudo inicial em argamassa foi realizado. Este estudo contribuiu fortemente para a validação da relação *a/c*, do consumo de agregado graúdo, indiretamente, e também para a avaliação do efeito da incorporação do aditivo superplastificante, principalmente nas misturas com os resíduos em substituição parcial ou total do AGN.

### **3.2.2 Estudo da fixação dos teores de substituição**

A substituição em volume de partículas foi realizada para manutenção do mesmo esqueleto sólido de agregados, pois possibilita que um mesmo conteúdo volumétrico de partículas de areia natural retirada seja preenchido pelas partículas de RES.

Para atingir esse objetivo, um procedimento de substituição foi proposto, segundo a figura 33. Esse procedimento foi testado para os RES em virtude dos insucessos obtidos da substituição em volume de grãos pela relação da massa específica dos materiais.

O procedimento se baseia numa forma simples de retirada de partículas naturais e colocação de partículas de RES utilizando um anel de volume padrão, mantendo a mesma energia de derrame dos agregados no aparato. A consideração do procedimento é em virtude das massas unitárias dos materiais granulares realizadas utilizando o mesmo anel padrão.

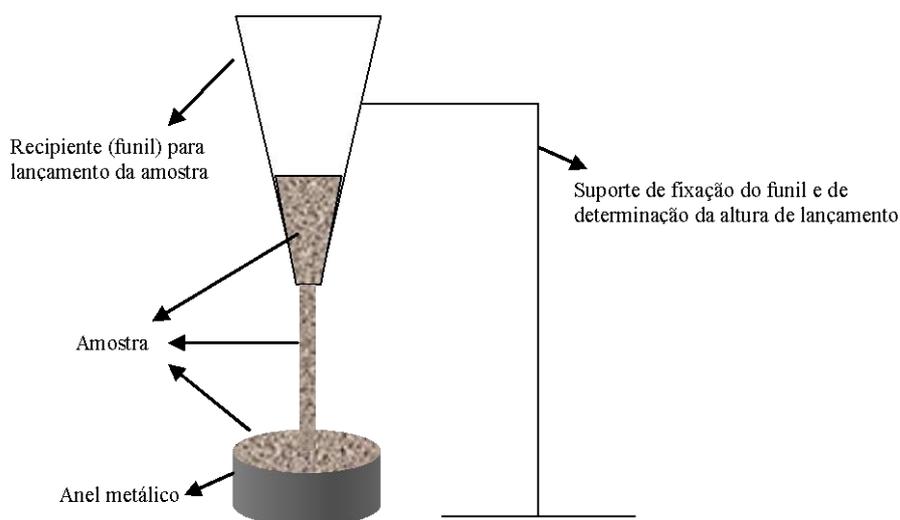


Figura 33: Esquema do molde de fixação dos teores de substituição do AGN pelo resíduo

Como há uma interpenetração entre os grãos dos materiais granulares diferentes (AGN/RES), também podendo ser considerada como empacotamento dos grãos, não é interessante o cálculo da compensação pela massa unitária, mas executar o procedimento proposto para cada teor de substituição.

A partir da massa total de AGN obtido, uma parte era retirada e novamente o volume padrão recebia o AGN, sem que o mesmo não fosse totalmente preenchido pelo novo volume devido à parcela retirada. Assim, o volume não preenchido era completado com o resíduo e dessa forma se alcançava o volume de partículas de resíduos, com a medida da massa do conjunto AGN + RES. Portanto, conhecendo a quantidade de AGN que foi retirada e a massa de resíduo que foi inserida, pode-se caracterizar, por fim, a relação entre os AGN e resíduo no teor de substituição fixado.

Para confirmar a complementaridade intergranular dos dois agregados, natural e resíduo, pesou-se nova amostra no teor e misturaram-se os agregados antes de lançar no volume padrão. Em seguida, o volume era preenchido e todos os resultados finais confirmaram a metodologia de preenchimento do anel metálico.

A tabela 13 apresenta os resultados dos teores de substituição dos agregados miúdos naturais pelos agregados miúdos resíduos.

Tabela 13: Características das mesclas segundo o teor de substituição

Amostra		M500	M450	M400	M350	M300	M250	M200	M150	M100	M50	M0	
RCD	% de AGN em volume	Sem interpenetração	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	0,0
		Com interpenetração	100,0	84,2	75,7	66,1	57,3	49,5	38,5	29,9	19,7	9,9	0,0
	% de resíduo em volume		0,0	15,8	24,3	33,9	42,7	50,5	61,5	70,1	80,3	90,1	100,0
	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,515	1,58	1,541	1,52	1,482	1,412	1,424	1,356	1,349	1,314	1,282
	Porosidade total*		0,426	0,396	0,408	0,413	0,424	0,449	0,441	0,464	0,464	0,475	0,484
CZP	% de AGN em volume	Sem interpenetração	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	0,0
		Com interpenetração	100,0	87,9	74,3	68,5	59,3	50,0	40,1	30,5	19,8	10,0	0,0
	% de resíduo em volume		0,0	12,1	25,7	31,5	40,7	50,0	59,9	69,5	80,2	90,0	100,0
	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,515	1,447	1,399	1,278	1,188	1,095	1,010	0,917	0,850	0,763	0,676
	Porosidade total*		0,426	0,437	0,438	0,480	0,506	0,534	0,559	0,589	0,608	0,639	0,671

\*porosidade total = volume de vazios entre os grãos + volume de poros dos grãos

Toda a substituição foi feita em volume com variação dos teores de AGN a cada 10%. Assim, a retirada de uma parcela de natural implicou na colocação de uma parcela de resíduo que ocupava o mesmo espaço da areia natural. Para os teores mostrados na tabela 13 estão sendo considerados dois fatores: a interpenetração ou não entre os grãos do natural e resíduo. Quando não se considerou a interpenetração, o cálculo dos teores é feito segundo a equação 14 e 15:

$$\%AGN_i = \frac{m_i - m_{ret\_i}}{m_i} \cdot 100\% \quad (14)$$

$$\%RES_i = 100\% - \%AGN_i \quad (15)$$

Onde,

% AGN<sub>i</sub>: teor “i” de agregado miúdo natural na mistura, em %

%RES<sub>i</sub>: teor “i” de agregado miúdo resíduo na mistura, em %

m<sub>i</sub>: massa para teor de substituição igual 0%, em g

m<sub>ret\_i</sub>: massa retirada para formação do teor de substituição “i”, em g

Quando se considerou a interpenetração das partículas, que seria o caso mais justo de consideração, já que há certa complementaridade entre os grãos nas mesclas, o cálculo do teor foi feito segundo as equações 16 e 17:

$$\%AGN_i = \frac{V_{AGN\_i}}{V_{AGN\_i} - V_{RES\_i}} \cdot 100\% \quad (16)$$

$$\%RES_i = \frac{V_{RES\_i}}{V_{AGN\_i} - V_{RES\_i}} \cdot 100\% \quad (17)$$

Onde,

$V_{AGN\_i}$ : volume de agregado miúdo natural ocupado no molde padrão de ensaio, em  $\text{cm}^3$

$V_{RES\_i}$ : volume de agregado miúdo resíduo ocupado no molde padrão de ensaio, em  $\text{cm}^3$

Sendo,

$$V_i = \frac{m_i}{\delta_u} \quad (18)$$

Onde,

$V_i$ : volume no molde padrão do material considerado, em  $\text{cm}^3$

$m_i$ : massa do material para teor de substituição “i”, em g

$\delta_u$ : massa unitária no estado solto do material considerado, no ensaio utilizando o mesmo molde para determinação dos teores de substituição, em  $\text{g/cm}^3$

Em relação aos resultados obtidos nesta pesquisa, toda vez que se fizer menção ao teor de substituição do AGN pelo RES, se estará considerando o teor de substituição com interpenetração entre as partículas, ou seja, teores obtidos a partir das equações 16, 17 e 18.

### 3.2.2.1 Considerações sobre o ensaio de granulometria com as mesclas nos teores de substituição natural/resíduo definidos

A distribuição granulométrica dos agregados foi estudada para cada material individual (M500, M0-RCD e M0-CZP) e também para as mesclas compostas nos teores de substituição definidos. O estudo das mesclas foi feito através de cálculos para determinar os valores percentuais retidos acumulados em cada peneira do ensaio para cada teor. Assim, curvas granulométricas foram plotadas em função do teor de substituição natural/resíduo. As figuras 34 e 35 mostram as curvas granulométricas das amostras de RCD e CZP nos teores de 0% (REF), 50% (M250) e 100% (M0). As demais curvas encontram-se no anexo 1.

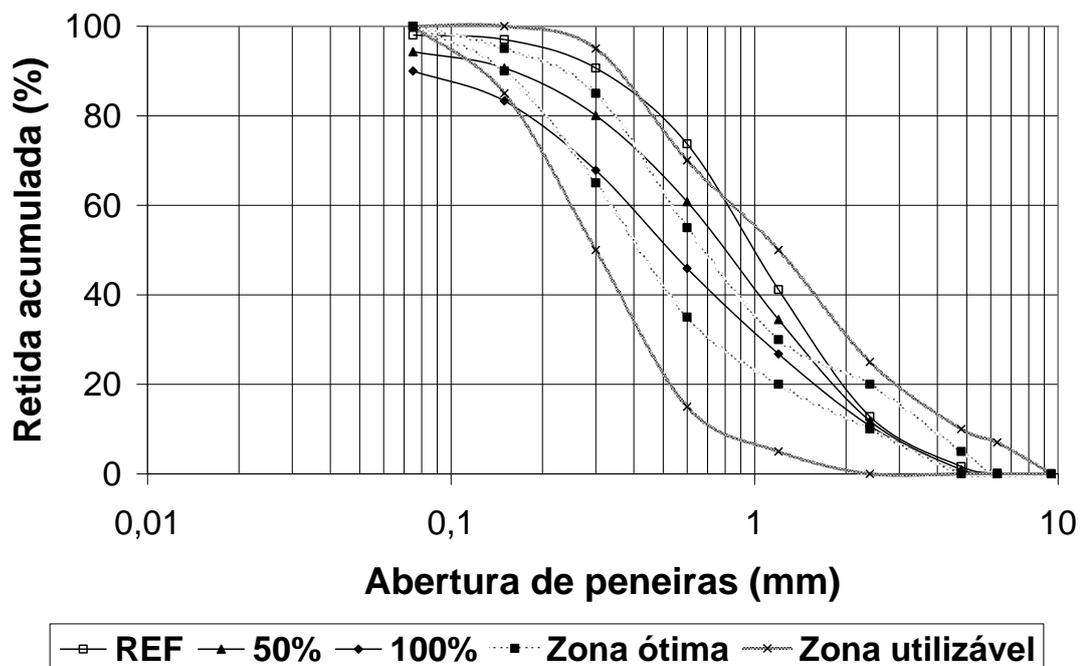


Figura 34: Curvas granulométricas das mesclas AGN-RCD

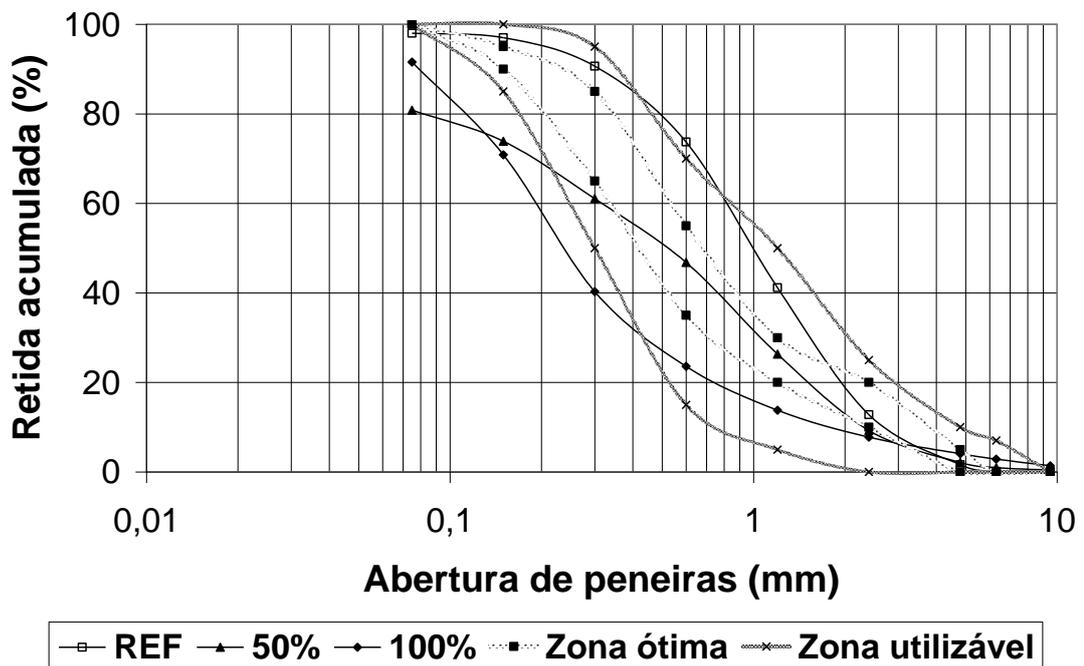


Figura 35: Curvas granulométricas das mesclas AGN-CZP

Como o AGN possui um maior número de partículas com maiores dimensões em relação aos RES, e considerando que a curva granulométrica da amostra M500 tende para ao limite utilizável da norma, assim sendo, a incorporação dos RES melhora a distribuição granulométrica das mesclas.

A curva granulométrica do teor de 100% de RCD – M0 – se mostrou com uma boa adequação na zona ideal da norma, exceto pela parte superior da curva, conforme figura 34. Isso indica que o material apresenta grande quantidade de finos passante na peneira 0,15 mm. Contudo, as mesclas com o RCD e o AGN resultaram em curvas mais bem adequadas, já que o agregado natural possui granulometria menos fina, conduzindo a curva para cima, quando o RCD a conduz para baixo.

Já para a curva granulométrica da CZP 100%, os resultados não foram tão satisfatórios como os resultados com RCD, em relação à norma. A CZP possui a maioria de seus grãos nas dimensões entre 0,075 mm e 0,60 mm – 76% de material retido acumulado – com menos de 25% acima de 0,60 mm.

Através da tabela 14 referente aos parâmetros granulométricos das mesclas AGN/RES é possível uma melhor confirmação das afirmações anteriores pela consideração do coeficiente de

uniformidade C.U. e do coeficiente de curvatura C.C., além da teor de partículas menores do que 0,15 mm e 0,075 mm.

Tabela 14: Parâmetros granulométricos das mesclas AGN/RES

Parâmetro	$\phi < 0,15$ mm	$\phi < 0,075$ mm	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C.U. (mm) <sup>1</sup>	C.C. (mm) <sup>2</sup>	
M500	3,0	2,0	0,3	0,6	1,2	4	1	
RCD	M450	4,9	3,1	0,15	0,3	0,6	4	1
	M400	5,9	3,7	0,15	0,3	0,6	4	1
	M350	7,1	4,4	0,15	0,3	0,6	4	1
	M300	8,3	5,1	0,15	0,3	0,6	4	1
	M250	9,4	5,7	0,15	0,3	0,6	4	1
	M200	10,9	6,6	0,075	0,3	0,6	8	2
	M150	12,1	7,3	0,075	0,3	0,6	8	2
	M100	13,6	8,2	0,075	0,3	0,6	8	2
	M50	15,1	9,1	0,075	0,3	0,6	8	2
	M0	16,7	10,0	0,075	0,15	0,6	8	0,5
CZP	M450	6,6	2,9	0,15	0,3	0,6	4	1
	M400	8,6	3,4	0,15	0,3	0,6	4	1
	M350	10,9	3,9	0,075	0,3	0,6	8	2
	M300	13,1	4,5	0,075	0,3	0,6	8	2
	M250	15,1	5,0	0,075	0,15	0,6	8	0,5
	M200	18,0	5,7	0,075	0,15	0,6	8	0,5
	M150	20,4	6,3	0,075	0,15	0,6	8	0,5
	M100	23,3	7,0	0,075	0,15	0,3	4	1
	M50	26,1	7,7	0,075	0,15	0,3	4	1
	M0	29,1	8,4	0,075	0,15	0,3	4	1

<sup>1</sup> se C.U. < 5 → uniforme; 5 < C.U. < 15 → medianamente uniforme; C.U. > 15 → desuniforme

<sup>2</sup> se 1 < C.C. < 3 → bem graduado

### 3.2.2.2 Procedimento para migração de água por capilaridade nas amostras granulares

Com o objetivo de verificar a intensidade de absorção e a cinética de umidade das mesclas natural/resíduo que são modificadas pela incorporação de agregados porosos, um ensaio de infiltração de água por capilaridade foi desenvolvido.

O aparato de ensaio é composto pelo mesmo anel metálico de diâmetro de 10 cm e altura de 4 cm utilizado para a determinação dos teores de RES (figura 36). A quantidade de água capilar

absorvida foi monitorada, em volume, através de leituras contínuas em um tubo de Mariotte graduado usando-se gradiente hidráulico igual a zero (figura 37).

Sendo assim, a avaliação foi realizada medindo a quantidade de água que a amostra granular da mescla foi capaz de absorver.

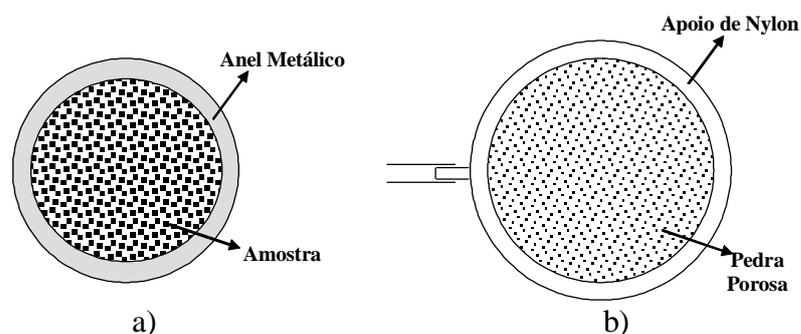


Figura 36: a) vista superior do molde utilizado para a amostra granular; b) Recipiente para a acoplagem da amostra e de saída de água para o ensaio de absorção

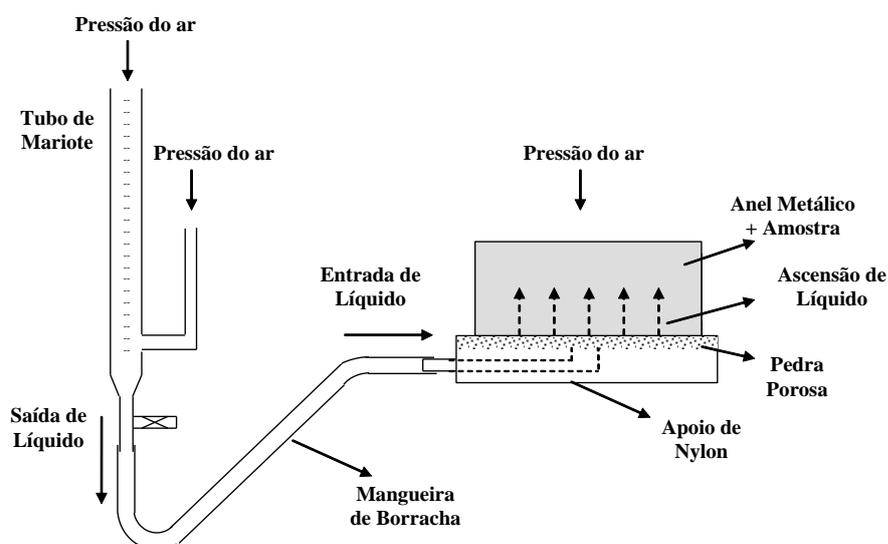


Figura 37: Aparato de ensaio de absorção capilar

No aparato proposto, o contato constante da água contida na pedra porosa e papel filtro com a amostra granular permite que, em virtude dos espaços entre os grãos, a mesma água infiltre na amostra por capilaridade.

O fenômeno físico corresponde a diferença de pressão entre a superfície superior do menisco formado em um poro<sup>4</sup> da amostra granular e a superfície inferior ao mesmo menisco. Onde acima do menisco a pressão é atmosférica e abaixo do menisco a pressão é menor do que a atmosférica, elevando a pontos mais distantes da base da amostra a franja de ascensão de umidade.

### **3.2.3 Estudo inicial em argamassas**

Para o estudo inicial de argamassas, duas séries foram produzidas: 1) com relação a/c variável e sem incorporação de aditivo superplastificante; e 2) com relação a/c fixa e com incorporação de aditivo superplastificante em teores variáveis.

Para a definição da trabalhabilidade e consistência foi utilizada a mesa de espalhamento da norma brasileira NBR 7215/1996, fixando um valor de abertura em  $280 \pm 10$  mm, isto é, para a série 1 foi adicionado tanto mais água quanto necessário para atingir um espalhamento dentro do intervalo especificado. Já para a série 2, a variação foi do superplastificante, com a relação a/c constante.

O fato de se ter duas séries de argamassas tem o objetivo de testar o comportamento das misturas produzidas com RES em relação a variação da relação a/c e fixação da mesma com incorporação de um aditivo SP.

### **3.2.4 Estudo dos concretos**

No estudo dos concretos, somente a CZP foi utilizada, pois não houve viabilidade de quantitativo suficiente para o estudo com RCD, já que uma boa parte do material coletado para o programa experimental foi consumido no estudo com argamassa e outras pesquisas deveriam ser realizadas e consumir o volume restante.

Dessa forma, a composição dos concretos foi definida de acordo com o consumo de agregados miúdos e os teores de substituição AGN-CZP do estudo inicial em argamassa. Foi fixado um consumo de cimento teórico de  $400 \text{ kg/m}^3$ .

---

<sup>4</sup> Poro no material granular corresponde ao espaço entre as partículas após a compactação padrão da amostra, isto é, vazio intergranular.

O teor de agregado graúdo no traço unitário foi fixado para manter o consumo de cimento em  $400 \text{ kg/m}^3$ , o teor de agregado miúdo conforme o estudo em argamassa e a relação a/c em 0,60. Assim, o resultado do teor unitário é de 1:1,81, na proporção cimento:agregado graúdo, em massa.

A relação a/c e o teor de superplastificante (SP) foram os parâmetros que sofreram variações, dando origem a três séries distintas de concretos.

Essas séries buscaram, da mesma forma que nas argamassas, uma amplitude maior de variação dos parâmetros de dosagem: relação a/c e teor de SP. Assim, três séries de concretos foram produzidas e estudadas quanto ao comportamento no estado fresco.

A variação ou fixação da relação a/c possibilita a verificação da influência da porosidade da CZP na capacidade de liberação de água para a mistura, ou a migração da água da mistura para o agregado resíduo. Quanto à presença de SP, a interação entre o aditivo e o cimento Portland pode sofrer variação nos parâmetros do estado fresco em função do teor de CZP no concreto.

- Série 1, com relação a/c variável e teor de SP constante e igual a 0,6%. Nesta série, as relações a/c dos concretos foram as mesmas do estudo em argamassa (relações a/c variáveis), com a inclusão do aditivo SP. A avaliação da consistência foi feita através do ensaio de abatimento de tronco de cone – slump test – com procedimento descrito pela norma NBR NM 67/1998. Não houve fixação do valor do slump, mas buscou-se um resultado de consistência e trabalhabilidade compatíveis com um concreto para fins de bombeamento (e.g., abatimento acima de 120 mm). Também foi avaliada a consistência visualmente e através da colher, observando maior ou menor facilidade de manipulação da mistura. Isso levou a diferentes valores do slump, conforme a tabela 15. Com a variação da relação a/c em função do teor de CZP a perspectiva de liberação de a/c para a mistura é maior já que mais água pode estar presente internamente ao grão poroso. Já o teor fixo de SP possibilitou a manutenção da conteúdo do aditivo químico disponível para o contato com o cimento em todas os teores de CZP;
- Série 2, com relação a/c fixada em 0,60 e teor de SP constante e igual a 0,6%. Na série 2 fixou-se a/c e SP sem limitação pela consistência no slump test ou pela trabalhabilidade. Esta série teve como objetivo verificar o comportamento no estado fresco dos concretos para um mesmo teor de sólidos e mesma quantidade de água efetiva (água adicionada + água de umidade e absorção dos agregados), mesmo com diferentes consistências. Para

alguns teores, o fato da fixação de a/c e de SP resultou em concretos com pouca ou nenhuma trabalhabilidade pelo slump test, conforme a tabela 15;

- Série 3, com relação a/c fixada em 0,60 e teor de SP variável conforme o valor do abatimento em tronco de cone. Na série 3 buscou-se fixar um intervalo da medida do slump entre 80 e 150 mm, mantendo a relação a/c fixa e variando o SP. Buscou-se a observação das possíveis variações nas características dos concretos no estado fresco pela variação do teor de SP, em função da trabalhabilidade, para uma mesma relação a/c, com expectativa de observação das modificações causadas pela incorporação do aditivo em função da demanda com o aumento do teor de CZP.

Em geral, no estudo da série 3 com o RCD e com a CZP, o ajuste de SP para a faixa de abatimento fixada foi possível. Contudo, para alguns teores de substituição, houve uma acentuada elevação no consumo de aditivo que provocou uma mudança grande no comportamento quanto à avaliação da trabalhabilidade e consistência pelo slump test. Desde que não houvesse uma trabalhabilidade suficiente, pela análise visual, seguia-se com o incremento de aditivo. Porém, depois de atingido um limite, não definido na pesquisa, uma mudança drástica ocorria com a mistura passando de pouca trabalhabilidade para uma mistura com excessiva fluidez, de acordo com as características buscadas na pesquisa. Essa fluidez excessiva não era capaz de ser medida pelo equipamento por ultrapassar os limites da base metálica, como em alguns casos também ocorridos na série 2, de acordo com a tabela 15. A excessiva fluidez aconteceu nos concretos M0-RCD e do teor correspondente ao M250-CZP até M0-CZP, isto é, 6 concretos com CZP.

A causa desse fenômeno pode estar relacionada com a intensidade de absorção dos resíduos. Pode ocorrer migração de parte do SP para dentro da partícula porosa sem que o SP promova a ação defloculante do cimento Portland e dispersante das partículas de aglomerante. Mas, com um incremento no teor de SP tal que não haja mais absorção por parte do agregado resíduo poroso, o SP retorna a se concentrar nas proximidades das partículas de cimento Portland exercendo, assim, suas funções características e modificando a fluidez. Contudo, essa modificação é muito brusca promovendo uma excessiva fluidez para ser avaliada pelo slump test.

O organograma das mesclas, argamassas e concretos produzidos está apresentado na figura 38.

Tabela 15: Traço unitário dos concretos de CZP

		M500	M450	M400	M350	M300	M250	M200	M150	M100	M50	M0
Teor com interpenetração em volume (%)	Areia	100	87,90	74,30	68,50	59,30	50,00	40,10	30,50	19,80	10,00	0
	Resíduo	0	12,10	25,70	31,50	40,70	50,00	59,90	69,50	80,20	90,00	100
Teor sem interpenetração em volume (%)	Areia	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	Resíduo	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Traço unitário (kg)	c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	AGN	2,36	2,12	1,89	1,65	1,42	1,18	0,94	0,71	0,47	0,24	0,00
	CZP	0,00	0,13	0,29	0,34	0,43	0,53	0,63	0,72	0,85	0,95	1,05
	p	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81
a/c S1 (g/g)		0,51	0,510	0,517	0,558	0,546	0,561	0,583	0,601	0,643	0,670	0,702
SP S3 (%)		0,15	0,15	0,15	0,34	0,39	0,50	0,83	1,73	1,35	2,44	5,09
Slump (mm)	S1	83	170	225	180	215	160	145	210	215	230	∞
	S2	∞	∞	∞	∞	∞	240	230	175	103	0	0
	S3	165	130	115	160	160	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Massa específica no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	S1	2268	2280	2304	2245	2155	2147	2099	2102	2028	2036	1996
	S2	2121	2275	2208	2162	2107	2026	2099	2079	-----	-----	-----
	S3	2119	2031	2144	2182	2172	2132	2099	2096	2046	2036	2090
Consumo de cimento real (kg/m <sup>3</sup> )	S1	399	409	415	420	413	421	421	430	423	433	435
	S2	368	402	395	400	401	396	421	430	-----	-----	-----
	S3	367	359	384	404	413	416	421	433	433	443	469

∞: abatimento com espalhamento do concreto maior do que a dimensão da base do equipamento de medição do slump test

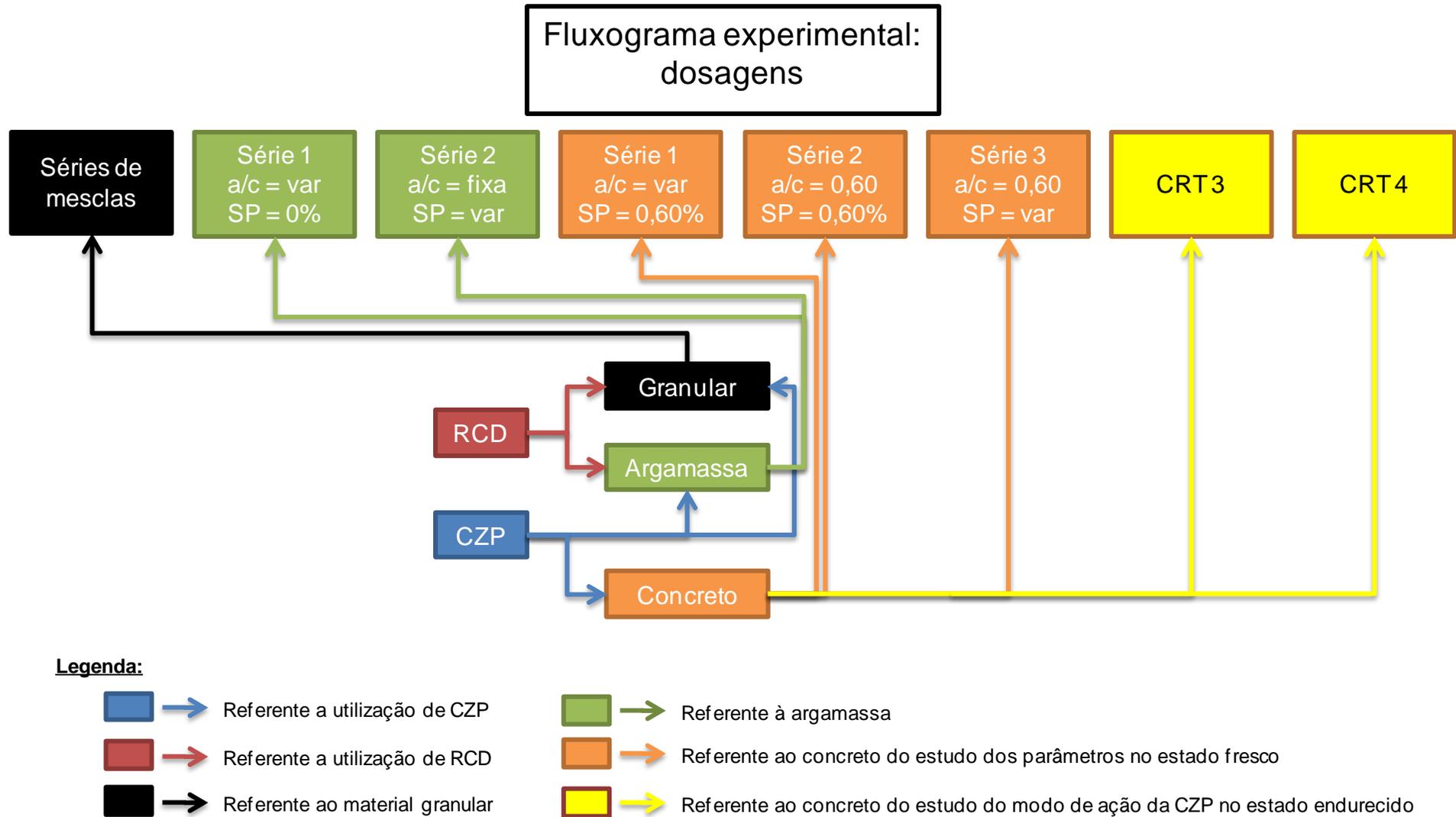


Figura 38: Organograma das mesclas, argamassas e concretos estudados na tese

### 3.2.5 Procedimentos experimentais

Para melhor compreensão dos vários ensaios realizados nas argamassas e concretos produzidos com RCD e CZP em substituição ao AGN, a tabela 16 e a figura 39 trazem um resumo desses ensaios.

Tabela 16: Ensaio no estado fresco das argamassas e concretos com CZP e RCD

<b>Ensaio</b>	<b>Materiais Testados</b>	<b>Norma Equipamento</b>	<b>Condições de Ensaio</b>	<b>Observação Relevante</b>
Consistência	Argamassa	NBR 7215/1996 – Mesa de Espalhamento	T = 20 ± 2°C UR = 65 ± 5%	-----
	Concreto	NBR NM 67/98 – Abatimento de Tronco de Cone	T = lab UR = lab	-----
Massa específica	Argamassa	NBR NM 56/96	T = 20 ± 2°C UR = 65 ± 5%	Molde cilíndrico de 5x10 cm
	Concreto	NBR NM 56/96	T = lab UR = lab	Molde cilíndrico de 10x20 cm
Calorimetria	Argamassa e Concreto	Sem norma brasileira	T = 22 ± 2°C UR = 60 ± 5%	-----
Absorção de água	Argamassa	NBR 9779/95	T = 22 ± 2°C UR = 60 ± 5%	Procedimento adaptado
Exsudação	Concreto	NM 102/96 e MR6	T = 22 ± 2°C UR = 60 ± 5%	Procedimento adaptado
Pega <sup>1</sup>	Concreto	NF EM 196-3 (França/1990)	T = 22 ± 2°C UR = 60 ± 5%	Procedimento adaptado
Retração plástica	Concreto	Sem norma	T = 22 ± 2°C UR = 60 ± 5%	-----
Temperatura	Concreto	Sem norma	T = 22 ± 2°C UR = 60 ± 5%	-----
Evaporação	Concreto	Sem norma	T = 22 ± 2°C UR = 60 ± 5%	-----

<sup>1</sup>Mesmo procedimento nacional NBR NM 65/2003 com agulha de Vicat, porém com uma massa de acréscimo de 700 g para evitar que a penetração da agulha seja interrompida por um agregado

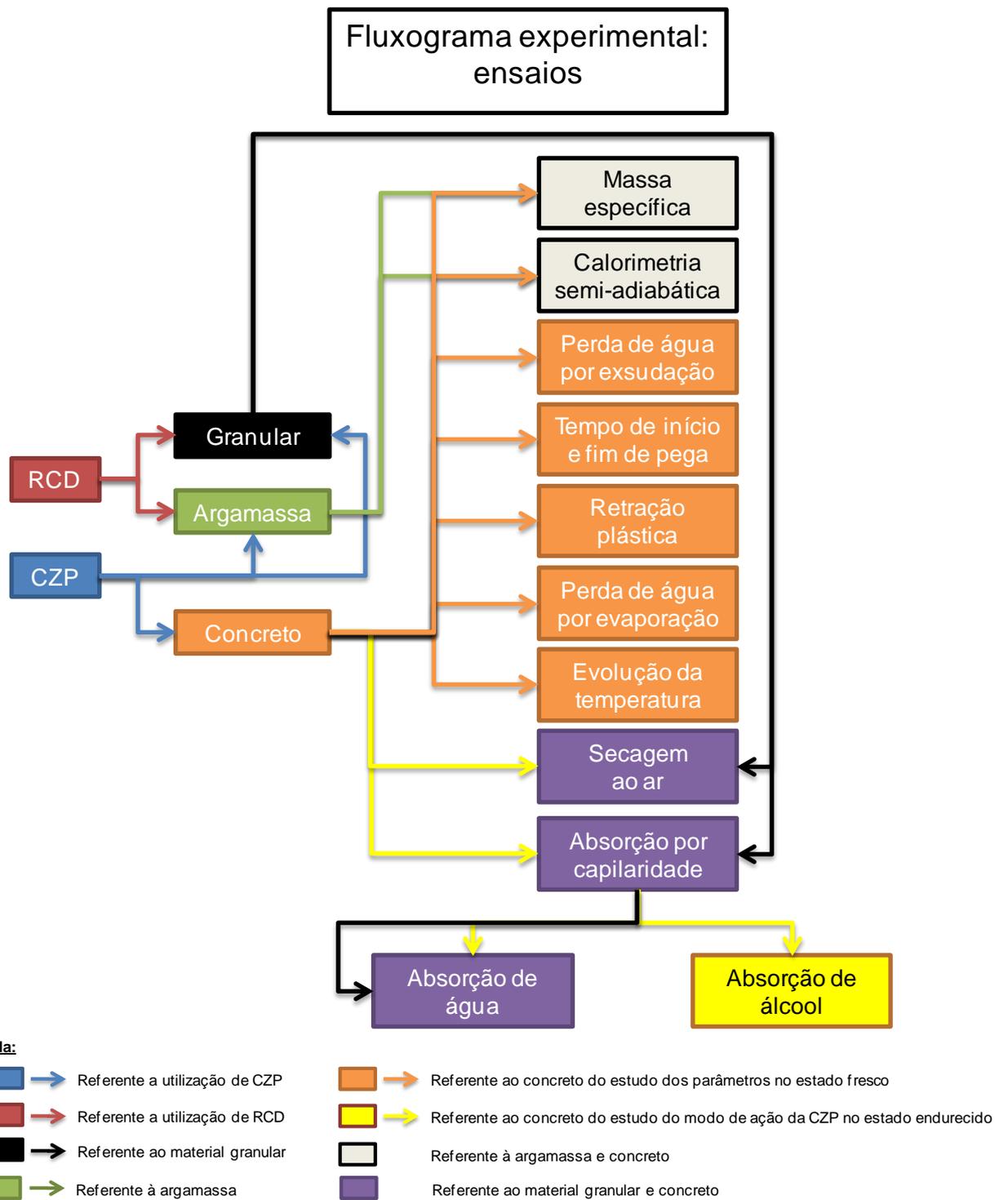


Figura 39: Organograma dos ensaios

### 3.2.5.1 Ensaios em argamassa

No estudo inicial em argamassas associadas aos concretos, os seguintes ensaios foram realizados: consistência na mesa de espalhamento, massa específica no estado fresco pelo método gravimétrico, calorimetria semi-adiabática.

A descrição que segue abaixo é relevante para os ensaios que não há norma envolvida ou a norma foi adaptada.

#### 3.2.5.1.1 Calorimetria

A medição da evolução de calor foi realizada utilizando um calorímetro semi-adiabático tipo de Langavant, segundo a figura 40.

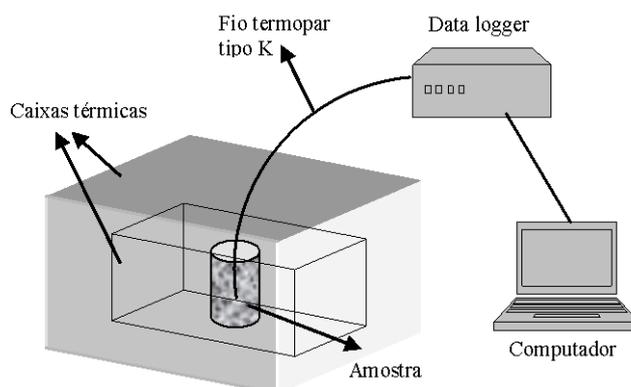


Figura 40: Calorímetro semi-adiabático para medição da evolução de calor de hidratação

As leituras da temperatura no corpo-de-prova foram feitas utilizando um fio termopar tipo K. A amostra, no estado fresco, recém misturada era lançada em um recipiente cilíndrico, tipo um copo, de EPS com espessura das paredes de 1,5 cm, altura de 12 cm e diâmetro de 7 cm. O termopar era mantido na metade da altura da amostra, ou seja, 6 cm.

O copo cilíndrico era coberto com uma manta térmica revestida com uma folha de alumínio (manta radiante).

Depois de lançada a amostra, o copo cilíndrico revestido com a manta térmica era lacrado com fita adesiva reduzindo o fluxo de ar no espaço entre a manta e o recipiente da amostra. Após isso, era colocada em uma caixa térmica menor que ficava dentro de uma caixa térmica maior. Ambas

as caixas são fabricadas com isoplástico com paredes em duas camadas, com uma camada de ar entre elas.

Para a passagem do fio termopar para a leitura da temperatura da amostra foram feitas aberturas e depois preenchidas com borracha de silicone isolante, sem que houvesse perda de calor pela abertura.

O ensaio com o calorímetro foi realizado em ambiente climatizado.

As medidas foram feitas em um data logger Hewlett-Packard, modelo 34970A conectado a um microcomputador, com leituras a cada 20 segundos.

O experimento de calor era iniciado assim que a amostra era despejada e adensada no recipiente de ensaio, e todo o aparato era fechado. O tempo desde o contato inicial do cimento com a água até o lançamento do ensaio de calor foi entre 10 e 20 minutos. Sendo assim, o ensaio não possibilitou a determinação do primeiro e maior pico de calor de hidratação (calor de dissolução) que ocorre por volta de 10 minutos (TAYLOR, 1997).

Valores correntes dos calores específicos dos materiais constituintes dos concretos que serão considerados nesse trabalho – cimento Portland, areia quartzosa, brita granítica, água potável, cinza de carvão mineral, entulho de construção e demolição – foram encontrados segundo fonte pesquisada (TEKES, 2000). Os valores estão mostrados na tabela 17.

Tabela 17: Calores específicos considerados para os materiais constituintes dos concretos dessa pesquisa

Material	Cimento Portland	Areia quartzosa	Brita granítica	Água potável	Cinza de carvão mineral	Entulho de C&D
Calor específico (kJ/kg.K)	0,84	0,80	0,80	4,186	0,79	0,90

### 3.2.5.2 Ensaio em concreto

Nos concretos, os seguintes ensaios foram realizados: consistência pelo slump test, massa específica pelo método gravimétrico, calorimetria, determinação dos tempos de início e fim de pega, medida da deformação linear por retração plástica, perda de água por exsudação, perda de água por evaporação, e medida da evolução da temperatura da amostra.

A medição da evolução da temperatura utilizando um calorímetro semi-adiabático foi realizado utilizando o mesmo aparato do estudo em argamassa.

O ensaio de pega foi realizado segundo o procedimento da norma francesa NF EM 196-3 (1990) – Détermination du temps de prise des ciments – CERIB fiche 34, que visa determinar os tempos de início e fim de pega de pastas e argamassas. A norma francesa prevê a adição de uma massa extra de 700 g acoplada na parte superior do equipamento de Vicat quando o ensaio é feito em argamassa.

Segundo a norma, o início de pega em argamassas acontece quando a distância entre a agulha e a placa de base do molde tronco cônico for de  $4\pm 1$  mm. O fim de pega ocorre 15 minutos após não ocorrer penetração superior a 0,5 mm.

Para a obtenção da argamassa, o concreto foi peneirado na peneira de 4,8 mm, de acordo com a norma brasileira NBR 9832/92. O molde tronco cônico do equipamento de Vicat foi então preenchido com a argamassa resultante do peneiramento.

Para a avaliação da deformação por retração plástica empregou-se o aparato de ensaio de medida descrito abaixo:

- molde prismático metálico de dimensões de 7x7x50 cm;
- ancoragem da amostra nas extremidades do molde através de parafusos, sendo uma extremidade fixa e outra móvel para permitir o deslocamento horizontal do corpo-de-prova quando retrain;
- introdução de um transdutor de deslocamento LVDT, do termo *linear variable differential transducer*, fixado na placa metálica móvel em contato com a amostra de concreto;
- os dados eram coletados automaticamente por um equipamento digital de aquisição de dados, da marca Hewlett-Packard, modelo 34970A (Data Logger), conectado a um computador na qual tratava os dados coletados de variação de voltagem e os transformava em valor dimensional (mm), por meio do software Agilent BenchLink Data Logger 1.5, fornecido pelo próprio fabricante do equipamento de aquisição de dados.

Devido à deformação que poderia ocorrer na amostra pelo concreto ainda estar no estado fresco, as placas laterais foram retiradas somente ao iniciar a pega do sistema.

Um esquema do equipamento utilizado está mostrado na figura 41.

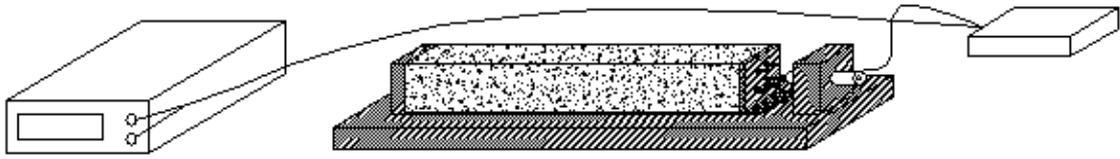


Figura 41: Equipamento de deformação linear por retração plástica

O ensaio de perda de água por exsudação foi realizado com base nas normas NBR NM 102/96 – Concreto e argamassa – Determinação da Exsudação – e MR 6 – Tendency of water to separate from mortars (bleeding).

Uma amostra do concreto produzido foi moldada em um recipiente de área circular, construído com um tubo de PVC de diâmetro de 200 mm, fixado com borracha de silicone numa base de vidro. A altura do tubo era de 10 cm, porém a amostra ocupou 7,5 cm da altura do tubo. A área da seção circular do tubo de PVC foi similar a área de exposição da amostra do ensaio de retração plástica. A altura foi determinada para manter um volume de amostra de concreto similar ao volume do molde de retração plástica.

As medidas da massa de água exsudada foram feitas em intervalos de 30 minutos, através da coleta de água da superfície da amostra moldada com uso de uma seringa. Imediatamente antes de cada coleta de água a amostra era inclinada para permitir que a água sobre a superfície se posicionasse toda em um mesmo local. Após a secagem da superfície, caracterizada pela não presença de água exsudada e coletada, o ensaio era parado e a amostra era descartada.

No ensaio de perda de água por evaporação a amostra de concreto foi moldada em um molde de vidro de mesmas dimensões do molde utilizado para as medidas da retração plástica, com 7x7x50 cm.

As medidas da quantidade de água evaporada foram tomadas através da comunicação de uma balança digital com um computador, via saída serial. O intervalo de leitura automática da massa do corpo-de-prova foi de 20 segundos. O registro dos dados foi realizado até 24 horas depois do contato inicial do cimento Portland com a água de amassamento.

A balança digital utilizada permitia pesagem até 10 kg, com precisão de 0,1 g. A precisão de leitura permitiu o registro da variação de massa de uma lâmina de água de até 2,86 $\mu$ m, de acordo com a área de exposição da amostra.

Medições da temperatura do concreto foram executadas através de 2 fios termopar, tipo K, inseridos na amostra. Os 2 fios ficavam posicionados equidistantes do centro da mesma amostra

prismática utilizada para o ensaio de evaporação. Os fios chegavam até a metade da altura do corpo-de-prova de concreto, ou seja, 3,5 cm.

A coleta dos dados foi feita através do mesmo equipamento de aquisição utilizado para a retração plástica e a calorimetria. O intervalo de tempo de 1 leitura foi de 20 segundos.

---

# **Capítulo 4 - Aspectos da cinética de umidade de materiais granulares reciclados: RCD e CZP**

---

O presente capítulo foi organizado com o objetivo de detalhar os resultados alcançados para um dos principais aspectos da utilização desses materiais reciclados granulares: a intensidade de absorção de água por capilaridade e perda de água por secagem ao ar.

Segundo o procedimento de migração de umidade por absorção capilar proposto, os resultados alcançados mostram a eficácia do aparato e a velocidade de resposta para a obtenção dos dados.

## ***4.1 Modo de ação do material granular reciclado como agregado: estudo das mesclas***

### **4.1.1 Absorção de água por capilaridade**

Na análise dos dados que segue, parte-se da hipótese de que a intensidade de absorção de água dos RES seja bastante superior ao do AGN, devido ao caráter poroso dos agregados reciclados de RCD e CZP, e este fato seja mais evidente quanto maior o teor de RES na amostra. Soma-se a essa característica a significativa influência da interpenetração das partículas de materiais diferentes que modifica a porosidade da mescla.

O ensaio de absorção capilar das mesclas realizado com o dispositivo proposto permitiu o monitoramento da água absorvida ao longo do tempo até sua estabilização. A sorptividade é determinada interpolando-se o valor do quanto de água capilar foi absorvida em função da raiz do tempo, isto é, o índice de absorção *versus* a raiz do tempo. Os pontos considerados são somente os do trecho linear da curva.

Através do ensaio de absorção pelo método proposto, conseguiu-se calcular índices que são utilizados para a análise e estão apresentados na tabela 18, que resume os dados que são extraídos do ensaio de absorção capilar com o aparato proposto.

Tabela 18: Parâmetros resultantes do ensaio de absorção de água por capilaridade

Dosagem	Umidade final do sistema $h_{abs}$ (%)	$\delta_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Água total absorvida (g)	Sorptividade S (g/cm <sup>2</sup> /√t)	
M500	19,2	2,641	96	0,13	
RCD	M450	20,5	2,616	107	0,16
	M400	21,9	2,603	111	0,14
	M350	22,9	2,589	115	0,14
	M300	23,3	2,575	114	0,14
	M250	24,6	2,563	115	0,13
	M200	23,9	2,546	112	0,14
	M150	26,8	2,532	120	0,14
	M100	28	2,517	125	0,15
	M50	29,5	2,501	128	0,13
	M0	30,6	2,486	130	0,1
CZP	M450	23,6	2,57	113	0,17
	M400	26,6	2,49	123	0,18
	M350	31,9	2,456	134	0,14
	M300	35,9	2,402	141	0,16
	M250	38,3	2,348	138	0,19
	M200	45,8	2,289	153	0,26
	M150	55	2,233	166	0,23
	M100	65,3	2,17	183	0,22
	M50	76,2	2,112	192	0,21
	M0	88,7	2,054	198	0,16

A análise do conteúdo de água absorvido ao final do ensaio revelou que o aumento da umidade final em relação ao aumento do percentual de RES, em substituição ao AGN, nas amostras apresentou um crescimento linear (figura 42).

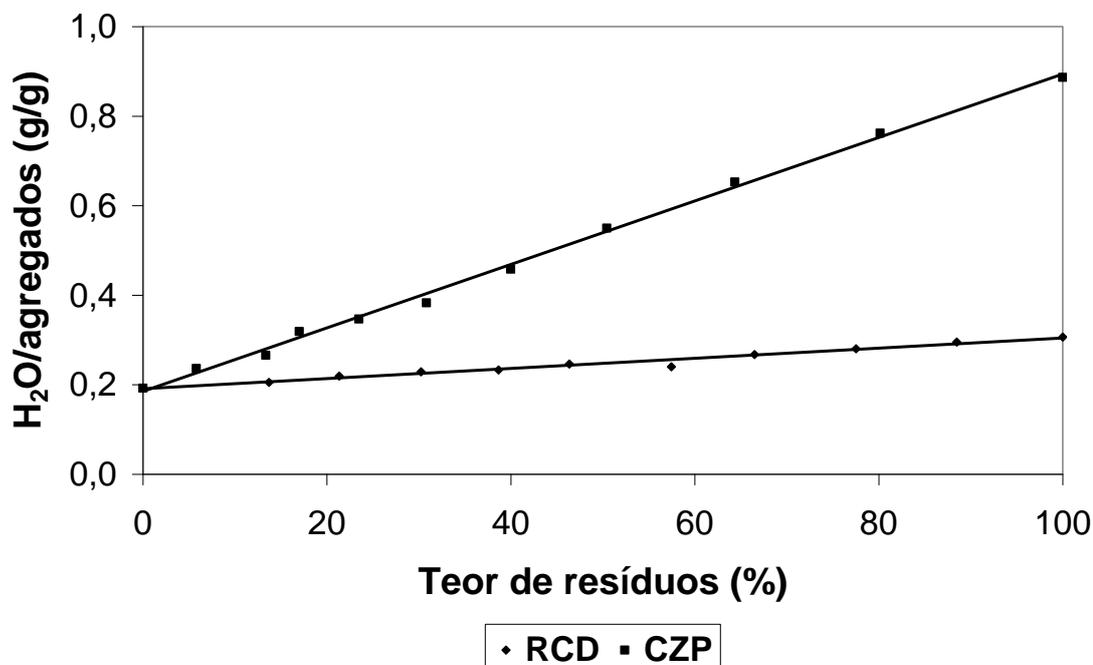


Figura 42: Quantidade de água absorvida nas amostras granulares com RES

Assim, pode-se afirmar que um aumento do teor de RES modifica a estrutura de distribuição das partículas em relação à amostra de material natural e modifica a configuração de vazios totais (entre grãos + porosidade do grão), que contribui para uma maior absorção capilar.

Nessa direção, é também necessário considerar a influência do tamanho do grão, que diminui com o aumento da quantidade de RES. O número importante de partículas menores do que 0,15 mm, com 16,7% para o RCD e de 29,1% para a CZP, resulta em elevação da área específica do sistema, acarretando maior demanda de líquido para promover a molhagem das partículas, ou seja, a água adsorvida superficial.

A figura 43 resume a influência do teor de RES incorporado na quantidade de água absorvida em relação ao material natural.

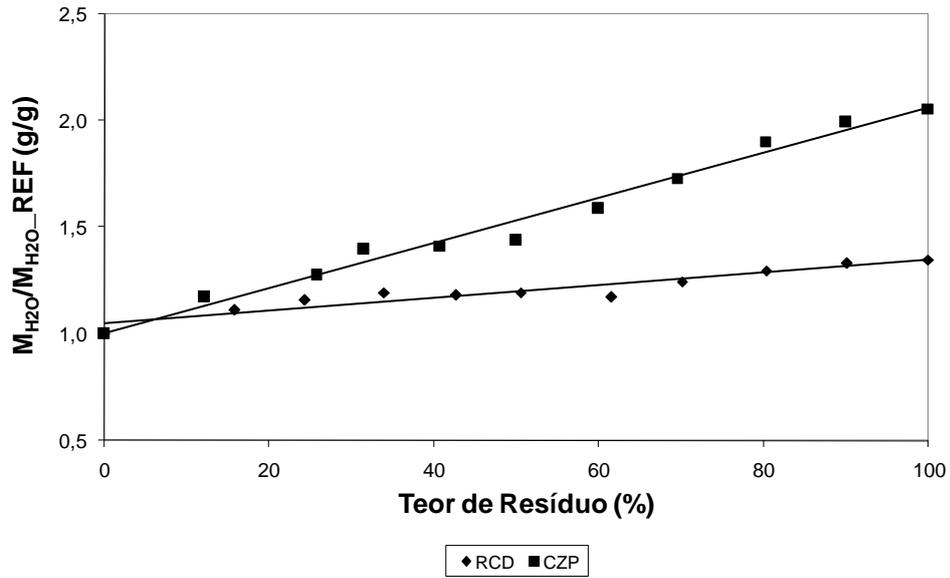


Figura 43: Relação água-mescla/água-referência no estudo com material granular

A intensidade e a cinética de absorção capilar foram avaliadas através do índice de absorção  $I_{abs\_H2O}$ , com as curvas típicas do ensaio mostradas nas figuras 44 e 45, que relaciona o índice com o tempo, das amostras de RCD e CZP nos teores de 0% (REF), 50% (M250) e 100% (M0). As demais curvas encontram-se no anexo 2.

Este índice é calculado relacionando o volume de líquido infiltrado por unidade de área da amostra em contato com o líquido, conforme a equação 19 abaixo.

$$I_{abs\_H2O} = \frac{V_{H2O}}{A_{anel}} \quad (19)$$

Onde,

$I_{abs\_H2O}$ : índice de absorção, em  $g/cm^2$

$V_{H2O}$ : volume de água absorvido da leitura do tubo de Mariotte, em g

$A_{anel}$ : área do anel metálico utilizado como volume padrão da amostra, em  $cm^2$

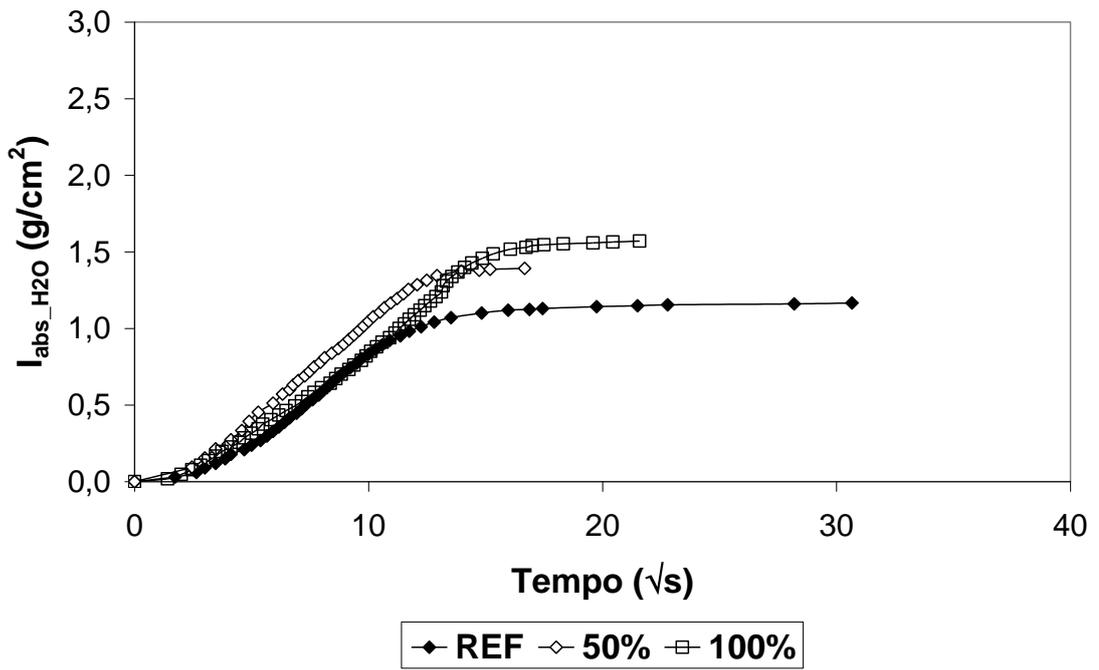


Figura 44: Curva típica do índice de absorção de água por capilaridade em amostras granulares – RCD

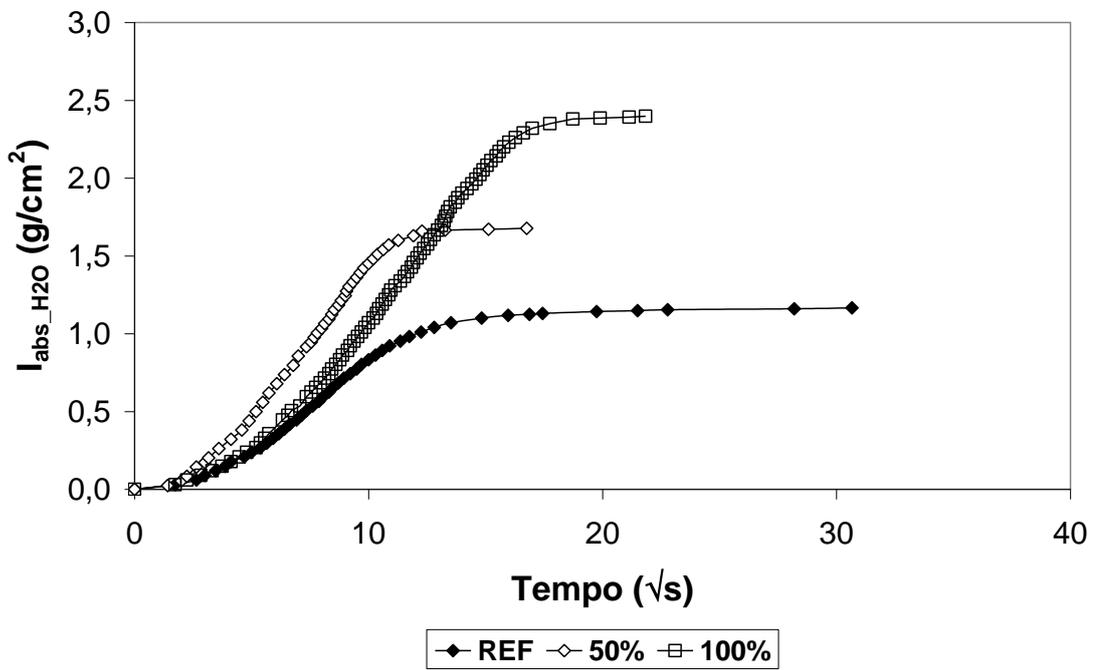


Figura 45: Curva típica do índice de absorção de água por capilaridade em amostras granulares – RCD

Percebe-se que o índice de absorção no tempo aumenta com o aumento do teor de RES na mescla. Isto indica que a intensidade de absorção capilar sofre influência do teor de RES na mescla. Dessa forma, pelas figuras, o aumento do índice de absorção é mais considerável quando a CZP foi utilizada, por resultar em um sistema com maior porosidade entre grãos, bem como maior intensidade de absorção do próprio grão, em comparação às mesclas com RCD.

Um parâmetro pertinente de avaliação é a maior inclinação na curva do índice de absorção pela raiz do tempo – sorptividade, como será considerado em seguida – levando a uma maior velocidade de absorção por capilaridade nas mesclas com RES, tanto maior quanto maior o teor.

Entre os materiais reciclados, as inclinações dos trechos retilíneos das curvas de absorção são maiores nas mesclas de CZP em relação ao RCD, novamente caracterizando a maior intensidade de absorção das mesclas de CZP.

Como os grãos de RES possuem uma porosidade que influencia a absorção capilar no ensaio para materiais granulares, torna-se interessante um estudo do comportamento de absorção frente ao teor de umidade natural presente nos RES no momento do ensaio nos teores investigados. As figuras 46 e 47 mostram os resultados desse estudo.

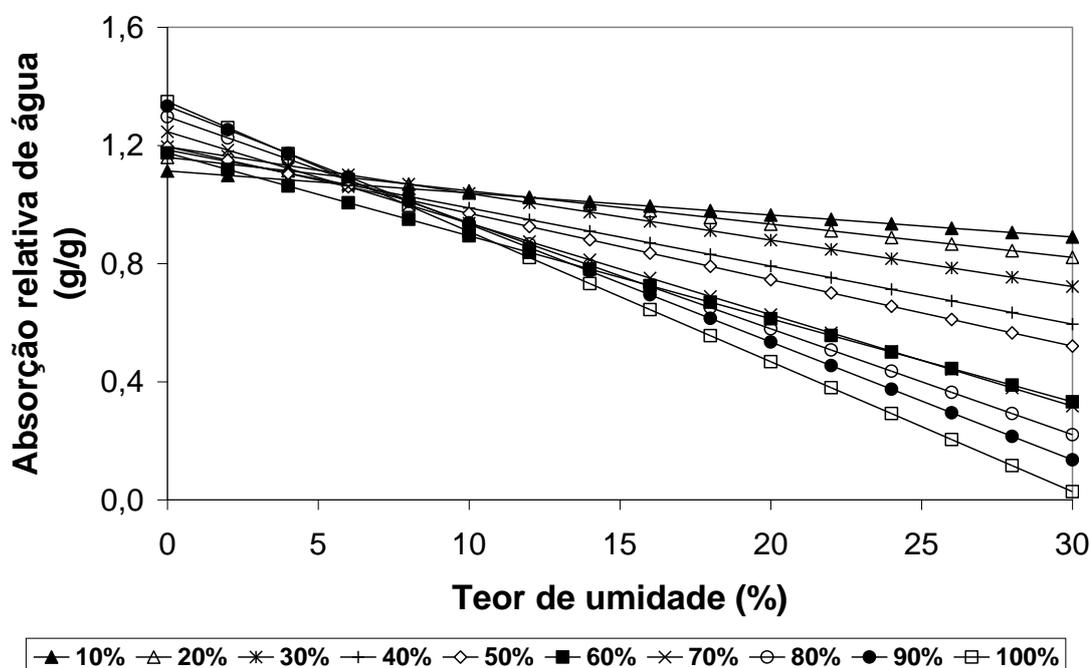


Figura 46: Intensidade de absorção de água em relação à amostra de referência e à umidade do agregado granular – RCD

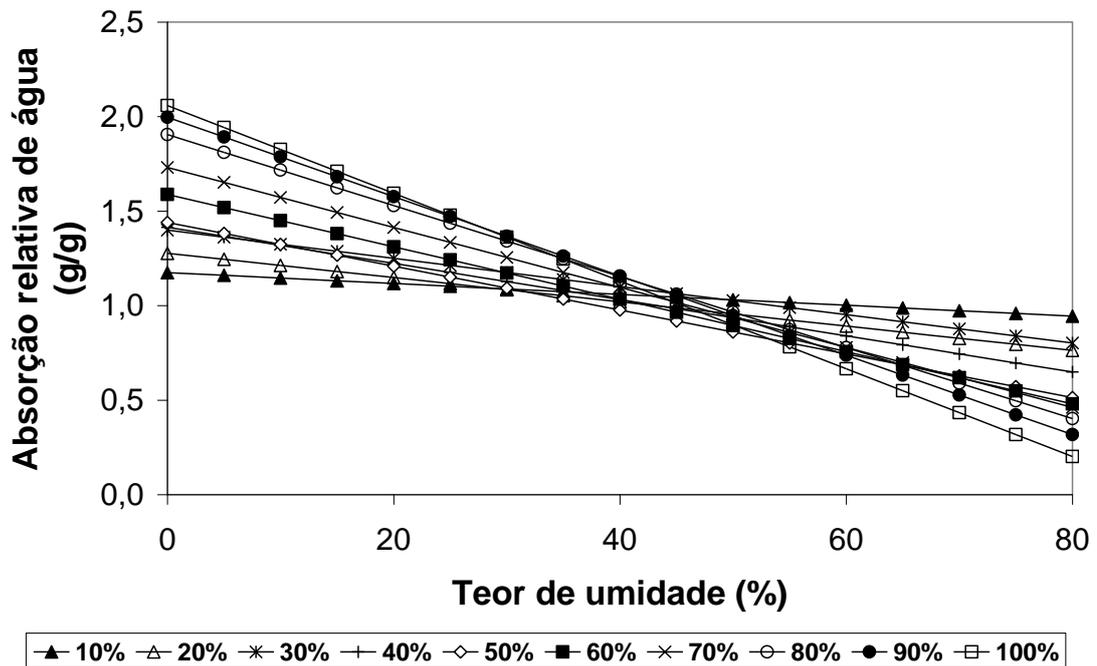


Figura 47: Intensidade de absorção de água em relação à amostra de referência e à umidade do agregado granular – CZP

Os dados que geraram as curvas das figuras 46 e 47, para a investigação da influência do teor de umidade, foram obtidos através de uma simulação numérica que levou em consideração os dados de absorção e a quantidade de água necessária para molhar uma quantidade de partículas de RES tomando-se o percentual de massa de material e o seu teor de substituição especificado, calculado através das equações 20 e 21.

$$Abs_i = m_{H_2O_x} \cdot \left( m_{RES_x} \cdot \frac{h_i}{100} \right) \quad (20)$$

Onde,

$Abs_i$  = absorção de água do RES no teor de umidade i, em g

$m_{H_2O_x}$  = massa de água total no teor de substituição x, em g

$m_{RES_x}$  = massa do resíduo no teor de substituição x, em g

$h_i$  = teor de umidade i, em %

$$Abs_{rel} = \frac{Abs_i}{Abs_{ref}} \quad (21)$$

Onde,

$Abs_{rel}$  = absorção relativa de água do RES no teor de umidade i, em %

$Abs_{ref}$  = absorção de água da referência M500, em g

Os resultados da simulação numérica mostram que há uma relação linear entre o teor de umidade presente nos RES e a quantidade de água absorvida pela mescla em relação à amostra de referência com areia natural.

Confirmando afirmações anteriores, a influência do teor de RES no comportamento da absorção capilar é bastante significativa, já que, com o aumento da umidade natural do grão de RES (água já absorvida), a tendência é de que menor quantidade de água será necessária ser adicionada.

Através do ensaio de absorção capilar para o teor de 100% de CZP, a umidade fica acima de 80% e, na amostra M0 RCD, este valor de umidade absorvida é de 30%.

No caso das mesclas de CZP, para os valores de umidade de aproximadamente 50%, em massa de material, a quantidade de água absorvida por capilaridade praticamente é igual à quantidade absorvida pela amostra de referência M500. Ou seja, a demanda de água necessária para qualquer teor de CZP, com o material a 50% de umidade, seria igual à demanda de água da amostra M500 com 0% de substituição natural/resíduo. Já para as mesclas com RCD, o teor de umidade que iguala as demandas de água das mesclas e do natural é de 8%.

Estas considerações fornecem uma informação importante para estimativas de consumo de água em concretos e argamassas que utilizem os RES analisados.

Outro parâmetro importante a ser considerado é a quantidade de água absorvida para valores elevados de umidade natural. Para a CZP, com valores de umidade da ordem de 80%, a quantidade de água absorvida na amostra com 100% foi de aproximadamente 20% da quantidade total absorvida pela amostra referência. Isto é, ter-se-ia menos água absorvida na amostra de 100% CZP do que a amostra com 100% de areia natural. Já nas mesclas com RCD, com a umidade total de absorção de 30%, conforme resultado do ensaio de absorção capilar, o percentual da quantidade de água da amostra referência foi de 3%, onde se teria praticamente toda a água necessária para o mesmo volume equivalente de material contida na parcela de RCD.

As figuras 48 a 51, apresentadas a seguir, complementam todas as discussões feitas nos parágrafos anteriores. Estas figuras mostram as relações entre o tempo e as velocidades de absorção,  $dx/dt_{\text{abs\_H2O}}$  e as taxas de absorção  $dI/dt_{\text{abs\_H2O}}$ . Nota-se que, à medida que o teor de RES é aumentado, há um aumento na velocidade de absorção e na taxa de absorção, com maiores valores para os maiores teores.

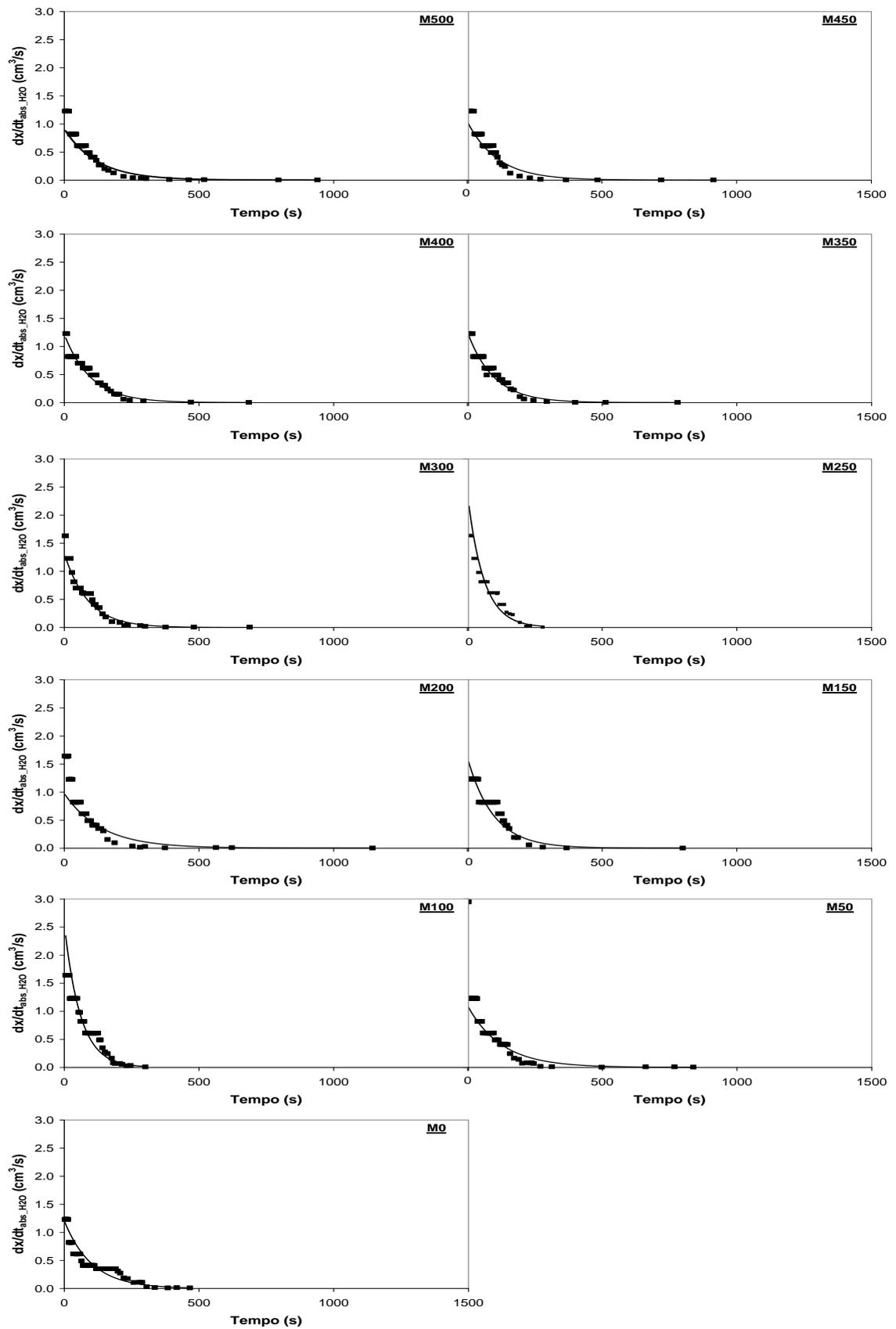


Figura 48: Velocidade de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados – RCD

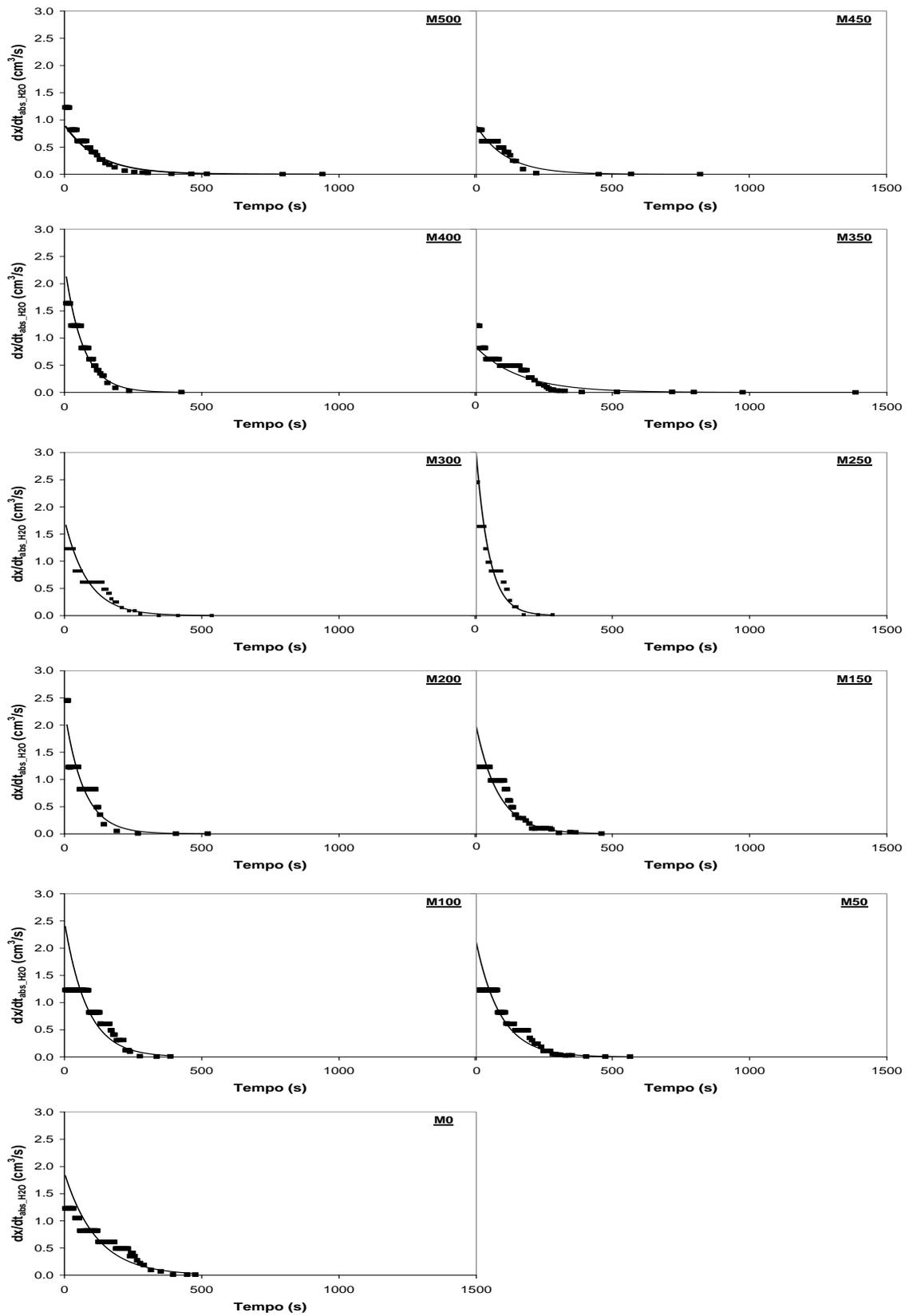


Figura 49: Velocidade de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados – CZP

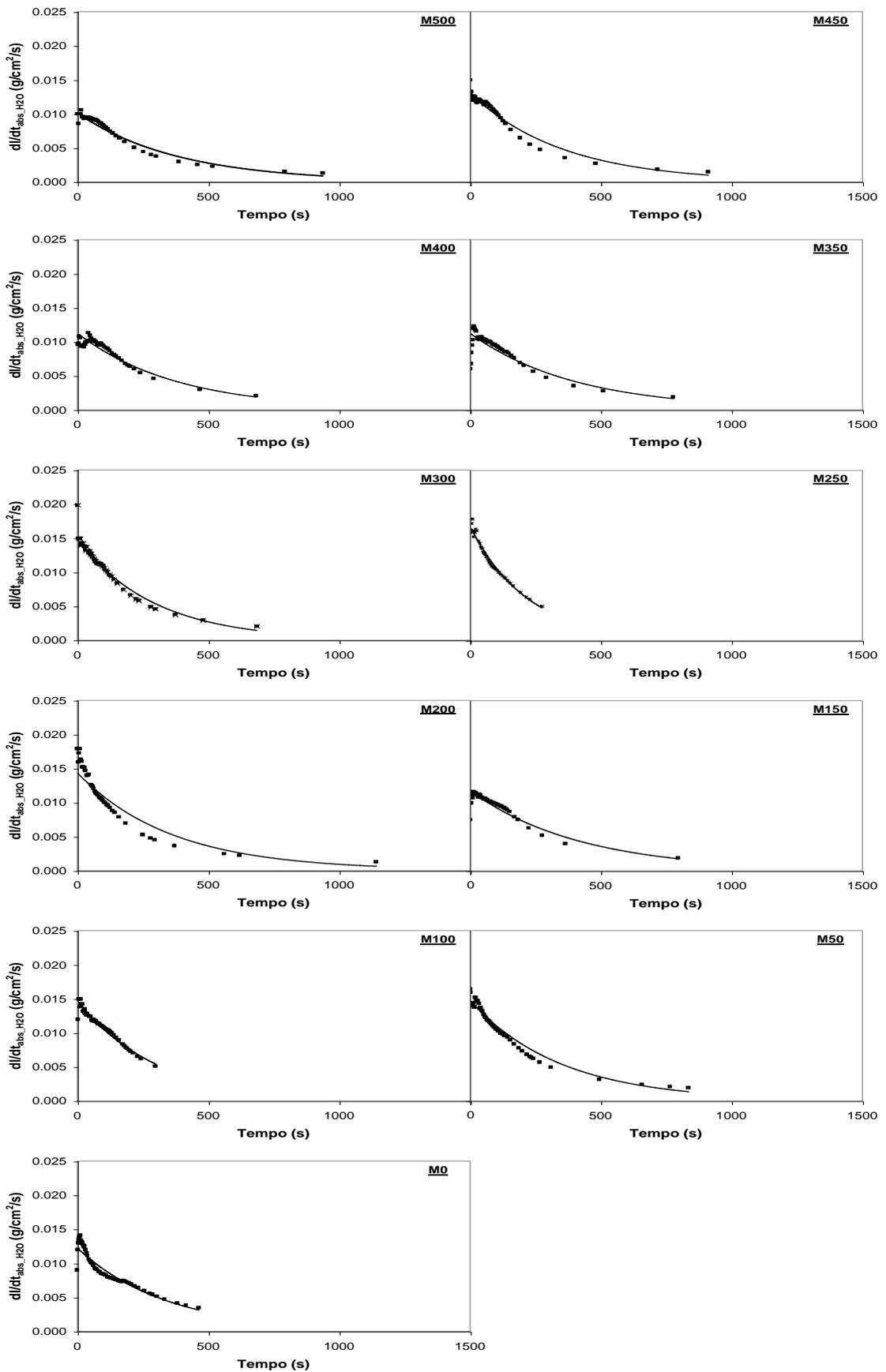


Figura 50: Taxa de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados –RCD

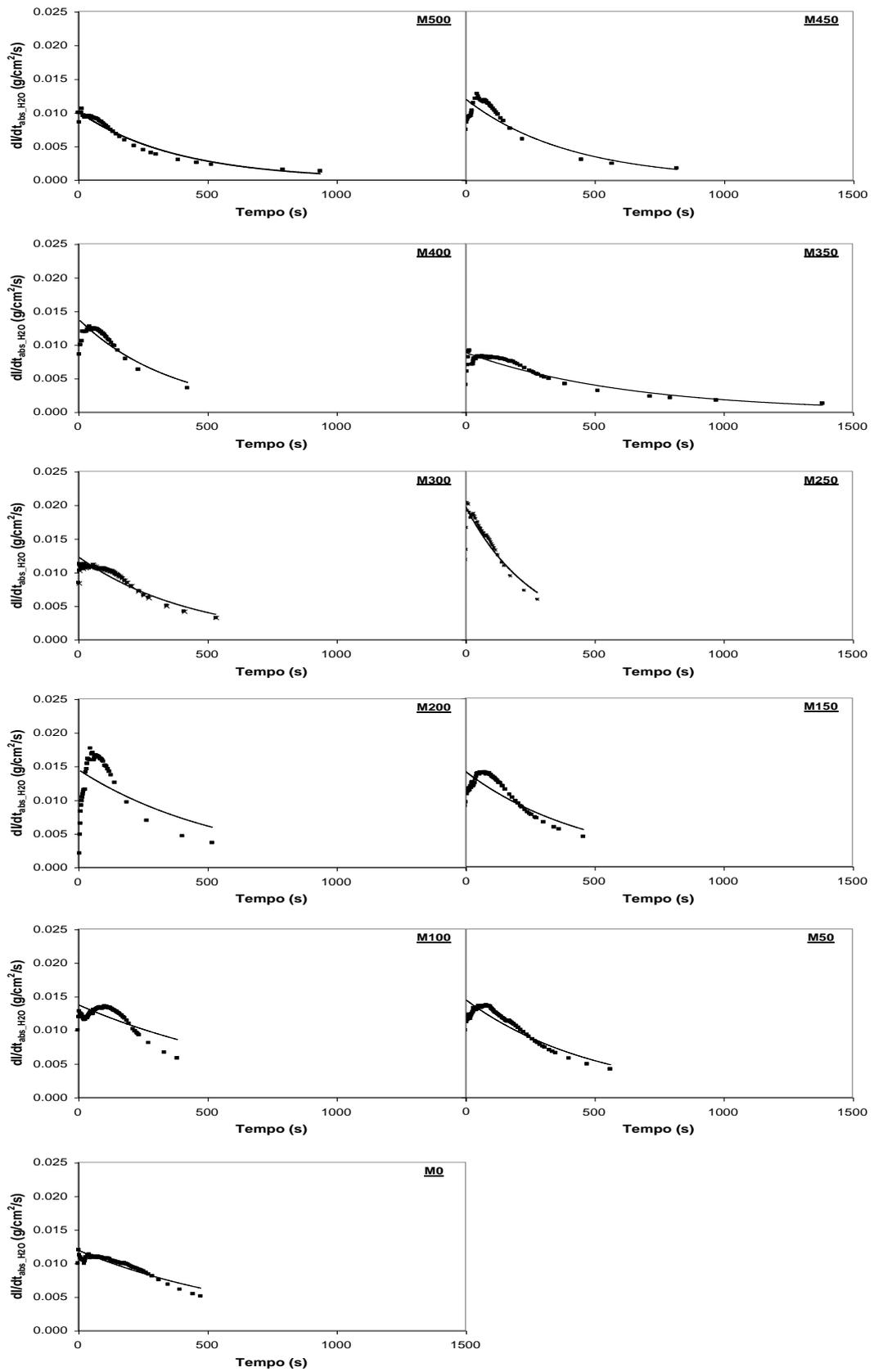


Figura 51: Taxa de absorção de água por capilaridade nos agregados granulares reciclados – CZP

### 4.1.2 Perda de água por secagem ao ar

Para melhor entendimento do comportamento da cinética de umidade nas mesclas natural/resíduo, um estudo da perda do conteúdo de umidade absorvido no ensaio de absorção capilar foi realizado utilizando-se as amostras compostas com CZP. As mesclas com RCD não foram consideradas para o ensaio de secagem ao ar.

Logo após atingir o nível de absorção total durante o ensaio de capilaridade proposto, cada amostra foi cuidadosamente retirada do aparato de ensaio e colocada em um ambiente climatizado com temperatura e umidade relativa controladas em  $23\pm 1^{\circ}\text{C}$  e  $65\pm 5\%$ , respectivamente. A perda de água foi determinada por pesagem da amostra em uma balança digital de 5000g, com precisão de 0,1 g. O ensaio nas amostras submetidas à secagem ao ar transcorreu até alcançar o equilíbrio higroscópico para uma área de exposição igual à área de contato no ensaio de absorção capilar.

Na tabela 19, pode-se verificar a eficiência dos testes até atingir o equilíbrio higroscópico levando-se em consideração a quantidade de água absorvida mostrada na tabela 18. Quando o somatório dos valores da umidade da coluna após o ensaio e após estufa for diferente da umidade da coluna total significa que a perda de material sólido no transporte da amostra do aparato de absorção de água para a secagem ao ar. Caso a diferença seja maior significa que houve imperfeição na execução do ensaio.

Tabela 19: Teor de água perdido na secagem ao ar das mesclas com CZP

Dosagem	Teor de água perdido na secagem ao ar $h_{\text{sec}}$ (%)		
	Após ensaio	Após estufa	Total
M500	19,2	0,0	21,3
M450	23,5	0,1	23,6
M400	28,7	0,1	28,7
M350	31,4	0,1	31,4
M300	35,6	0,1	35,7
M250	38,1	0,2	38,3
M200	45,8	0,0	45,8
M150	52,3	0,2	52,6
M100	60,5	0,2	60,7
M50	71,2	0,3	71,5
M0	80,6	0,5	81,1

A figura 52 apresenta o índice de secagem para os teores de 0% (REF), 50% (M250) e 100% (M0), da mesma forma que considerado na absorção capilar, porém com o tempo em horas h, já que a velocidade do fenômeno de secagem ao ar, nas condições especificadas, somente se dá ao longo de um intervalo grande de tempo, não comparável com o tempo do ensaio de absorção capilar. As demais curvas estão apresentadas no anexo 3.

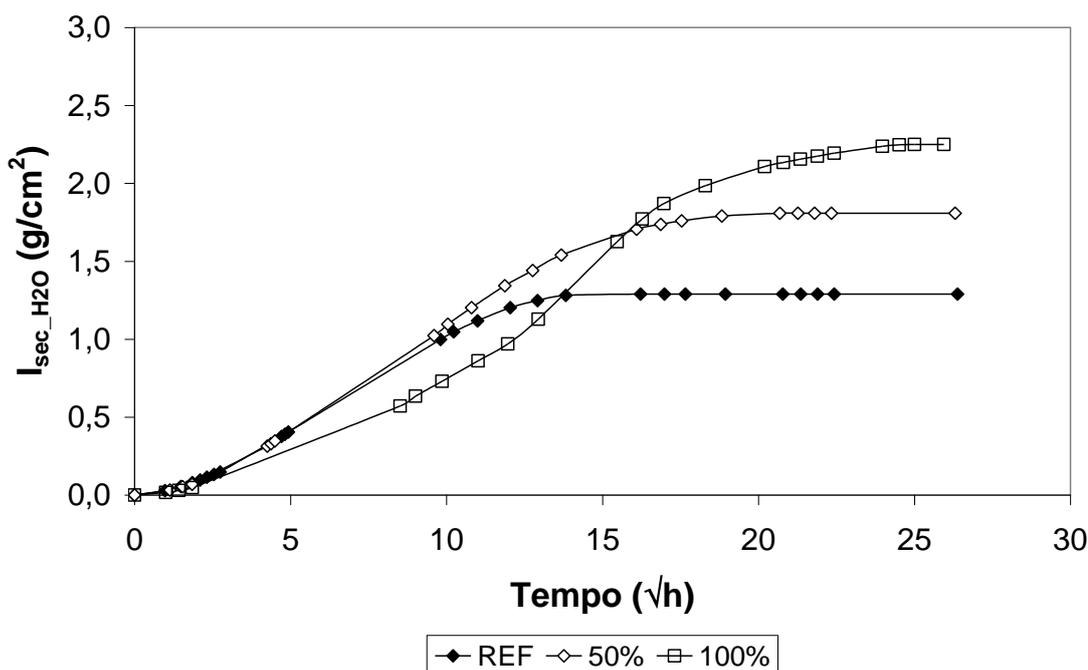


Figura 52: Perda de água por secagem ao ar de amostras granulares – CZP

Como no caso da absorção capilar, a perda de água por secagem ao ar foi fortemente influenciada pela CZP no sistema. Com o aumento no teor de CZP, a quantidade de água que ingressou nas mesclas aumentou. Conseqüentemente, uma maior quantidade de água foi perdida até se atingir o equilíbrio higroscópico no sistema. Entretanto, analisando as curvas do índice de perda de água por secagem ao ar (figura 52), observa-se que, entre as curvas, não há diferença expressiva da amostra referência M500 e as amostras mesclas com CZP durante o trecho linear das curvas, sendo as inclinações bastante semelhantes.

Cita-se ainda o fato de que a secagem, no trecho linear das curvas, é mais lenta para maiores teores de CZP em relação a M500, atribuindo-se à absorção do grão poroso essa característica,

quando o esperado seria o oposto. As figuras 53 e 54, que relacionam a velocidade e taxa de secagem das mesclas, confirmam essa tendência.

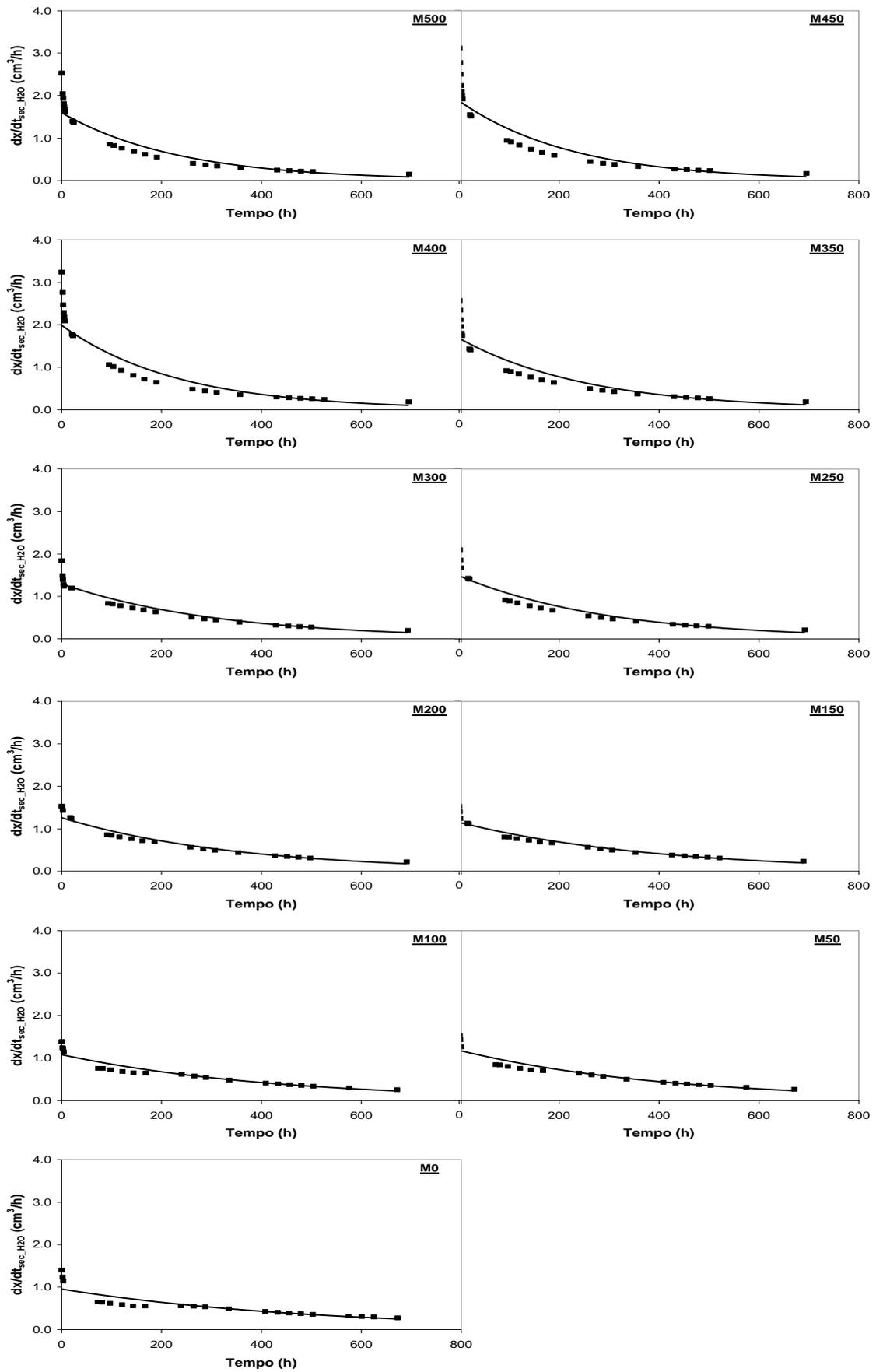


Figura 53: Velocidade de perda de água por secagem ao ar nos agregados granulares reciclados – CZP

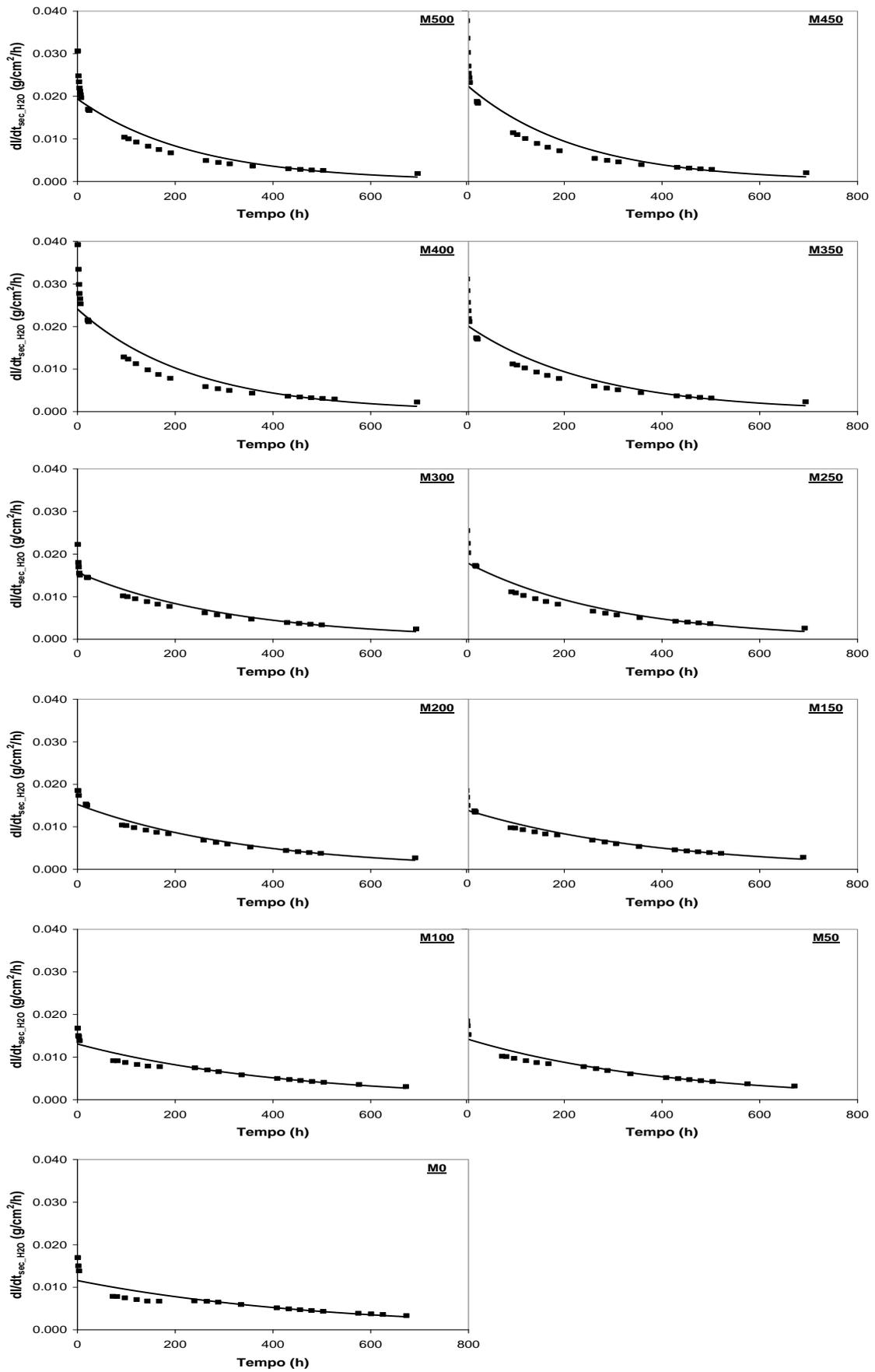


Figura 54: Taxa de perda de água por secagem ao ar nos agregados granulares reciclados – CZP

## *4.2 Modo de ação de materiais granulares reciclados em concreto: cinética de absorção e perda de água*

Buscando-se evidenciar o comportamento hídrico dos RES como agregado miúdo em substituição ao AGN observado nos processos de ingresso de água por capilaridade e de perda de água por secagem ao ar nas amostras granulares de materiais reciclados, um estudo em concretos foi executado.

A tabela 20 apresenta os resultados das dosagens de duas séries de concretos, CRT3 e CRT4, que foram estabelecidos para a análise da cinética de umidade. Estes concretos foram produzidos para a verificação da cinética de umidade e não formam as dosagens que serão utilizadas no estudo dos parâmetros que influenciam a retração plástica de concretos. Vale ressaltar ainda que, nos concretos, utilizou-se somente CZP para fins de comparação com os resultados do material granular reciclado.

Tabela 20: Dosagem e propriedades dos concretos de CZP – estudo preliminar

Dosagem kg/m <sup>3</sup>	Concreto									
	0% CRT	CRT3				CRT4				
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%	
<b>Cimento</b>	304	305	301	295	299	323	334	356	386	
<b>Areia natural</b>	912	686	452	221	0	727	501	267	0	
<b>CZP</b>	0	145	287	422	570	103	212	340	441	
<b>Agregado graúdo</b>	806	808	798	782	792	856	885	943	1023	
<b>Água</b>	219	277	336	373	378	245	272	303	323	
<b>Teor de argamassa (%)</b>	64	64	63	63	61	62	60	57	53	
<b>Massa específica* (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fresco</b>	2238	2177	2090	1964	1869	2220	2138	2109	2040
	<b>Seco 1 dia</b>	2220	2157	2052	1927	1815	2197	2128	2092	2004
	<b>Seco 28 dias</b>	2170	2077	1952	1768	1625	2131	2051	1991	1888
<b>Resistência à compressão* (MPa)</b>	<b>3d</b>	15,9	12,5	9,9	6,3	4,2	19,5	17,0	16,1	21,2
	<b>28d</b>	28,4	23,2	18,0	11,5	8,6	27,2	28,5	26,1	32,6
	<b>90d</b>	32,0	25,7	23,0	14,9	12,5	32,1	35,9	32,7	38,4
<b>Módulo de elasticidade* (GPa)</b>	<b>3d</b>	17,1	14,8	10,3	8,3	7,1	19,7	18,0	16,8	17,5
	<b>28d</b>	25,8	22,1	19,2	12,6	8,9	24,0	22,8	22,7	21,2
	<b>90d</b>	26,1	26,0	23,8	19,1	11,6	27,4	27,3	25,2	26,9

\* Nota: Cada resultado de ensaio é a média de ensaio com três amostras de cada concreto

0% CRT – concreto referência

Em relação às duas séries CRT3 e CRT4, o projeto de proporcionamento dos materiais para os concretos com CZP seguiu duas hipóteses de cálculo devido à presença de umidade natural na CZP: a primeira referente à disposição de toda a quantidade de água da umidade natural da CZP para a mistura como água para a trabalhabilidade. Esta série recebeu a notação de CRT3, onde a quantidade de material sólido foi corrigida em função da umidade presente, propondo assim que toda a água de umidade migrou para a mistura. A segunda hipótese se referiu à capacidade de manutenção de toda a água da umidade natural como água absorvida, sem liberação dessa para funcionar como água de mistura. Hipótese tal que considera a CZP funcionando como uma partícula fechada à liberação da água de umidade, pelo menos durante a mistura. Os concretos dessa série receberam a notação CRT4.

Sendo assim, diferentes resultados de proporcionamento foram obtidos conforme a tabela 20. Como nessa fase não se utilizou um aditivo redutor de água para atingir a consistência estabelecida, a quantidade de água variou, provocando variação na quantidade de cimento.

#### **4.2.1 Perda de água por secagem ao ar em concretos de CZP**

No estudo da perda de água por secagem ao ar, corpos-de-prova foram moldados a partir dos concretos produzidos em moldes metálicos de 100x200 mm, diâmetro e altura, respectivamente. As medições da perda de massa pela saída da água por secagem ao ar iniciaram após a retirada das amostras dos moldes ao fim de 24 horas após a produção do concreto, caracterizando o tempo zero das medições. Essas medidas foram tomadas através de pesagens sucessivas dos corpos-de-prova em balança digital de capacidade de 5000g e precisão de 0,1 g. As medições foram realizadas durante um período de 28 dias.

As condições de exposição foram as mesmas do ensaio de secagem em material granular, com temperatura de  $23\pm 1^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $65\pm 5\%$ .

As figuras 55 e 56 mostram que a variação nos resultados é devida, principalmente, ao estado de umidade das amostras, em que o aumento na quantidade de água fez elevar a quantidade de água por secagem ao ar.

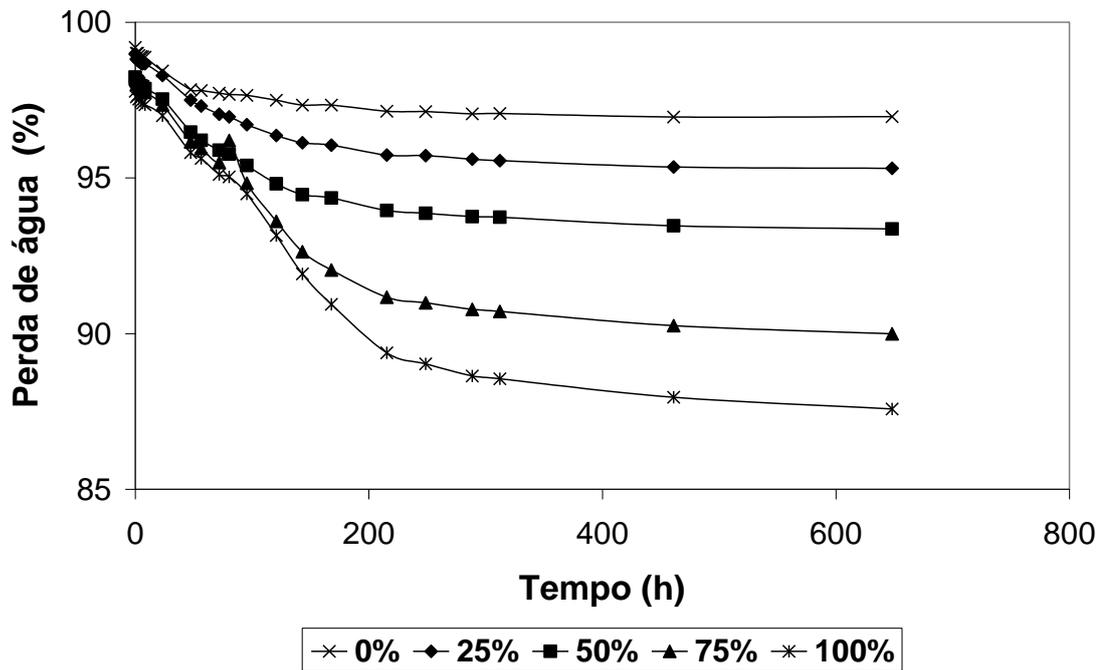


Figura 55: Percentual de perda de água por secagem ao ar em relação à massa total do corpo-de-prova dos concretos CRT3

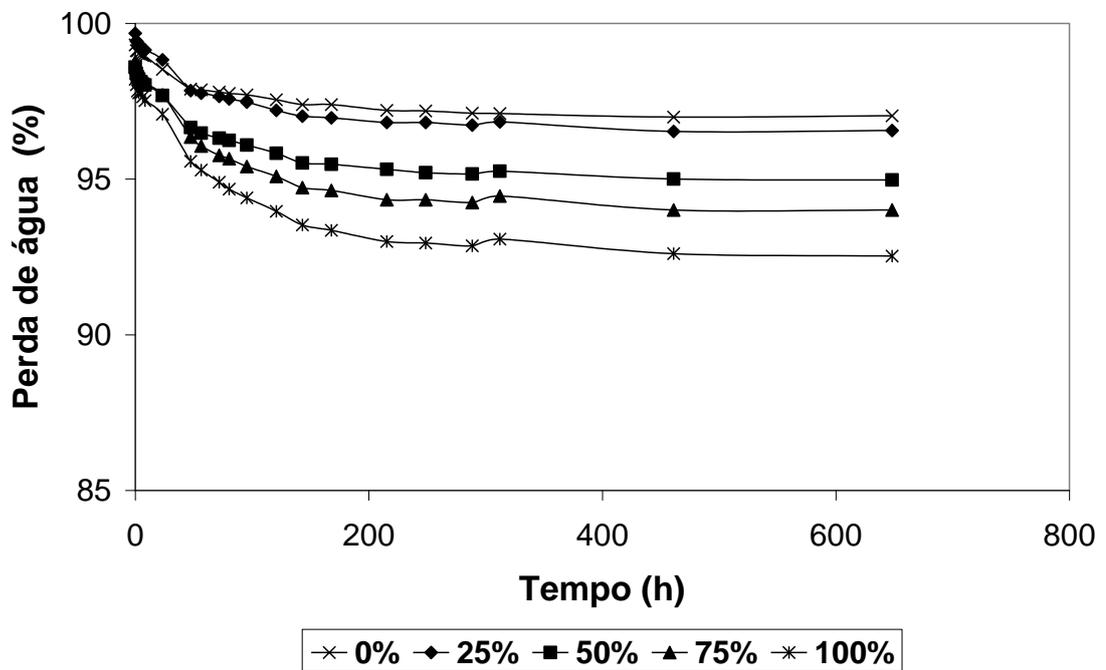


Figura 56: Percentual de perda de água por secagem ao ar em relação à massa total do corpo-de-prova dos concretos CRT4

Essas figuras mostram também que quanto maior o teor de CZP maior a perda de água por secagem, já que há um aumento da quantidade de água na mistura com o aumento do teor de CZP, para ambas as séries CRT3 e CRT4.

Devido ao aumento da conectividade e à alta relação a/c, que são fatores que resultam em aumentos dos valores de perda de água por secagem ao ar, pode-se concluir que o aumento do teor de CZP contribui para uma melhor conexão dos poros capilares. Essa afirmação está confirmada com os resultados dos ensaios de absorção capilar.

É importante salientar que parte da água também foi consumida pela hidratação do cimento Portland e não esteve disponível para ser perdida por secagem ao ar, conforme ensaio.

#### **4.2.2 Absorção de água por capilaridade em concretos de CZP**

As amostras utilizadas nos ensaios de perda de água por secagem ao ar, logo após o fim do ensaio, seguiram para estufa para a retirada da quantidade de água que ainda permaneceu após o período de secagem ao ar. A secagem forçada em estufa foi realizada a uma temperatura de 50°C até se obter uma massa do corpo-de-prova igual entre duas pesagens consecutivas, com uma medida a cada dia.

Assim, retirava-se a água livre das amostras e mantinha-se a mesma idade de cura, já que a essa temperatura o processo de hidratação pode ser considerado ideal para a secagem da amostra, conforme ANDRADE, 2004.

O equipamento para o ensaio de absorção de água por capilaridade dos corpos-de-prova retirados dos concretos foi o mesmo utilizado para os ensaios com amostras granulares, com a mesma área de exposição de diâmetro de 100 mm.

O parâmetro de ingresso de água chamado índice de absorção, já considerado no estudo com material granular, foi calculado também para os concretos de CZP submetidos à absorção por capilaridade. A figura 57 apresenta os resultados obtidos dos concretos CRT3 e CRT4.

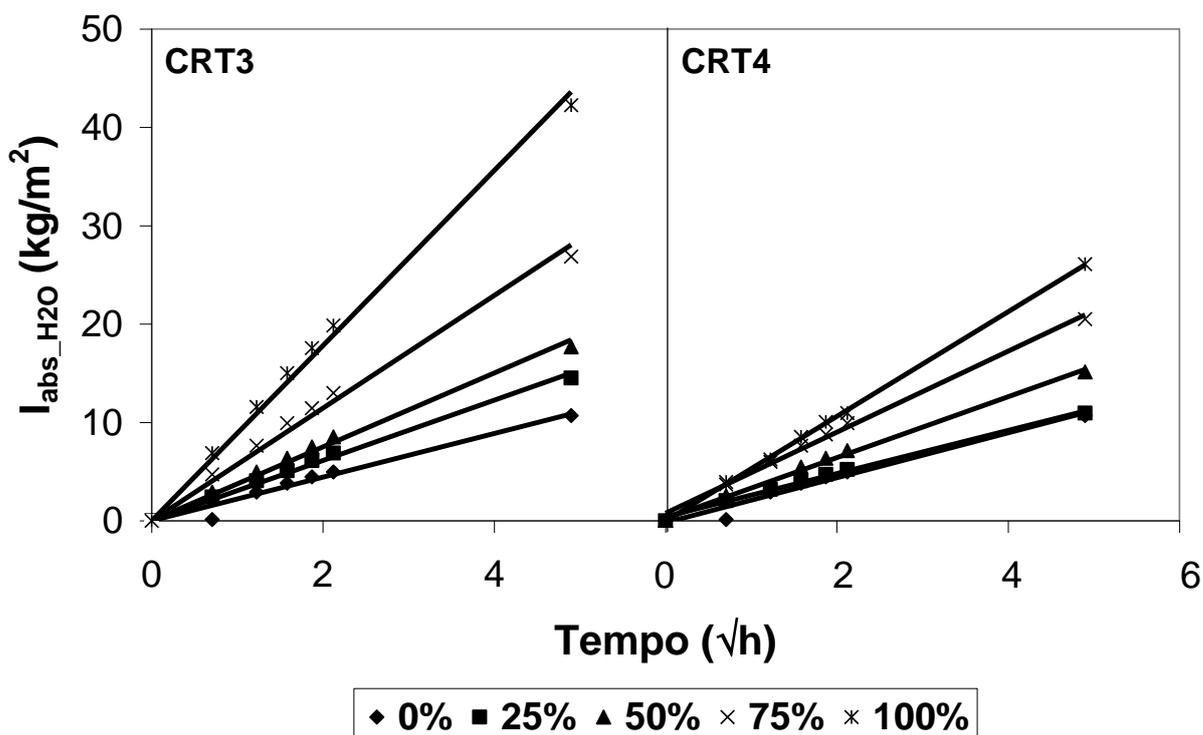


Figura 57: Absorção de água por capilaridade dos concretos de CZP: CRT3 e CRT4

A figura 57 mostra a forte influência que a CZP exerce na distribuição da rede capilar. Isso é devido não somente ao significativo aumento da relação a/c final, quando o teor de CZP aumenta, mas também ao aumento da quantidade de CZP disponível. Isto conduz a uma modificação na configuração da rede capilar em relação ao concreto referência por contribuir com partículas de diâmetros menores, porosas e de formas irregulares suficientes para influenciar a demanda de água.

Com as medições da quantidade do líquido de absorção, pode-se calcular o coeficiente de sorptividade, ou simplesmente sorptividade, através da equação 22. Contudo, a sorptividade corresponde somente ao trecho linear da curva.

$$I_{abs\_H2O} = S \cdot \sqrt{t} \quad (22)$$

Onde,

$I_{\text{abs\_H}_2\text{O}}$ : índice de absorção de água, em  $\text{kg/m}^2$

S: coeficiente de sorptividade, em  $\text{kg/m}^2/\sqrt{\text{h}}$

t: tempo, em h

Sabe-se que um aumento na quantidade de água total na mistura tende a formar um sistema no qual parte dessa água estará presente como água livre e, conseqüentemente, o sistema terá uma maior porosidade.

Quando a hidratação do cimento inicia, uma redução da quantidade de água interna é também iniciada, sendo parte como água de constituição quimicamente ligada aos hidratos. Outra parte é perdida por exsudação e evaporação, sendo esses fenômenos dependentes das características da mistura, dos materiais constituintes e das condições ambientais.

Assim, um aumento na quantidade de água na mistura leva a um aumento da quantidade de água que poderá ser perdida, e conseqüentemente, a um aumento no valor da absorção capilar.

Pela análise dos teores de CZP nas séries CRT3 e CRT4, nota-se que somente o concreto 25% CRT4 obteve um resultado semelhante ao concreto referência 0% CRT. Todos os outros teores das duas séries resultaram em valores maiores, sendo próximos, CRT4, ou distantes, CRT3.

De acordo com as considerações propostas, pode-se afirmar que a presença de CZP nos concretos contribui determinadamente para o aumento da absorção capilar. Porém não somente com o aumento da relação a/c total, considerando as condições de umidade inicial da CZP. Ocorre que são dois fatores atuantes que conduzem a uma mudança significativa na estrutura capilar (tamanho e conectividade dos poros): aumento da demanda de água pela forma e tamanho dos grãos, e pela absorção dos grãos porosos.

A tabela 21 apresenta os valores dos coeficientes de sorptividade dos concretos de CZP.

Tabela 21: Coeficiente de sorptividade dos ensaios com água e álcool dos concretos de CZP  
Coeficiente de sorptividade ( $\text{kg/m}^2/\text{h}^{1/2}$ )

Concreto	Ensaio com água					Ensaio com álcool				
	0%	25%	50%	75%	100%	0%	25%	50%	75%	100%
CRT3	2,2	3,1	3,8	5,7	8,9	1,1	1,4	1,8	2,8	4
CRT4		2,3	3,2	4,4	5,3		1,2	1,4	1,9	2,2

De acordo com a análise das características do material, a CZP possui um alto teor de partículas finas menores do que 0,15mm em relação à areia natural, com 90% a mais de partículas (29,1%) em relação à areia natural (3%). Portanto, maiores teores de CZP melhoram o efeito de preenchimento de vazios, levando à diminuição dos diâmetros dos poros capilares, com uma velocidade de absorção capilar maior.

Por outro lado, sendo a CZP um elemento que demanda alta quantidade de água pela forte irregularidade da superfície de exposição e pela sua característica porosa, há igualmente uma alta demanda de água total na mistura, elevando a quantidade de água absorvida por capilaridade.

A partir da representação esquemática, mostrada na figura 58, da ascensão de uma franja capilar num poro, nota-se que existe um ângulo de contato entre a parede sólida do poro e do líquido penetrante. Se forem levadas em consideração as características do material e do líquido, tais como viscosidade, densidade e tensão superficial, pode-se prever que qualquer variação nessas características resultará em uma mudança no ângulo de contato. Sendo assim, o ensaio de absorção capilar pode ser executado para um mesmo material, e, por conseguinte, para uma mesma configuração capilar, utilizando dois líquidos diferentes para a obtenção de um ângulo de contato relativo ou aparente entre o líquido principal e o líquido base.

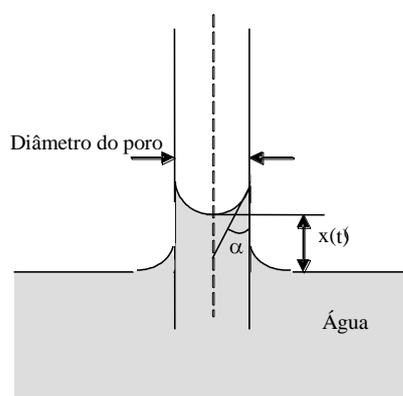


Figura 58: Modo de transporte da água por capilaridade em um poro

Nessa pesquisa, os dois líquidos empregados para o cálculo do ângulo de contato aparente são: a água, como líquido principal, e o álcool, como líquido base. O álcool, quando utilizado para ensaio de penetrabilidade em meios porosos, caracteriza-se por possuir molhabilidade perfeita, resultando num ângulo de contato aproximadamente igual a zero  $\alpha = 0^\circ$ , segundo MEROUANI (1987).

O ensaio de absorção capilar com álcool como líquido penetrante resultou em menores valores de ganho de massa para as duas séries CRT3 e CRT4, em relação ao ensaio com água, segundo a figura 59.

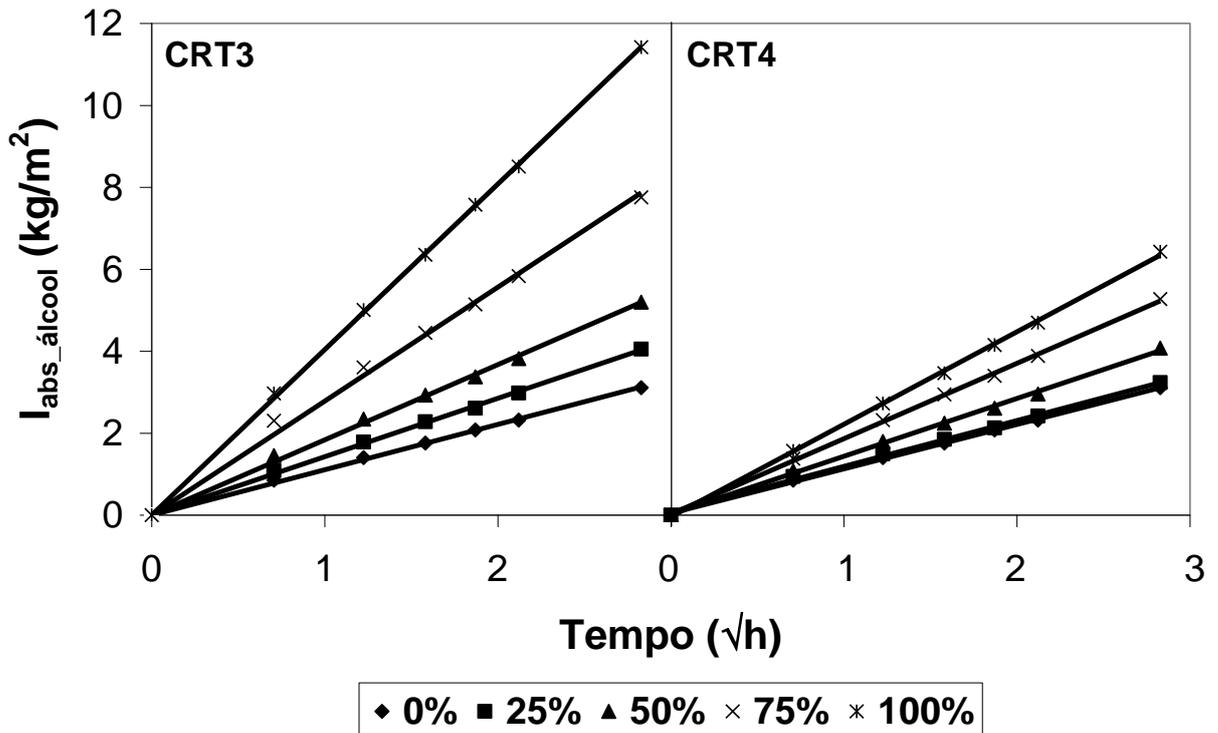


Figura 59: Absorção de álcool por capilaridade dos concretos de CZP

Para o cálculo do ângulo de contato aparente, as equações 23 e 24 foram utilizadas. A tabela 22 apresenta as constantes características dos líquidos utilizados nas equações 23 e 24.

$$\cos \alpha_{H_2O} = \left( \frac{S(t)_{H_2O}}{S(t)_{alc}} \right)^2 \frac{\mu_{H_2O} \times \sigma_{alc}}{\mu_{alc} \times \sigma_{H_2O}} \quad (23)$$

Onde,

$\alpha_{H_2O}$ : ângulo de contato aparente, em °;

$\mu_{H_2O}$ : viscosidade dinâmica da água, em centipoises;

$\mu_{alc}$ : viscosidade dinâmica da álcool, em centipoises;

$\sigma_{H_2O}$ : tensão superficial água/ar, em dinas/cm;

$\sigma_{alc}$ : tensão superficial álcool/ar, em dinas/cm;

$S(t)_{H_2O}$ : inclinação da reta do gráfico de relação entre o estoque de água infiltrada  $S(t)_{H_2O}$  e a raiz quadrada do tempo, em cm;

$S(t)_{alc}$ : inclinação da reta do gráfico de relação entre o estoque de álcool infiltrado  $S(t)_{alc}$  e a raiz quadrada do tempo, em cm.

$$S(t) = \frac{m(t) - ms}{\rho_l \cdot A} \quad (24)$$

Onde,

$S(t)$ : estoque de líquido infiltrado, em cm;

$m(t)$ : massa da amostra no tempo t, em g;

$MS$ : massa da amostra seca em estufa, em g;

$\rho_l$ : densidade do líquido, em g/cm<sup>3</sup>;

$A$ : área da seção transversal da amostra em contato com o líquido = 78,54 cm<sup>2</sup>.

Tabela 22: Constantes características dos fluidos do ensaio de absorção capilar (T=20°C)

Líquido	$\sigma$ (dinas/cm)	$\mu$ (centipoises)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Água	72,75	1,005	1
Álcool	23,04	1,2	0,789

Os resultados dos ângulos de contato aparente dos concretos de CZP estão mostrados na tabela 23.

Tabela 23: Ângulo de contato aparente dos concretos de CZP

Concreto	CZP	Ângulo de contato aparente $\alpha_c$
	0%	49°
CRT3	25%	46°
	50%	35°
	75%	22°
	100%	21°
CRT4	25%	47°
	50%	46°
	75%	46°
	100%	37°

Como o ângulo de contato aparente possui relação inversamente proporcional à inclinação da curva da posição do menisco, ângulos de contato aparente menores significam uma molhabilidade melhor, mais próxima dos valores com álcool. Isso significa que as misturas com ângulos maiores tendem a apresentar frentes capilares mais avançadas, porém com menores quantidades de líquido absorvido.

Assim, os valores dos ângulos apresentados na tabela 23 corroboram os valores da sorptividade do ensaio com água da tabela 21, com a série CRT3 com menores ângulos significando maiores diâmetros e maior intensidade de absorção líquido por capilaridade. Já a série CRT4, com ângulos mais próximos de 0% CRT e, portanto, tendência a menor absorção em relação à série CRT3.

### 4.2.3 Relação entre parâmetros de resistência e absorção dos concretos de CZP

De acordo com a figura 60, a relação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação apresentou uma boa correlação ( $r^2 > 0,90$ ) para os dados acumulados da série CRT3 e CRT4 (curva “Todos os dados”) em função da evolução do tempo. Se comparada com a curva do concreto de referência (curva “Dados da referência”), nota-se a boa correlação que há dos dados dos concretos de CZP para todos os teores de substituição. Esse resultado serve como bom indicativo de que os concretos de CZP permitem boa correlação linear entre resistência à compressão e módulo de deformação, como também se pode afirmar que há possibilidade de melhorar a microestrutura do material com CZP para casos onde se tem baixa resistência. Isso

inclusive para substituições parciais elevadas e mesmo para substituição total de areia natural por cinza pesada.

Esses dados confirmam a análise de GHAFOORI e BUCHOLC (1997) sobre a interferência da CZP na redução do valor módulo de deformação. Os autores atribuíram a diminuição do módulo do concreto à característica de menor módulo de deformação da partícula de CZP.

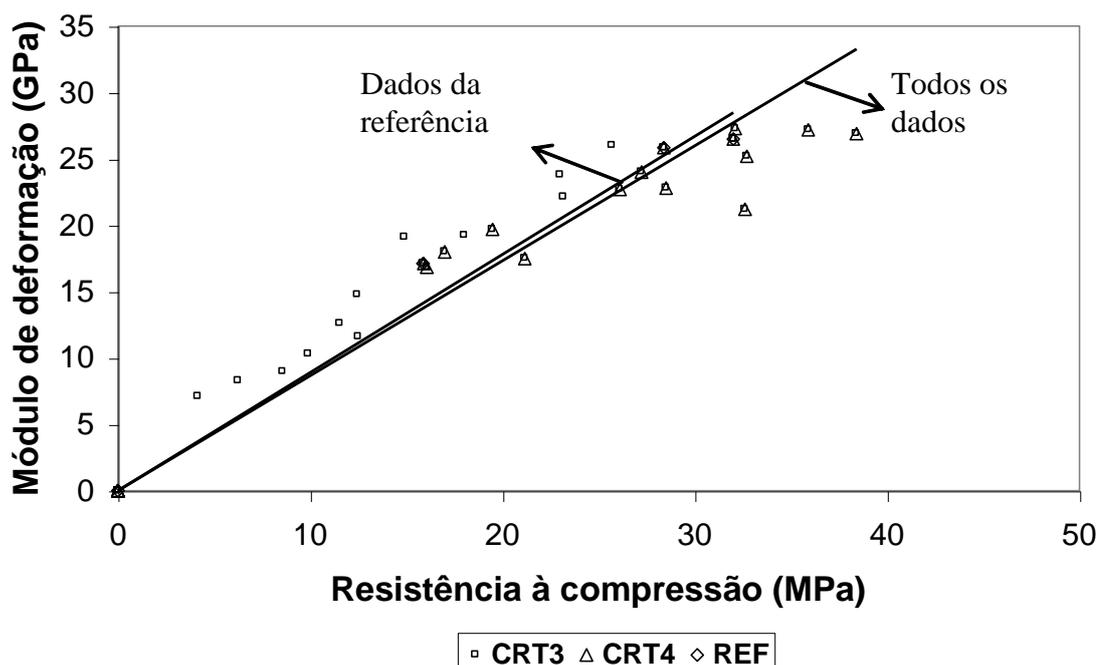


Figura 60: Relação linear entre a resistência à compressão e o módulo de deformação dos concretos de CZP série CRT3 e CRT4

Os resultados da sorptividade dos concretos de CZP, figuras 61 e 62, mostraram uma tendência maior de trânsito de água pelos poros do material. Esse fator foi mais significativo quanto maior foi o teor de CZP, já que a porosidade do material e sua alta intensidade de absorção influenciam fortemente para o aumento dos valores de absorção de água.

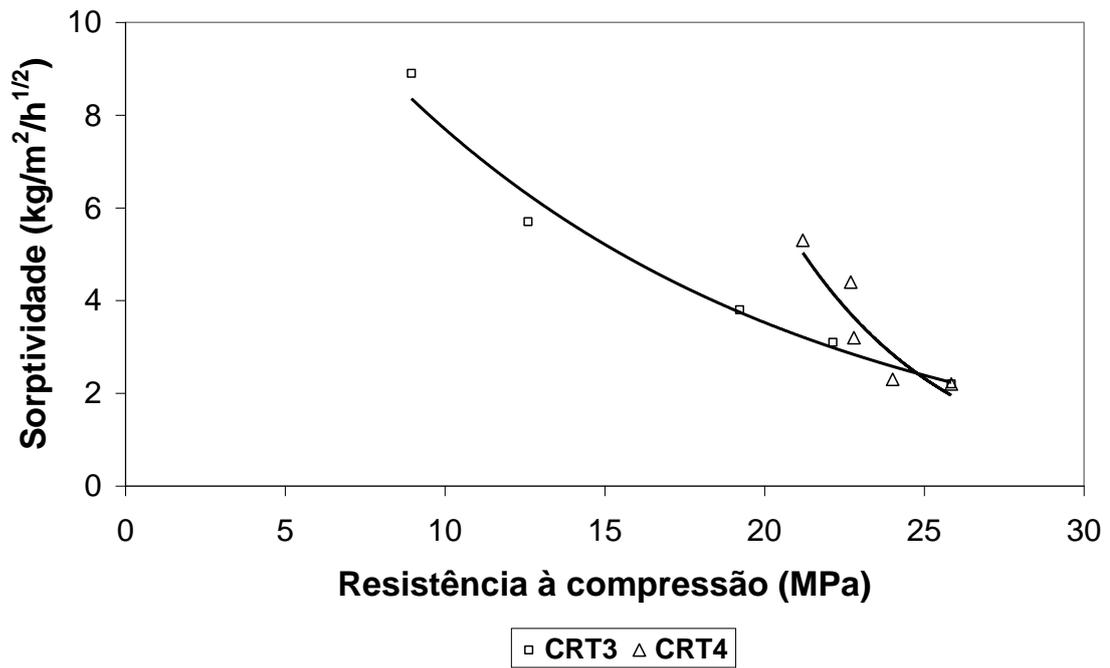


Figura 61: Relação entre sorptividade e a resistência à compressão dos concretos de CZP série CRT3 e CRT4

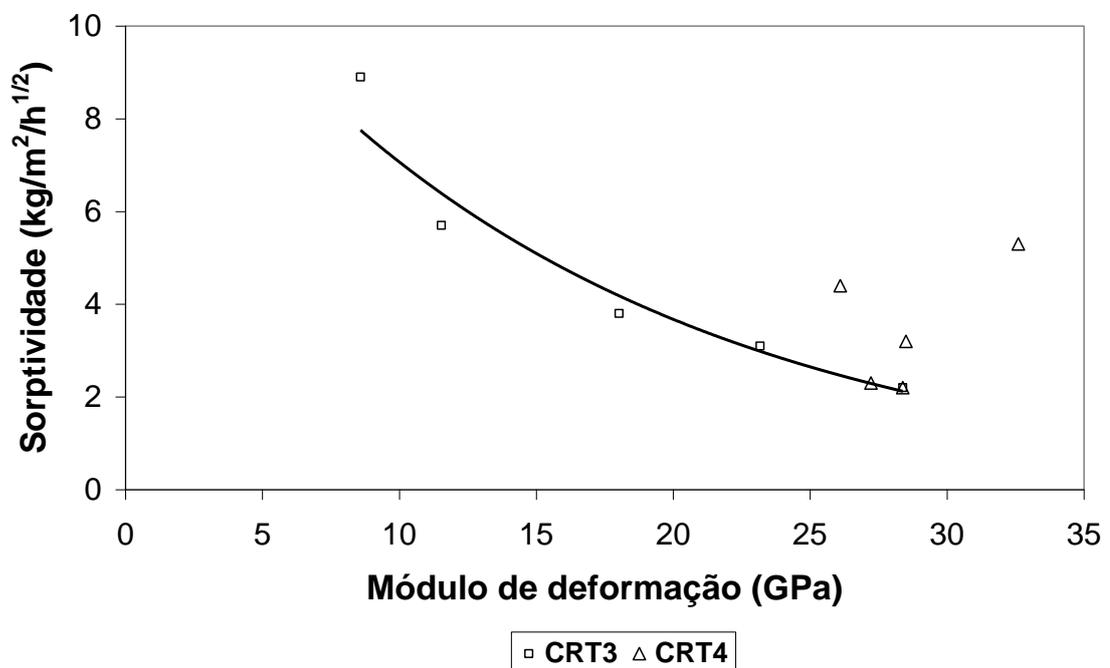


Figura 62: Relação entre sorptividade e módulo de deformação dos concretos de CZP séries CRT3 e CRT4

Fazendo uma relação da resistência mecânica – compressão e deformação – com a sorptividade, pode-se obter uma estimativa de fatores de durabilidade. É importante frisar que isso não é uma relação determinante, e sim mais um fator que se tem para aplicar no comportamento quanto à durabilidade.

Na idade de 28 dias, a sorptividade com os valores da resistência à compressão apresentou boa correlação para ambas as séries CRT3 e CRT4. Porém na relação com o módulo de deformação para os concretos CRT4 não houve bom ajuste da curva de tendência exponencial.

Os valores de módulo de deformação para a série CRT3 diminuíram com o aumento do teor de CZP. O aumento do teor de CZP, em todos os dados, provocou aumento da sorptividade. Assim, pode-se ter uma relação bem ajustada com o módulo de deformação para a série CRT3, que também apresentou menores resistências à compressão. Na série CRT4, repete-se a elevação da sorptividade em função do aumento de teor de CZP, sendo essa elevação menos acentuada que a da série CRT3. Porém, os valores do módulo de deformação não tiveram diferenças importantes para possibilitar um ajuste matemático como se propôs antes com o aumento do valor da sorptividade.

### ***4.3 Conclusões parciais***

De acordo com os resultados obtidos e apresentados neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

- O ensaio de absorção capilar nas mesclas permitiu verificar a maior intensidade de absorção dos materiais granulares reciclados em função da presença do RCD e da CZP no sistema, e tanto maior quanto maior o teor de resíduo presente na mescla. Entretanto, esse aumento na absorção capilar das mesclas natural/resíduo não foi diretamente um resultado do aumento do consumo de água em virtude do aumento da quantidade de finos e da irregularidade dos grãos que elevam a demanda de água, mas também resultado da característica porosa dos materiais reciclados que influenciaram a demanda de água devido à migração de parte da água para o interior dos grãos;
- O índice de absorção  $I_{\text{abs\_H}_2\text{O}}$  foi fortemente afetado nas mesclas com resíduos. No teor de CZP 100% M0, o valor mostrou aumento de 105% em relação a M500. Já na mescla de RCD M0, o valor obtido chegou a 34% de aumento em relação a M500;

- A velocidade de absorção também foi maior nas mesclas com RCD e CZP em relação a M500, verificando a intensidade de absorção maior com maior velocidade de ganho de água;
- O fato de que a CZP e o RCD absorveram parte da água absorvida por capilaridade devido à porosidade dos grãos sugere que essa água tem grande potencial de ser liberada como foi retida. Isso se comprova no estudo da perda de água por secagem ao ar até o equilíbrio higroscópico. Em todas as mesclas de AGN/CZP, M500 até M0, a quantidade de água do início do ensaio foi quase totalmente perdida, levando à afirmação de que a água absorvida pelos materiais granulares reciclados porosos tende subsequentemente ser perdida quando em condições propícias de secagem;
- Na verificação da cinética de umidade dos materiais reciclados como agregado miúdo em concretos de CZP, os parâmetros relativos ao comportamento de transporte de umidade – secagem ao ar, índice de absorção capilar, sorptividade, ângulo de contato aparente – são fortemente afetados em relação ao concreto referência. Desses resultados, a formulação de dosagem da série CRT3 promoveu concretos com maior intensidade de movimentação de líquido em sua estrutura capilar.

---

# **Capítulo 5 - Influência de materiais granulares reciclados como agregados miúdos na evolução do calor de hidratação de argamassas associadas a concretos**

---

Este capítulo compreende o estudo da calorimetria semi-adiabática em argamassas associadas aos concretos do capítulo sexto seguinte, com e sem aditivo superplastificante.

Abrange ainda os resultados preliminares de calorimetria em pastas de mesmas relações a/c das argamassas sem aditivo, e em pastas com aditivo e mesmas relações a/c fixas das argamassas.

## ***5.1 Determinação das dosagens experimentais***

Buscando minimizar o consumo de materiais para os experimentos, bem como da quantidade de trabalhos envolvidos no ensaio, os experimentos de calorimetria desse tópico foram executados em argamassas utilizando-se os mesmos materiais e os mesmos traços dos concretos a serem produzidos para o estudo dos parâmetros de retração plástica a ser apresentado no próximo capítulo. Assim sendo, a tabela 24 apresenta os traços unitários, em massa, das argamassas

produzidas para a avaliação da influência da substituição da areia natural pelos resíduos CZP e RCD.

Tabela 24: Traços unitários em massa das argamassas (relativo ao cimento = 1kg)

Traço unitário, em kg					a/c com SP (série 2)*	SP** (%)	$\delta_p$ <sup>***</sup> (g/cm <sup>3</sup> )		
Argamassa	a	RCD	CZP	a/c (série 1)			Série 1	Série 2	
M500	2,36	0	0	0,510	-----	-----	2,167	-----	
M500-a/c=0,45	2,36	0	0	0,450	0,45	0,30	-----	2,146	
M500-a/c=0,60	2,36	0	0	0,600	0,60	0	-----	2,129	
RCD	M450	2,12	0,34	0	0,545	0,45	0,70	2,099	2,186
	M400	1,89	0,51	0	0,572	0,45	0,80	2,080	2,169
	M350	1,65	0,72	0	0,606	0,45	1,05	2,063	2,176
	M300	1,42	0,89	0	0,597	0,45	1,30	2,072	2,210
	M250	1,18	1,02	0	0,630	0,60	0,19	2,035	1,892
	M200	0,94	1,27	0	0,667	0,60	0,25	1,987	1,853
	M150	0,71	1,4	0	0,656	0,60	0,28	2,030	1,875
	M100	0,47	1,63	0	0,690	0,60	0,45	1,957	1,930
	M50	0,24	1,81	0	0,730	0,60	0,89	1,958	1,843
	M0	0	2,00	0	0,753	0,60	1,00	1,943	1,829
CZP	M450	2,12	0	0,13	0,517	0,45	0,35	2,125	2,135
	M400	1,89	0	0,29	0,558	0,45	0,55	2,091	2,172
	M350	1,65	0	0,34	0,546	0,45	0,55	2,055	2,167
	M300	1,42	0	0,43	0,561	0,45	0,75	2,031	2,130
	M250	1,18	0	0,53	0,583	0,45	0,90	2,004	2,081
	M200	0,94	0	0,63	0,601	0,45	1,83	1,974	2,045
	M150	0,71	0	0,72	0,643	0,60	0,15	1,878	1,743
	M100	0,47	0	0,85	0,670	0,60	0,30	1,847	1,686
	M50	0,24	0	0,95	0,702	0,60	0,45	1,781	1,711
	M0	0	0	1,05	0,729	0,60	0,93	1,710	1,739

\*relações a/c das argamassas da série 2 com aditivo SP

\*\*teor de aditivo superplastificante em percentual da massa de cimento

\*\*\*massa específica no estado fresco das argamassas

Como se pode observar na tabela 24, a relação dos agregados nas dosagens produzidas foram as mesmas do estudo das mesclas de material granular do capítulo 3 na tabela 13, respeitando-se a mesma relação de volume de materiais sólidos granulares (AGN-RES) de cada mescla granular estudada. Para tanto, a argamassa produzida teve a mesma notação das mesclas de material granular.

Duas séries de dosagens produzidas: série 1, com relação a/c variável, e série 2, com relação a/c fixa e um aditivo superplastificante, ambas séries com o mesmo esqueleto granular das mesclas. De acordo com a tabela 24, nota-se que duas relações a/c foram utilizadas na série 2: 0,45 e 0,60. Devido à alta demanda de água das argamassas com RCD para teores de substituição acima de 50% (M250), e das argamassas com CZP para teores acima de 70% (M150), não foi possível manter a mesma relação a/c de 0,45 para todos os teores, para ambos os resíduos, pois o consumo de SP seria excessivamente alto, inviabilizando as análises de uma possível modificação provocada pela incorporação dos resíduos devido a um retardo significativamente alto no tempo de início de pega, causado pelo aditivo SP. Esse valor excessivo foi fixado em  $\geq 2\%$ , sobre a massa de cimento, conforme estudos preliminares.

Diante dos resultados da série 1, podem-se estabelecer os limites da relação a/c da série 2. Entretanto, quando a relação a/c da série 1 em comparação à relação a/c fixada da série 2 de 0,45 ultrapassou 30%, não foi possível manter essa relação a/c fixa para todas as argamassas com um consumo de aditivo SP menor do que 2%.

Dessa forma, para as argamassas com RCD, a dosagem M250 resultou em a/c igual a 0,630. Em comparação com o valor fixado de 0,45, na série 2, para o mesmo teor de RCD, a redução deveria ser de 28,6%, muito próximo dos 30% acima citado. Já para as argamassas com CZP, o teor limite foi na dosagem M150, com relação a/c igual a 0,643, com redução de exatamente 30,0%.

Portanto, houve necessidade de se fixar uma nova relação a/c para o grupo de teores a partir da dosagem que ultrapassou o limite de SP, isto é, RCD-M250 e CZP-M150.

É interessante ressaltar que o fabricante do aditivo destaca que pode-se reduzir a quantidade de água em até 30% do valor inicial. Isso corrobora os dados obtidos nas argamassas da série 2.

## ***5.2 Cálculo dos parâmetros referentes ao ensaio de calorimetria semi-adiabática***

De acordo com o procedimento utilizado para a avaliação da cinética de hidratação, alguns parâmetros de calor foram determinados para melhor caracterizar a influência da incorporação dos agregados de resíduos industriais CZP e RCD.

A partir da medição da temperatura ao longo do tempo de ensaio, o procedimento experimental utilizado permitiu determinar uma série de parâmetros que contribuirão para a análise comparativa da influência dos resíduos nas argamassas e também nos concretos, conforme a seqüência apresentada abaixo.

- a) temperatura da amostra  $T_i$  e variação da temperatura com o tempo  $\Delta T_i$ : o aparato de medição de calor de hidratação gerado permite a medição da temperatura da amostra no calorímetro durante o tempo de ensaio utilizando um fio termopar, conforme metodologia experimental. Assim sendo, é possível determinar uma curva de evolução de temperatura ao longo do tempo de ensaio. Já a variação da temperatura  $\Delta T_i$  pode ser determinada através da equação 25, a qual é a diferença entre a temperatura  $T_i$  do intervalo  $i$  e a temperatura inicial  $T_1$  da amostra ao ser moldada no recipiente de ensaio.

$$\Delta T_i = T_i - T_1 \quad (25)$$

Onde,

$\Delta T_i$ : variação da temperatura da amostra em função da temperatura inicial em  $t = 0$ , em °C

$T_i$ : temperatura da amostra no intervalo de tempo  $i$  considerado, em °C

$T_1$ : temperatura da amostra no início do ensaio, em °C

- b) capacidade térmica da amostra  $C_s$ : calculada segundo o procedimento estabelecido pelo RILEM TC 119-TCE1, a capacidade térmica relacionada à amostra leva em consideração a massa e o volume da amostra de argamassa, a quantidade de cimento contida na amostra e as características térmicas dos materiais (calor específico). Deste modo,  $C_s$  pode ser calculado através da equação 26.

$$C_s = m_s \cdot \Sigma(g_i \cdot c_i) \quad (26)$$

Onde,

$C_s$ : capacidade térmica da amostra, em J/K

$m_s$ : massa da amostra, em kg

$g_i$ : proporção relativa do constituinte na massa da amostra, em kg/kg

$c_i$ : calor específico do constituinte, em kJ/kg.K (tabela 17)

- c) calor gerado no tempo  $Q_i$  e taxa de calor gerado no tempo  $\Delta Q_i$ : com a evolução da temperatura ao longo do tempo, pode-se calcular o desenvolvimento do calor gerado na amostra tomando-se por base a sua capacidade térmica calculada. Da mesma forma, a taxa do calor gerado ao longo do tempo é possível de se obter relacionando o calor e o tempo. As equações 27 e 28 foram utilizadas para o cálculo de  $Q_i$  e  $\Delta Q_i$ .

$$Q_i = \frac{C_s \cdot \Delta T_i}{m_c} \quad (27)$$

Onde,

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo  $i$ , em J/g

$C_s$ : capacidade térmica da amostra, em J/K

$\Delta T_i$ : variação da temperatura no tempo  $i$ , em °C

$m_c$ : massa de cimento na amostra, em g

$$\Delta Q_i = \frac{Q_i}{t} \quad (28)$$

Onde,

$\Delta Q_i$ : taxa de calor gerado no tempo i, em J/g/h

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo i, em J/g

t: intervalo de tempo i, em h

- d) calor total gerado  $Q_{\max}$  e grau de hidratação  $\alpha$ : o acumulado da quantidade de calor gerado no tempo possibilita a obtenção do valor total do calor envolvido no tempo de ensaio. Relacionando-se a quantidade de calor total  $Q_{\max}$ , em função do tempo de ensaio, e a quantidade de calor total teórica  $Q_{\infty}$ , é possível se obter o valor do grau de hidratação no tempo. Essas relações estão mostradas das equações 29, 30 e 31.

$$Q_{\max} = \Sigma Q_i \quad (29)$$

Onde,

$Q_{\max}$ : quantidade do calor total gerado durante o ensaio, em J/g

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo i, em J/g

$$\alpha = \frac{Q_{\max}}{Q_{\infty}} \quad (30)$$

Sendo,

$$Q_{\infty} = \Sigma(m_i \cdot Q_i') \quad (31)$$

Onde,

$m_i$ : é a quantidade do composto do cimento Portland considerado calculado pela fórmula de Bogue ou por ensaio de difração de raios-X, em % (tabela 8)

$Q_i'$ : é o calor de hidratação dos compostos separados quando hidratados totalmente, em J/g

e) fim do período de indução  $\tau$  e taxa máxima de reação  $\phi$ : de acordo com MARSHAK *et al.*, 2004, através da curva que relaciona o grau de hidratação e o tempo, é possível obter dois parâmetros interessantes para a avaliação das modificações em virtude da incorporação de aditivos e também, no caso dessa pesquisa, a incorporação de RCD e CZP. Esses parâmetros são: o instante que caracteriza o fim do período de indução  $\tau$  e a inclinação  $\phi$  do trecho linear da curva do grau de hidratação com o tempo que representa a taxa máxima de reação. Esses parâmetros foram retirados diretamente dos gráficos para cada mistura analisada e estão apresentados nos anexos 4 e 5 da tese.

Através das figuras 63 e 64, apresentam-se as curvas típicas obtidas do ensaio de calorimetria semi-adiabática. Como acarretaria grande quantidade de curvas por gráfico, inviabilizando uma análise mais detalhada, as curvas separadamente são mostradas nos anexos 4 e 5 para cada mistura produzida.

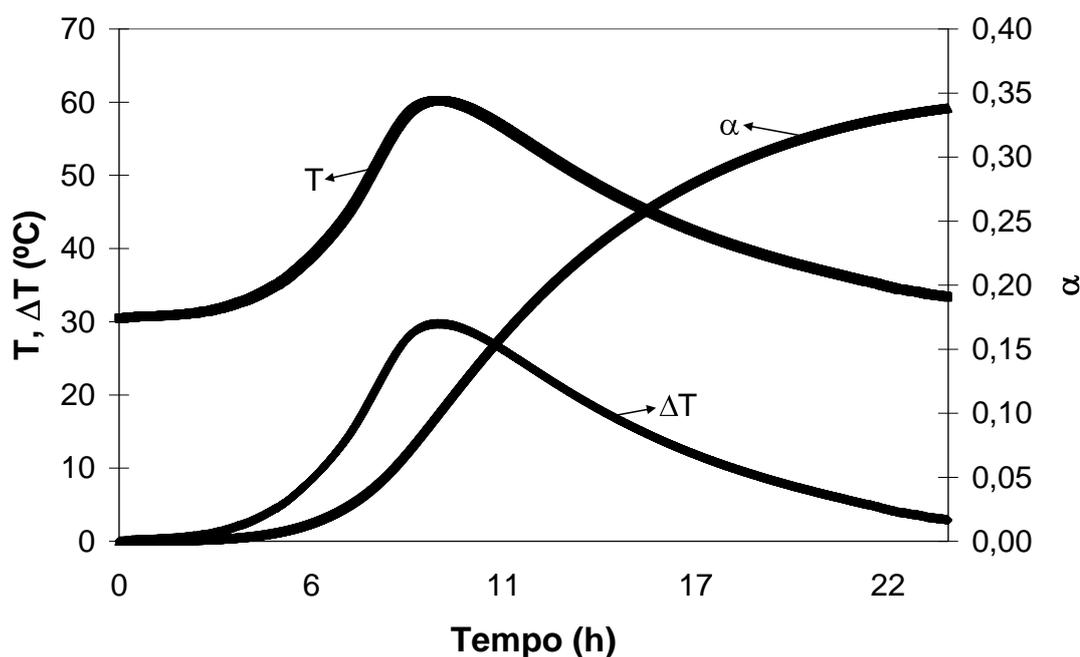


Figura 63: Curvas típicas de evolução de temperatura, variação de temperatura e grau de hidratação  $\alpha$

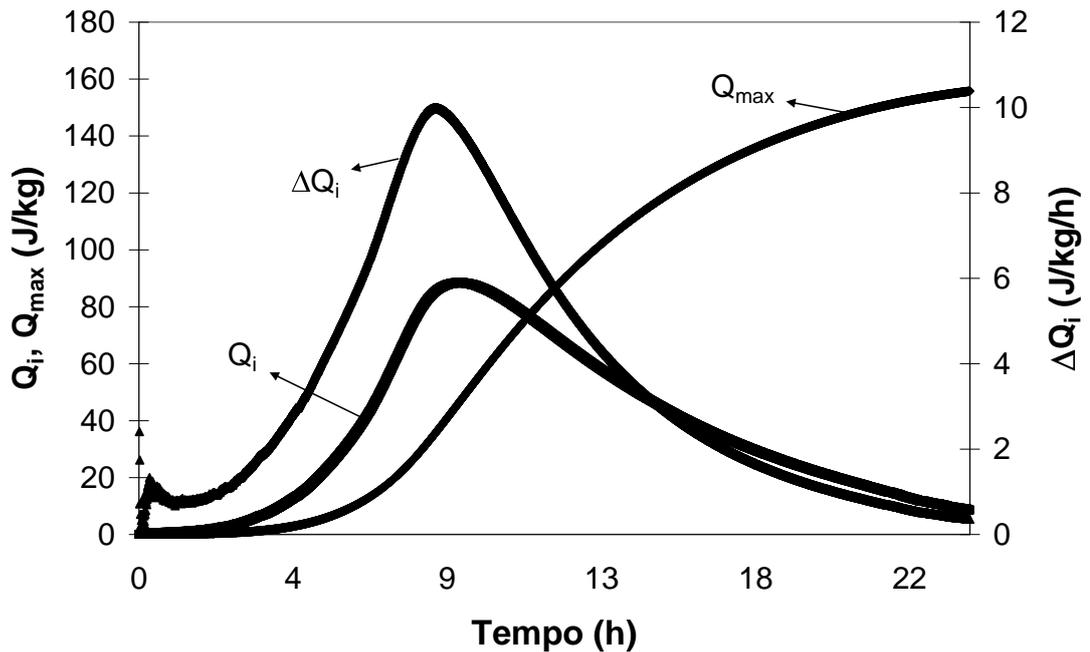


Figura 64: Curvas típicas de calor de hidratação

### 5.3 Ensaios preliminares em pastas de cimento

Com o objetivo de verificar as possíveis modificações nos parâmetros do ensaio de calorimetria em virtude da variação da relação a/c e da incorporação do aditivo SP, um estudo preliminar em pastas de cimento foi realizado.

As mesmas relações a/c das argamassas foram mantidas bem como os mesmos teores de aditivo SP, das séries 1 e 2 do estudo em argamassas. Assim, as tabelas 25 e 26 apresentam as relações a/c e os teores de SP das pastas produzidas para o ensaio de calorimetria.

Tabela 25: Relações a/c para as 21 pastas do estudo de evolução do calor de hidratação

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
0,510	0,517	0,545	0,546	0,558	0,561	0,572
P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
0,583	0,597	0,601	0,606	0,630	0,643	0,656
P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21
0,667	0,670	0,690	0,702	0,729	0,730	0,753

Tabela 26: Teores de SP das pastas do estudo de evolução do calor de hidratação

a/c	SP (%)					
0,45	0,30	0,40	0,50	0,70	0,80	0,90
0,60	0,15	0,20	0,25	0,30	0,45	0,90

Não foram estudados todos os teores de aditivo SP incorporados, já que os agregados naturais e resíduos não seriam incorporados, e assim preferiu-se manter o limite do fabricante de 0,9% da massa de cimento.

É importante salientar que, na presença dos agregados, parte do aditivo SP seria absorvido devido à característica porosa do RCD e CZP, considerado no capítulo 3.

## ***5.4 Resultados obtidos do ensaio de calorimetria semi-adiabática***

A apresentação, análise e discussão dos resultados sobre a calorimetria semi-adiabática das pastas e das argamassas com resíduos RCD e CZP dar-se-ão subdividindo-se cada parâmetro e analisando-o separadamente para, ao final, enfocá-los em conjunto e verificar as modificações globais das misturas.

A tabela 27 apresenta os principais valores das argamassas produzidas utilizados para os cálculos dos parâmetros referentes ao calor de hidratação das amostras estudadas.

Tabela 27: Resultados do ensaio de calorimetria das argamassas

Argamassa	Série 1 – sem aditivo SP				Série 2 – com aditivo SP				
	$m_{am}^1$ (g)	$V_{am}^2$ (cm <sup>3</sup> )	$m_c^3$ (g)	Cs (J/K)	$m_{am}$ (g)	$V_{am}$ (cm <sup>3</sup> )	$m_c$ (g)	Cs (J/K)	
M500	968,0	0,447	259,1	1259,9	-----	-----	-----	-----	
RCD	M450	885,0	0,422	239,7	1219,9	917,1	0,420	252,1	1182,8
	M400	909,3	0,437	244,8	1261,8	921,3	0,425	255,2	1185,3
	M350	879,6	0,426	234,2	1235,2	939,1	0,432	259,3	1198,1
	M300	887,4	0,428	236,4	1226,6	935,2	0,423	254,3	1162,5
	M250	851,1	0,418	226,8	1187,9	819,8	0,433	238,8	1220,9
	M200	845,0	0,425	226,0	1221,1	848,9	0,458	252,6	1293,0
	M150	841,3	0,415	221,6	1169,1	801,6	0,428	235,7	1187,7
	M100	854,1	0,436	229,2	1239,8	815,5	0,423	232,9	1172,0
	M50	822,0	0,420	216,0	1195,5	792,8	0,430	237,1	1183,4
	M0	825,5	0,425	216,0	1207,7	794,2	0,434	239,4	1185,3
CZP	M450	949,6	0,447	258,1	1243,3	941,6	0,441	265,0	1202,3
	M400	945,8	0,452	255,2	1263,0	927,8	0,427	256,7	1154,3
	M350	883,3	0,430	244,2	1160,2	883,4	0,408	245,0	1065,6
	M300	860,0	0,423	238,5	1123,8	905,6	0,425	255,5	1085,0
	M250	836,5	0,418	232,3	1092,2	862,6	0,415	249,1	1032,4
	M200	836,0	0,424	233,4	1091,0	814,2	0,398	239,3	967,2
	M150	786,7	0,419	225,6	1070,9	770,3	0,442	243,6	1112,7
	M100	795,0	0,430	228,5	1093,3	757,4	0,449	247,6	1112,5
	M50	776,0	0,436	227,4	1097,3	746,6	0,436	240,5	1058,0
	M0	760,6	0,445	228,9	1107,1	745,2	0,429	236,2	1014,9
M500-0,60	-----	-----	-----	-----	952,6	0,447	240,3	1240,0	
M500-0,45	-----	-----	-----	-----	935,5	0,436	268,9	1259,1	

<sup>1</sup>massa da amostra<sup>2</sup>volume da amostra<sup>3</sup>massa de cimento na amostra

### 5.4.1 Variação máxima de temperatura $\Delta T$ e tempo $t_{\text{pico}}$ para o pico de calor $Q_i$

Partindo da hipótese de que haveria alteração na cinética das reações de hidratação do cimento Portland nas argamassas com resíduos, é importante verificar a influência no tempo decorrido, desde o lançamento do ensaio até atingir o maior evento térmico, expresso pelo pico de calor gerado em relação ao teor de substituição de AGN por RCD e CZP.

Pela curva de tendência da figura 65, percebe-se que, quando a CZP foi incorporada, ocorre uma suave elevação no tempo do pico. O valor médio do tempo foi de 10h, com os valores mais distantes nas amostras M450 de 9:30h e M400 de 10:30h. Mesmo com essa diferença de 30 minutos, os valores das outras amostras mantiveram valores próximos, sem consideráveis diferenças quanto ao retardo ou aceleração no tempo do pico de calor.

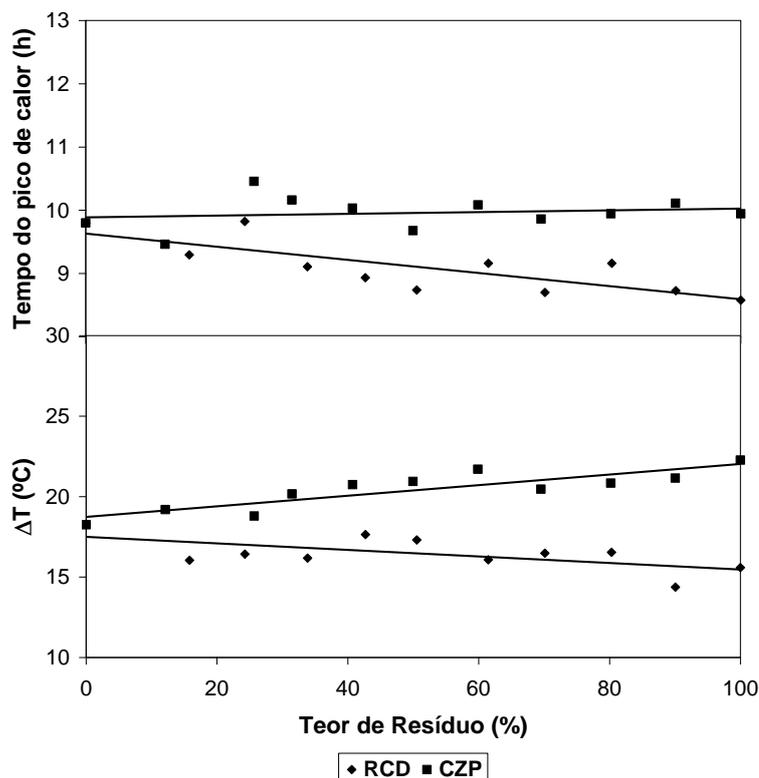


Figura 65: Tempo do pico de calor e variação máxima da temperatura das argamassas sem aditivo SP

Já a curva de tendência dos pontos das argamassas com RCD apresentou uma inclinação um pouco maior do que a da CZP, porém decrescente, isto é, tempo do pico menor para maiores teores de substituição do AGN. Esse comportamento leva à conclusão de que há uma influência na cinética da hidratação, ocasionando uma possível aceleração das reações, conseqüentemente acelerando o tempo de pega.

O tempo médio do pico de calor foi de 9:10h, com os valores mais distantes em 9:48h para M500 e M400 RCD.

Observando o estudo em pasta na figura 66, nota-se que o tempo aumenta com o aumento da relação a/c, de acordo com a teoria de cinética de hidratação que assegura um aumento do tempo de pega com um aumento da relação a/c, mantendo-se os mesmos constituintes e a mesma proporção entre eles.

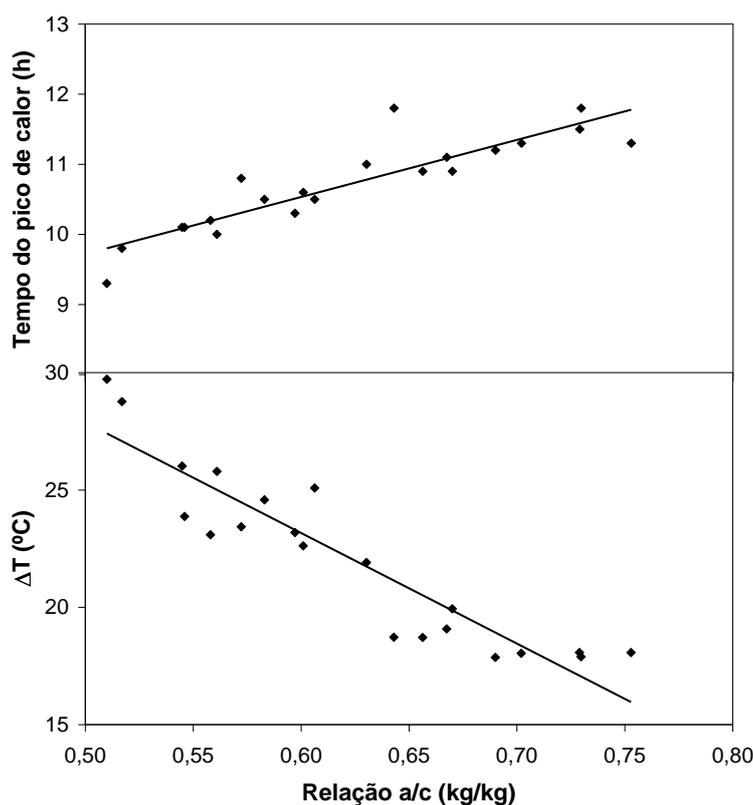


Figura 66: Tempo de pico de calor e variação máxima da temperatura das pastas sem aditivo SP

Dessa forma, o comportamento das argamassas com CZP confere com a teoria, já que, com o aumento do teor de CZP, a demanda de água também foi elevada, como se vê na figura 67, que mostra o ajuste da relação a/c das argamassas.

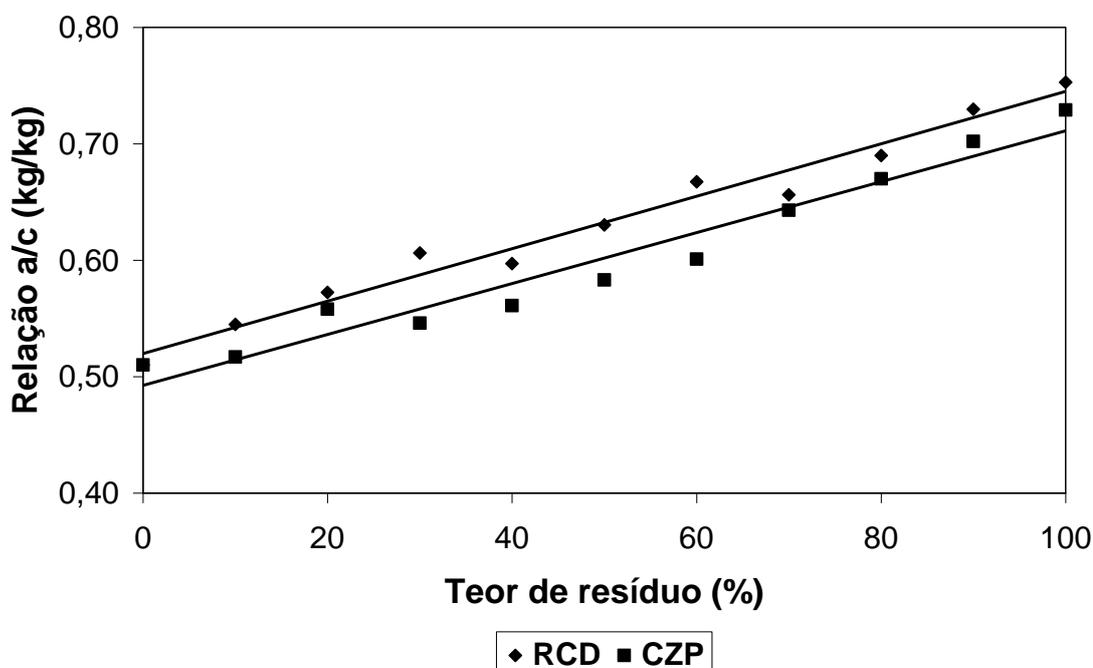


Figura 67: Relação a/c em função do teor de resíduo

Entretanto, a curva das argamassas com RCD, que apresentou diminuição no tempo do pico, não condiz com a teoria para materiais normais e também com a curva do ensaio em pasta. Isso pode-se afirmar já que, com o aumento do teor de RCD nas argamassas, a relação a/c aumentou. Portanto, o tempo para o pico de calor também aumentou no estudo com pasta (figura 66). O fator de absorção de água pelo agregado, que é poroso, influencia, mas isso também poderia refletir nas argamassas com CZP, que também são materiais porosos.

Se for considerado que parte da antiga argamassa aderida aos outros materiais de composição do RCD estiver sendo ativada para hidratação poder-se-ia descrever esse efeito de inversão para se atingir o tempo do pico de calor.

Outra consideração é o surgimento de possíveis pontos de nucleação por intermédio do RCD, já que, além dos finos presentes que podem contribuir, há o material cimentício antigo resultante que poderá influenciar para o surgimento desses pontos (LAWRENCE *et al.*, 2003).

Em relação à variação máxima da temperatura da amostra, que se dá no mesmo instante em que atinge o pico de calor, as curvas das argamassas de CZP corroboraram o exposto acima. Afirma-se isso, pois, para a CZP, a reta inclina-se na direção crescente com o teor de substituição, isto é, os parâmetros menor tempo até o pico de calor e maior variação de temperatura estão bem correlacionados em função do aumento da relação a/c, como mostra a figura 66 do resultado em pastas.

Dessa forma, a reta da CZP do tempo do pico de calor, mesmo que quase uma constante, não exclui a possibilidade de maior variação de temperatura para maiores teores. Isso porque quanto maior a quantidade de CZP, mesmo que maior a quantidade de água, maior é o valor máximo do calor devido às propriedades térmicas do material em relação ao AGN.

Contudo, as argamassas com RCD não apresentaram a tendência do estudo com pastas, já que com o aumento do teor, e conseqüentemente a relação a/c, o tempo do pico de calor e a variação da temperatura diminuíram, quando o esperado era que o tempo do pico de calor tivesse um comportamento crescente. Assim, pode-se afirmar que, ainda com a aceleração até atingir o calor máximo, a presença do RCD faz com que o sistema não mantenha o calor gerado e sim que o libere com maior velocidade do que a referência e as argamassas com CZP.

Isso se explica, pois o valor mais elevado do calor específico considerado para o RCD permite concluir que esse material, em relação ao natural e à CZP permite variação de temperatura mais rápida, porém com menor pico de temperatura.

Do estudo com a incorporação de aditivo SP, observando-se os resultados nas pastas, constatou-se que, para ambas as relações a/c – 0,45 e 0,60 – houve aumento no tempo do pico de calor e diminuição da variação máxima de temperatura, com a maior influência na relação a/c mais baixa, conforme a figura 68. Porém, com o aumento do teor de SP, houve inversão das curvas com a/c 0,60 com maior tempo para maior teor de SP. Esses fatos geraram perspectiva de influência bastante significativa no tempo de pega com retardo no tempo do pico de calor.

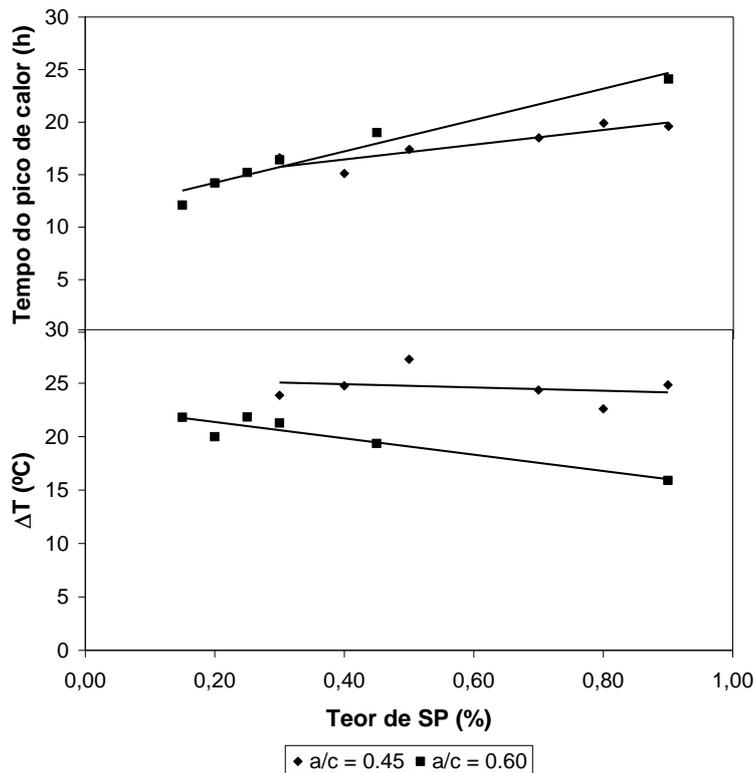


Figura 68: Tempo do pico de calor e variação máxima da temperatura das pastas com aditivo SP

Nas argamassas de RCD com aditivo SP, na figura 69, nota-se que houve um comportamento inverso ao esperado, conforme o estudo na pasta, com diminuição do tempo de calor máximo com o aumento do teor de RCD incorporado e aumento da variação máxima de temperatura, mesmo sendo essa última de pouca expressão para a relação a/c 0,60. Porém, isso não teve influência verificável da presença e teor do aditivo SP.

Para as argamassas de CZP com SP, a tendência observada nas pastas com aditivo se mantém até a mistura M150, quando varia a relação a/c de 0,45 para 0,60. Nesse ponto, o valor do tempo do pico de calor recua para um valor semelhante à referência. Isso se explica devido à dosagem menor de aditivo no primeiro teor de CZP após a mudança de a/c.

Assim, pode-se concluir que o comportamento das argamassas de CZP com aditivo SP mostrou-se bem relacionado com o estudo em pasta com aditivo: aumento do teor de substituição e aumento do teor de aditivo resultando em aumento do tempo para o pico de calor e variação máxima de temperatura.

Nessa direção, vê-se que o aditivo SP aumenta o tempo do pico de calor, ocasionando redução na variação máxima de temperatura para as argamassas de CZP.

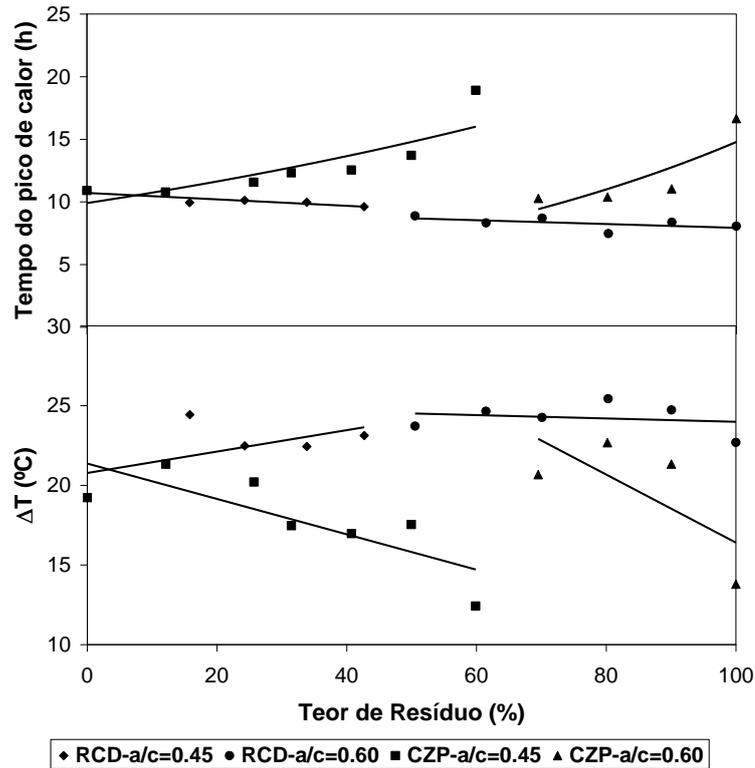


Figura 69: Tempo de pico de calor máximo e variação máxima da temperatura das argamassas com aditivo SP

Diferente disso, a presença do RCD influenciou fortemente a tendência apresentada pelas pastas com aditivo SP, da mesma forma que o anteriormente observado no estudo das argamassas sem aditivo.

Como os teores do aditivo SP ajustados para uma mesma consistência nas argamassas com RCD e CZP foram semelhantes, sem levar em consideração o teor de resíduo, o teor de SP não foi um fator determinante na diferença entre as argamassas com RCD e CZP, e sim o tipo do resíduo e sua quantidade na mistura. Entretanto, o efeito do SP foi significativo nas argamassas de CZP e nulo nas argamassas de RCD.

## 5.4.2 Influência no calor gerado no tempo $Q_i$ , na taxa de calor gerado no tempo $\Delta Q_i$ e no calor total gerado $Q_{max}$

Como o consumo de cimento e o consumo de agregados, em volume, foram os mesmos, os valores da capacidade térmica calculados ficaram vinculados às variações na relação a/c, na massa da amostra e no calor específico dos agregados resíduos incorporados. Os valores dos picos de variação de temperatura nas amostras com CZP foram significativamente maiores do que a amostra de referência e as amostras com RCD, conforme a tabela 27, influenciando decisivamente os valores do calor e da taxa de calor envolvidos.

A figura 70 apresenta as curvas de tendência dos valores do pico de calor ao longo do tempo, da máxima taxa de calor ao longo do tempo e do calor total envolvido ( $Q_{max}$ ) no tempo de 20 horas ( $Q_{20h}$ ), após contato inicial do cimento e água.

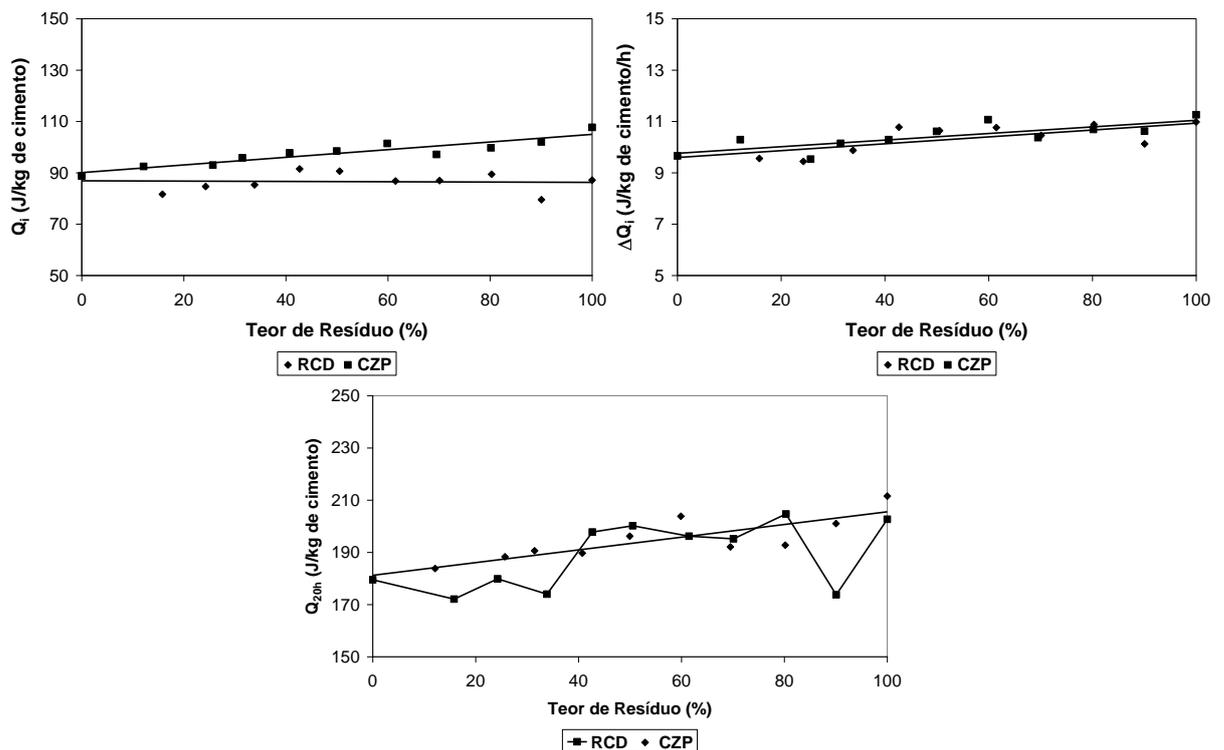


Figura 70: Parâmetros do ensaio de calorimetria das argamassas sem aditivo –  $Q_i$ ,  $\Delta Q_i$ ,  $Q_{20h}$

O estudo do pico de calor, do calor total envolvido e da máxima taxa de calor em pasta, produzida com as mesmas relações a/c de todas as argamassas com RCD e CZP, pode ser visto na figura 71. Essa análise é importante para verificar a influência da relação a/c nos parâmetros de calor de hidratação considerados.

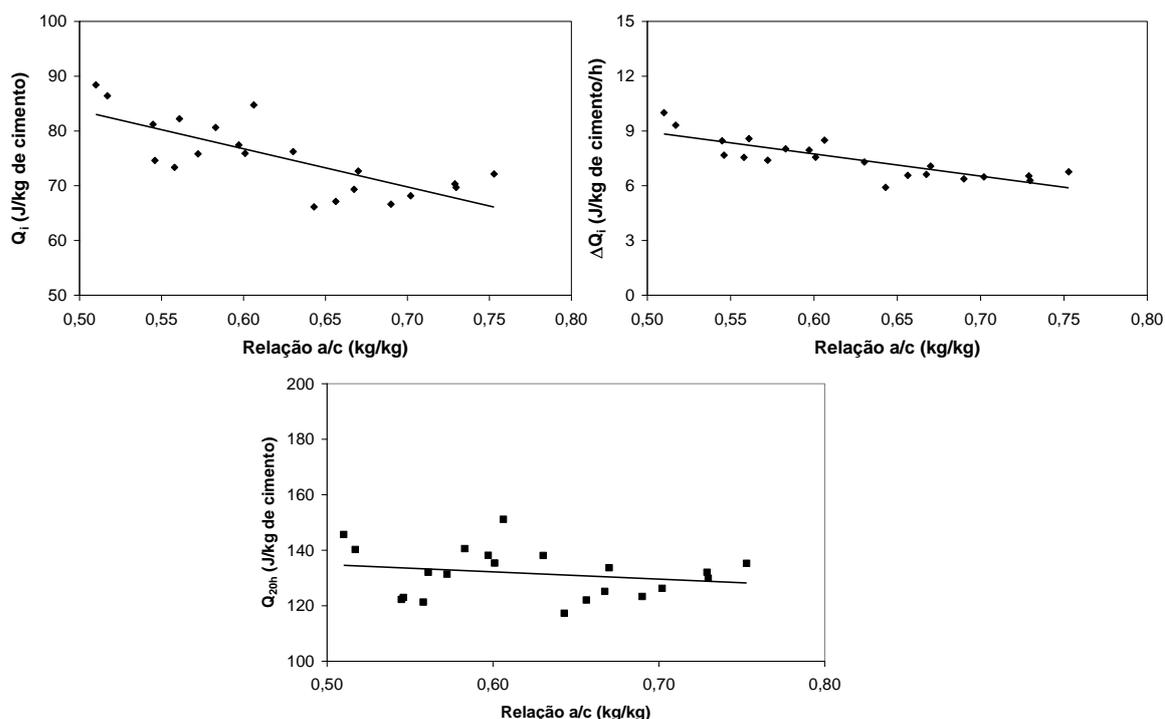


Figura 71: Parâmetros do ensaio de calorimetria das pastas sem aditivo –  $Q_i$ ,  $\Delta Q_i$ ,  $Q_{20h}$

O estudo na pasta revelou que a tendência é de diminuição do pico de calor de hidratação, do calor total envolvido e da taxa máxima de calor gerado quando se eleva a quantidade de água na mistura.

Observando o desempenho das argamassas de RES, nota-se que, quando o RCD é incorporado, segundo a curva linear de tendência, não há variação no pico de calor em função do teor de substituição de AGN.

Se for considerado que o RCD é um material reciclado a partir dos mesmos constituintes da argamassa referência M500, e ainda mantido o mesmo consumo de materiais desde M500 até M0, exceto a quantidade de água, é de se esperar que os resultados do calor gerado sejam semelhantes para todos os parâmetros em qualquer teor de substituição.

Na figura 70, o pico de calor e a máxima taxa de calor gerado apontam para essa consideração. Porém, o calor total envolvido no tempo de 20 horas apresenta valores dispersos entre os teores, resultando numa curva sem que seja possível traçar uma tendência clara. Isso pode ser explicado pela variação do tempo de ensaio para o pico de calor máximo, que variou em função do teor de RCD.

Com uma tendência de aceleração até o pico de calor gerado, as argamassas de RCD permitem que menos calor seja perdido pelo equipamento, pois mais rápido é atingido o ponto em questão. Assim, é possível que mais calor possa ser acumulado em menos tempo, já que a demanda de calor é diretamente proporcional à quantidade e velocidade das reações.

Nas argamassas de CZP, mesmo com o fator do aumento da relação a/c e da migração de parte dessa água para o interior da CZP (agregado poroso), os resultados do calor máximo se mostraram mais elevados. Os valores mais elevados dos picos de variação de temperatura das amostras com CZP colaboram para o aumento do calor gerado, sendo assim creditada parte da elevação do calor a fatores intrínsecos da própria mistura que contém CZP, como o calor específico do material resíduo.

É possível afirmar também que, devido a uma maior porosidade da CZP em relação ao RCD e ao AGN, há um maior conteúdo de calor de hidratação que fica retido na amostra, sem que haja perda, elevando a temperatura. Isso porque o ar é um ótimo isolante térmico, não permitindo que haja um fluxo de calor tão eficiente quanto nas argamassas com RCD.

Nessa direção, a discussão sobre o calor total envolvido nas argamassas de CZP também resulta nas mesmas considerações expostas acima, onde o teor de CZP nas argamassas foi um fator decisivo para a elevação da variação da temperatura da amostra, mesmo que mantendo o tempo de obtenção do pico de calor praticamente igual.

Vale ressaltar que há uma modificação do calor na amostra em função das propriedades térmica e de porosidade da CZP.

Contudo, na máxima taxa de calor gerado, os resultados demonstram que houve uma tendência praticamente igual nas argamassas com os dois resíduos, e ainda uma variação em função do teor de pouca expressão, sendo menor do que 20% de variação do valor mais distante M0 em relação a M500.

Comparativamente para as argamassas de RES sem aditivo SP com o estudo em pasta, o resíduo se caracteriza como um fator de influência, pois quanto maior foi a relação a/c menor foi a máxima taxa de calor, conforme a figura 71.

Por essas afirmações, pode-se considerar que os resíduos utilizados, RCD e CZP, influenciam o comportamento das argamassas estudadas em relação à cinética de hidratação, alterando valores de variação de temperatura, pico de calor, calor total e fluxo de calor, permitindo que as reações de hidratação sejam também alteradas.

Nas argamassas com aditivo SP, buscou-se avaliar as modificações dos resultados em relação às argamassas sem aditivo de acordo com a influência da presença e do teor de aditivo, da variação do teor de resíduo e da variação da relação a/c de 0,45 para 0,60.

Como não são os mesmos teores de SP nas mesmas relações a/c das pastas, não fica apropriada à comparação entre elas.

O aumento no teor de SP para uma mesma relação a/c modificou os valores do pico do calor gerado e do calor total envolvido nas pastas, conforme a figura 72. A evolução das curvas, comparando as duas relações a/c das pastas, foi semelhante, com um pico de valor mais elevado seguido de uma diminuição com o aumento do teor de SP.

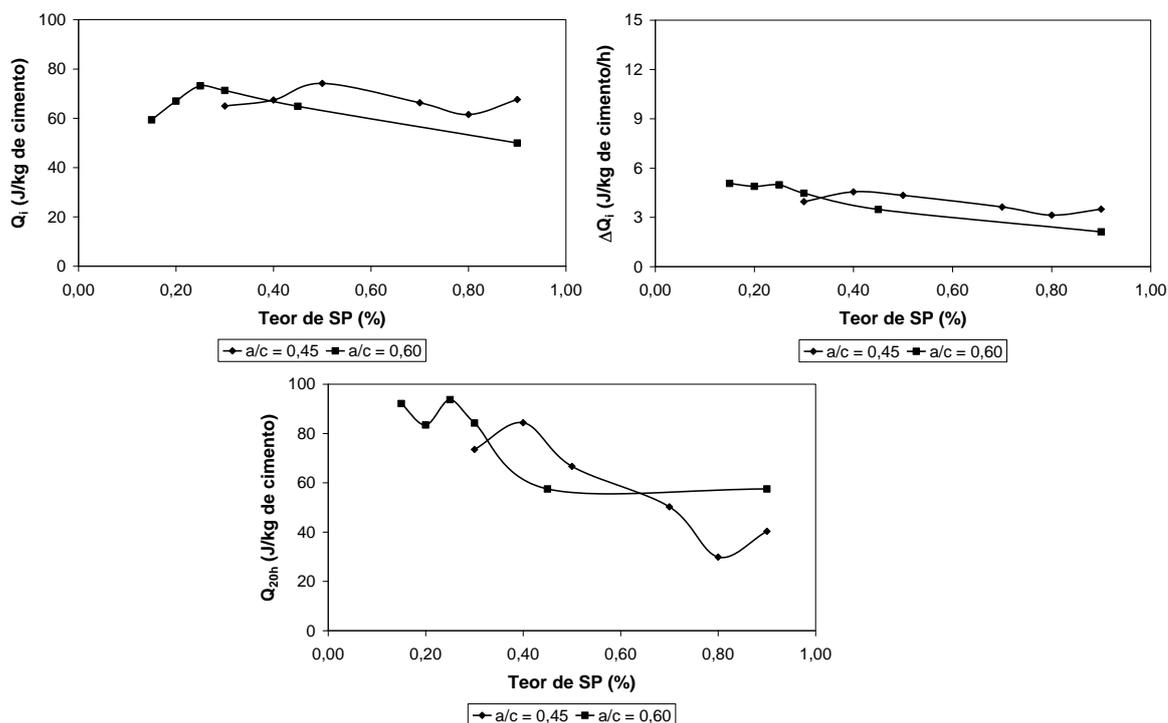


Figura 72: Parâmetros do ensaio de calorimetria das pastas com aditivo –  $Q_i$ ,  $\Delta Q_i$ ,  $Q_{20h}$

A tendência da curva da figura 72 em apresentar um pico de maior valor de calor pode ser devido ao melhoramento na dispersão e suspensão das partículas de cimento, promovendo uma hidratação mais eficaz. Devido à alta relação a/c para o estudo das pastas, houve uma forte tendência à sedimentação rápida das partículas sólidas no fundo do recipiente da amostra. Porém, como o ponto de contato do fio termopar atingiu a amostra, ficando dentro do volume de pasta com as partículas sedimentadas, o efeito de dispersão promovido pelo aditivo SP pode ser considerado, reduzindo a tendência de formação de aglomerados de partículas de cimento e, assim, potencializando a hidratação.

Para as argamassas com aditivo, pela figura 73, há um comportamento semelhante entre as misturas com RCD e CZP.

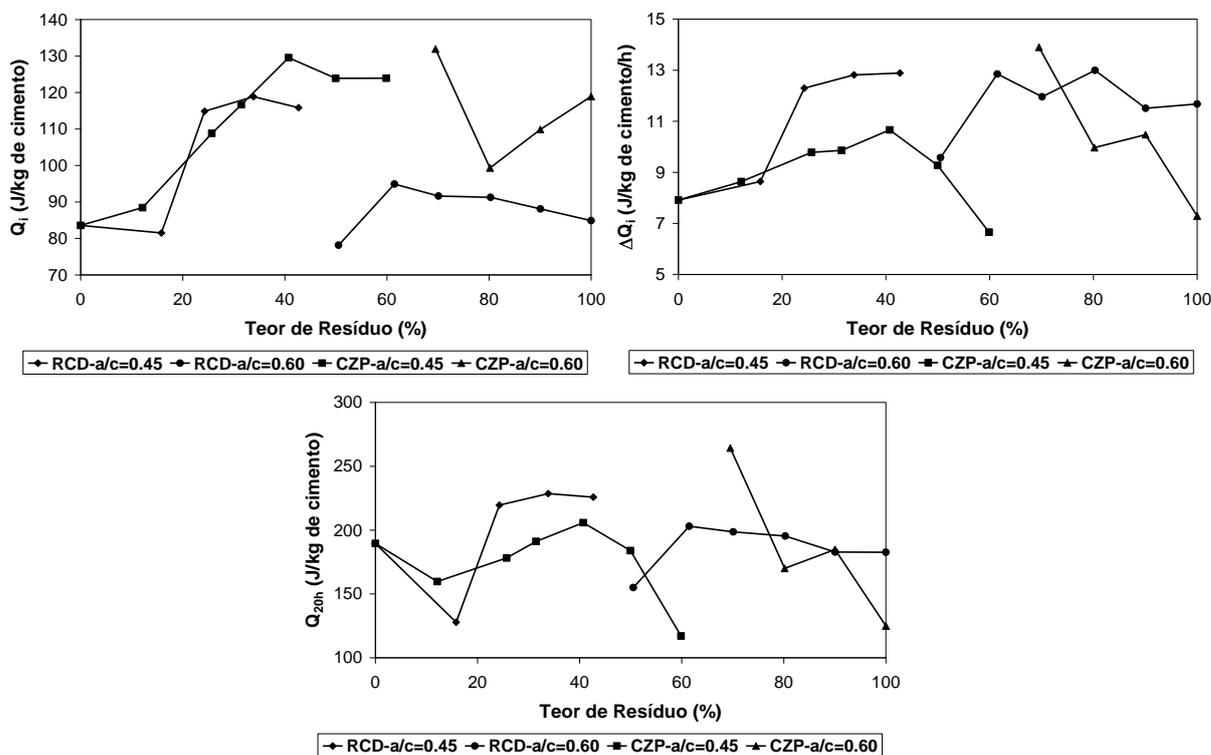


Figura 73: Parâmetros do ensaio de calorimetria das argamassas com aditivo –  $Q_i$ ,  $\Delta Q_i$ ,  $Q_{20h}$

Na figura 73, observa-se que, na mudança da relação a/c, há uma alteração forte do valor do calor máximo envolvido, caracterizando dois trechos de tendência. No primeiro trecho, há uma elevação do calor máximo envolvido com o aumento do teor de substituição até um pico de valor, quando então há uma forte redução, passando ao segundo trecho da curva, devido à

mudança da relação a/c de 0,45 para 0,60. Isso mostrou, como era esperado, a influência da variação de a/c na variação do calor máximo envolvido. Somando-se a isso, as curvas demonstram a forte influência da combinação aumento do teor de resíduos + aumento do teor de aditivo, principalmente para a/c igual a 0,45.

Na relação entre as argamassas, comparando-se o efeito do tipo de resíduo, as misturas com CZP resultaram em valores maiores do que as misturas com RCD, da mesma forma visto nas argamassas sem aditivo superplastificante.

Da análise da figura 72, da taxa máxima de calor envolvido nas pastas com aditivo superplastificante, nota-se que o comportamento, em função do teor de superplastificante, foi bem semelhante aos dados do calor máximo nas mesmas pastas, com um pico e uma queda brusca nos valores.

As mesmas considerações feitas acima, na discussão do calor máximo envolvido, podem ser consideradas para a análise da taxa máxima de calor.

De acordo com a figura 73, as argamassas com superplastificante não apresentaram resultados da máxima taxa de calor envolvido compatíveis em relação às curvas de tendência das argamassas sem aditivo e também das pastas do estudo prévio com aditivo superplastificante. Pode-se perceber isso quando a mudança na relação a/c com o aumento do teor de resíduos não ocasionou nenhum efeito característico nas curvas tanto com o RCD como com a CZP.

Mais uma observação desconectada em relação à tendência vista no estudo das argamassas sem aditivo foi o fato de os maiores valores da taxa máxima de calor terem sido observados nas argamassas com RCD e não nas com CZP. Por fim, pode-se considerar que o aumento da taxa de máximo calor envolvido corresponde ao tempo para os picos de calor menores, mais rápidos.

### **5.4.3 Parâmetros da curva do grau de hidratação no tempo**

De acordo com MARSHAK *et al.* (2004) e LAWRENCE *et al.* (2003), pode-se compreender a influência dos aditivos químicos e das adições minerais através da análise das modificações em alguns parâmetros da curva do grau de hidratação no tempo.

A curva do grau de hidratação, figura 74, obtida a partir dos dados do calor total envolvido, anteriormente citado, fornece mais dois parâmetros, além do próprio grau de hidratação, de grande pertinência para a identificação das mudanças sofridas nas argamassas dessa pesquisa,

que incorporam resíduos granulares em substituição ao AGN e um aditivo SP: o fim do período de indução  $\tau_i$ , caracterizado pelo início da pega e aceleração das reações de hidratação, e a inclinação  $\varphi$  da reta tangente à curva do grau de hidratação no trecho linear após o fim do período de indução.

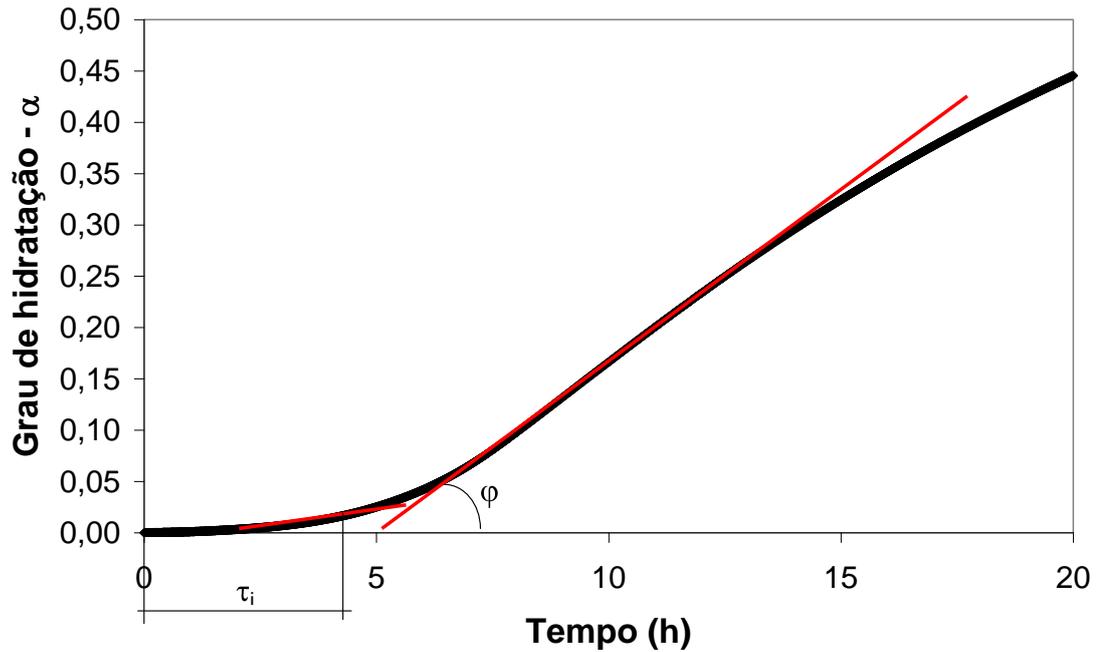


Figura 74: Curva típica da evolução do grau de hidratação

Ambos os parâmetros foram considerados a partir do gráfico plotado. No caso de  $\alpha$ , o tempo base foi o mesmo do calor total envolvido igual a 20 horas  $\alpha_{20h}$ . O fim do período de indução  $\tau_i$  caracteriza-se pelo ponto onde ocorre mudança na concavidade da curva, e a taxa máxima de reação  $\varphi$  é a inclinação do trecho linear da curva. Esse parâmetro é apresentado como valor inteiro e não em graus ou radianos, como normalmente se apresenta a inclinação da reta. Por isso, será chamado também como fator de inclinação  $\varphi$ .

#### 5.4.4 Grau de hidratação $\alpha_{20h}$

O grau de hidratação representa o potencial que a mistura tem no desenvolvimento das reações de hidratação do cimento Portland. Como a quantidade de cimento foi igual para todas as pastas e argamassas, as modificações nesse parâmetro ficam a cargo da relação a/c variável, da presença e teor de RES e da presença e teor do aditivo SP.

Se se analisar a curva das pastas sem aditivo SP, mostrada na figura 75, verifica-se uma modesta tendência da reta em diminuir com a relação a/c. Contudo, não se pode afirmar conclusivamente em função dos dados obtidos, pois há grande dispersão dos dados.

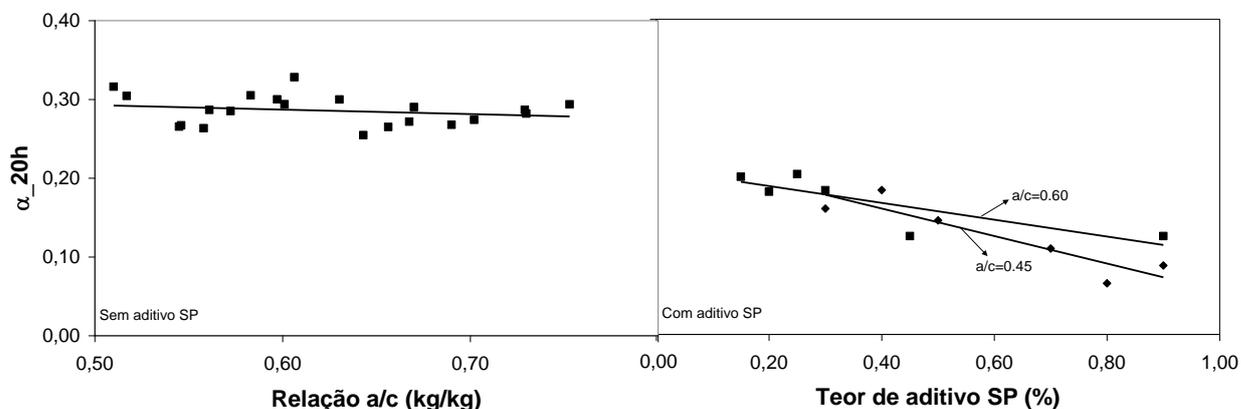


Figura 75: Grau de hidratação  $\alpha$  para idade de 20 horas das pastas

Entretanto, pode-se afirmar que relação a/c mais alta dispersa melhor as partículas de cimento melhorando a hidratação. Porém, há um alívio de calor envolvido pela alta quantidade de água, alternando fortemente os valores finais de  $\alpha$ .

Quando a análise é sobre as argamassas, não há influência decisiva da relação a/c, e sim do tipo e teor de RES, como mostrado na figura 76.

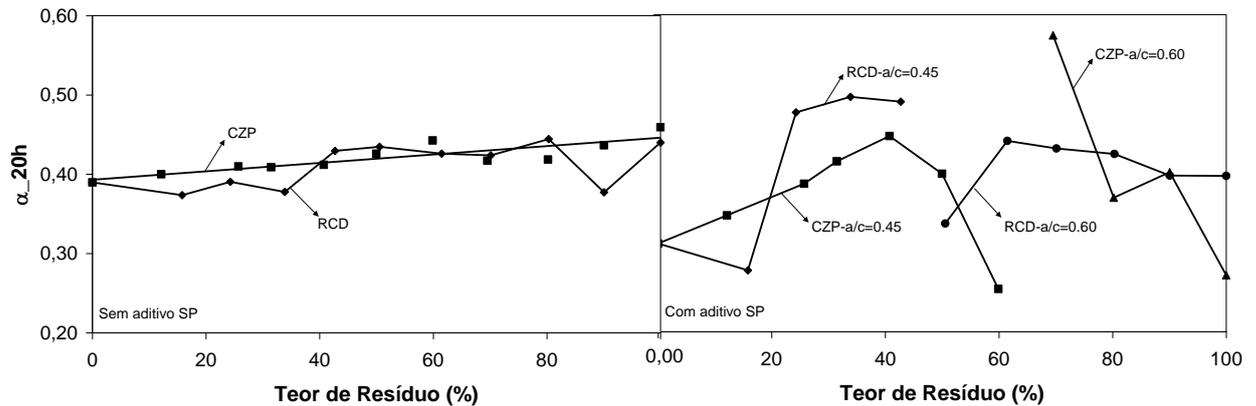


Figura 76: Grau de hidratação  $\alpha$  para idade de 20 horas das argamassas

Ambos os agregados resíduos parecem melhorar a hidratação atingindo um grau maior para o mesmo tempo base de 20 horas.

Com os dados das argamassas de CZP, foi possível estabelecer uma tendência linear com boa correlação, onde  $\alpha$  foi maior com o aumento da quantidade de CZP na argamassa. Isso foi motivado pelo aumento do calor total envolvido, já que, com a CZP sendo empregada, o calor é elevado principalmente pela característica térmica e de porosidade do material.

Com o aumento da variação da temperatura e uma menor perda de calor para o equipamento, há também uma possível aceleração das reações.

Da mesma forma, as argamassas de RCD também possibilitaram o aumento de  $\alpha$ , porém não foi a base do aumento da variação da temperatura, como analisado anteriormente. Credita-se esse efeito ao comentado acima, da possibilidade de formação de pontos extras de nucleação, potencializando o andamento das reações de hidratação, como também da possibilidade da continuidade da hidratação de parte da argamassa antiga aderida aos agregados reciclados.

No entanto, com o aumento das reações, espera-se aumento da temperatura. Mas, tendo em vista que o cálculo do grau de hidratação leva em consideração o calor total envolvido, de acordo com a equação 16, e como o  $Q_{20h}$  para as argamassas de RCD se mostrou crescente com o teor de substituição, o que se afirmou acima pode ser considerado.

Com o aditivo SP, as pastas apresentam um comportamento de redução do grau de hidratação para o tempo de 20 horas com o aumento do teor de aditivo SP. E isso foi mais evidente para a relação a/c 0,45. Possivelmente, esse resultado é devido à alta dosagem do aditivo SP na amostra

de menor relação a/c, pois, para a pasta de a/c 0,60, o fator relação a/c provavelmente comanda a redução do grau de hidratação em relação ao teor de aditivo.

Nas argamassas com relação a/c 0,45, tanto para RCD como para CZP, o aumento do teor de RES, com o aumento do teor de aditivo SP, resultou numa elevação de  $\alpha$ , já que o aditivo promove a melhor dispersão das partículas de cimento melhorando a hidratação.

No entanto, na mudança da relação a/c de 0,45 para 0,60, as argamassas, para ambos os RES, apresentaram redução de  $\alpha$  com o aumento do teor de RES. Isso devido ao alto teor de aditivo SP que as argamassas com alta concentração de RCD e CZP demandam. Dessa forma, o aditivo SP utilizado nessa pesquisa, em grandes quantidades, retarda as reações, diminuindo o grau de hidratação e o calor total envolvido no tempo de 20 horas.

#### **5.4.5 Fim do período de indução $\tau$**

Após o pico elevado de calor gerado ( $\approx 10$  minutos), que é devido às reações instantâneas no contato inicial água-cimento, calor de dissolução, pode-se considerar que inicia o período de indução. Esse intervalo de tempo caracteriza-se por um conteúdo de formação de produtos de hidratação muito pequeno, devido a certa estagnação das reações do cimento Portland.

Desde que essas reações iniciem acentuadamente, é normalmente considerado que o tempo de indução termina e se dá início o tempo de pega, com um aumento brusco na viscosidade e um aumento também rápido do calor gerado, com elevação da temperatura.

Fatores do ambiente, tais como temperatura, umidade relativa, vento, radiação, e/ou fatores internos à mistura, como consumo e tipo de cimento, quantidade de água disponível para a molhagem, presença de aditivos e adições químicas, podem provocar alguma diferenciação na duração do período de indução.

Se se considerar que a presença do RCD e da CZP são elementos diferentes dos comuns utilizados, será necessário avaliar a influência desses na cinética de hidratação das argamassas e, posteriormente, dos concretos estudados na pesquisa.

Observando os resultados em pasta com e sem aditivo SP, figura 77, e nas mesmas relações a/c das argamassas é possível levantar algumas conclusões em relação à influência da relação a/c e da presença e teor de aditivo SP.

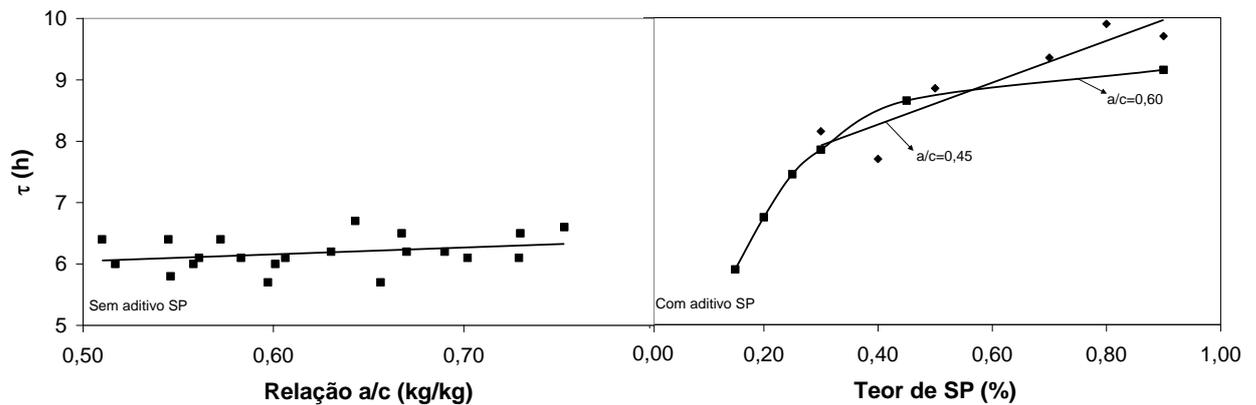


Figura 77: Fim do período de indução  $\tau$  das pastas

Quanto à presença e teor do aditivo SP, fica bem claro que há uma interferência significativa na cinética de hidratação das pastas com significativos retardos nos tempos de início de pega ou fim do período de indução. É válido salientar que esse efeito foi mais significativo para a relação a/c 0,45, que, como já comentado, para teores mais elevados de aditivo SP, sofre mais influência do que as pastas com a/c = 0,60, pois, na segunda série, o fator a/c prepondera sobre o fator teor de aditivo SP.

Já para as pastas sem aditivo, o fato do aumento da relação a/c não modificou consideravelmente o parâmetro  $\tau$ . Um tanto incomum seria esse resultado se as relações a/c utilizadas fossem mais baixas. Contudo, para relações a/c altas, considerando um estudo somente de pastas, o fator a/c não significou mudança significativa, tal qual a mudança observada quando o aditivo SP foi incorporado.

No entanto, há uma modificação na cinética de hidratação com um pequeno retardo no tempo de início de pega, e esse fato é necessário que seja levado em consideração, já que nas argamassas de RES há variação de a/c.

Da mesma forma que para as pastas sem aditivo, os resultados das argamassas sem aditivo não tiveram modificações significativas nos instantes de fim do período de indução (figura 78).

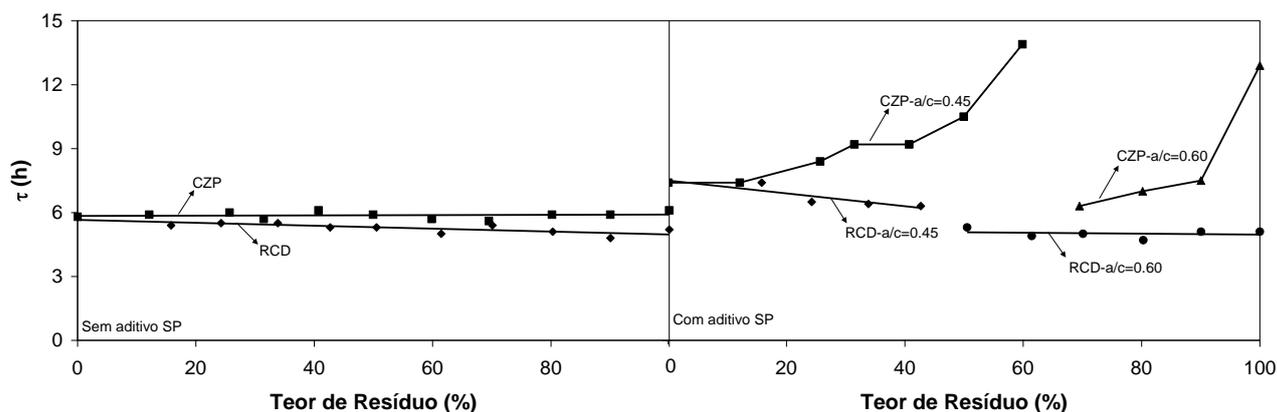


Figura 78: Fim do período de indução  $\tau$  das argamassas

As argamassas de CZP tiveram os tempos aproximadamente iguais para todos os teores, e as argamassas de RCD apresentaram uma suave aceleração com o aumento do teor. Este último devido à possibilidade de retomada da hidratação da parte antiga de argamassa aderida com a presença de alguma partícula de cimento, ou parte dela, anidra, e devido à formação de pontos extras de nucleação, que acelerariam o fim do período de indução.

Das argamassas com aditivo SP (figura 78), a presença de CZP não modificou o comportamento verificado nas pastas com aditivo SP, pois se percebe um aumento do tempo de pega com o aumento do teor para ambas as relações a/c 0,45 e 0,60, onde o aumento do teor de CZP acarreta em aumento do teor de aditivo SP, para uma mesma relação a/c.

Se for analisado esse resultado levando-se em consideração os valores do tempo para o pico de calor e a variação máxima de temperatura com o teor de CZP, comprova-se a tendência no retardo das argamassas de CZP com aditivo SP.

Já as argamassas de RCD com aditivo SP mantiveram o mesmo resultado das sem aditivo SP, mesmo para os teores maiores de aditivo SP, em ambas as relações a/c.

Como parte do aditivo SP fica aderida na superfície dos grãos sólidos não inertes, e como há parcela cimentícia aderida aos agregados de RCD, pode-se concluir que parte do aditivo além de melhorar a dispersão do cimento, possibilitando um melhor desenvolvimento da cinética de hidratação, pode agir como dispersante também das partículas finas presentes no RCD, não provocando retardo no tempo de fim do período de indução, tempo de pega.

### 5.4.6 Taxa máxima de reação $\phi$

A taxa máxima de reação corresponde à inclinação do trecho linear da curva do grau de hidratação no tempo e indica a velocidade de formação dos produtos da hidratação do cimento nas pastas e argamassas estudadas.

Quanto maior for a taxa máxima de reação, ou, como aqui chamada, fator de inclinação, maior será a velocidade de desenvolvimento das reações de hidratação.

Valores menores representam desenvolvimento mais lento durante os tempos de início e fim de pega. Porém, valores maiores não representam aceleração da pega, mas aceleração do intervalo dos tempos de pega. O parâmetro anteriormente estudado  $\tau$  é quem comanda o tempo de início de pega.

O fator de inclinação  $\phi$  é importante para a determinação do intervalo de tempo em que o material ficará submetido à retração plástica, que será analisado no próximo capítulo. Com intervalos grandes, maior tendência à deformação por retração plástica, pois o material cimentício terá menor resistência à deformação pela baixa capacidade de suporte ainda em estágio primário de hidratação.

Sendo assim, espera-se que, com o aumento da relação  $a/c$ , o fator de inclinação diminua, isto é, o intervalo entre o tempo de início e fim de pega aumente com maior tempo até o início do endurecimento e formação de um esqueleto resistente às deformações.

Dessa forma, a figura 79 do estudo em pastas com e sem aditivo SP mostra que realmente há uma tendência ao aumento do intervalo de tempo de pega com a diminuição do fator de inclinação para relações  $a/c$  maiores.

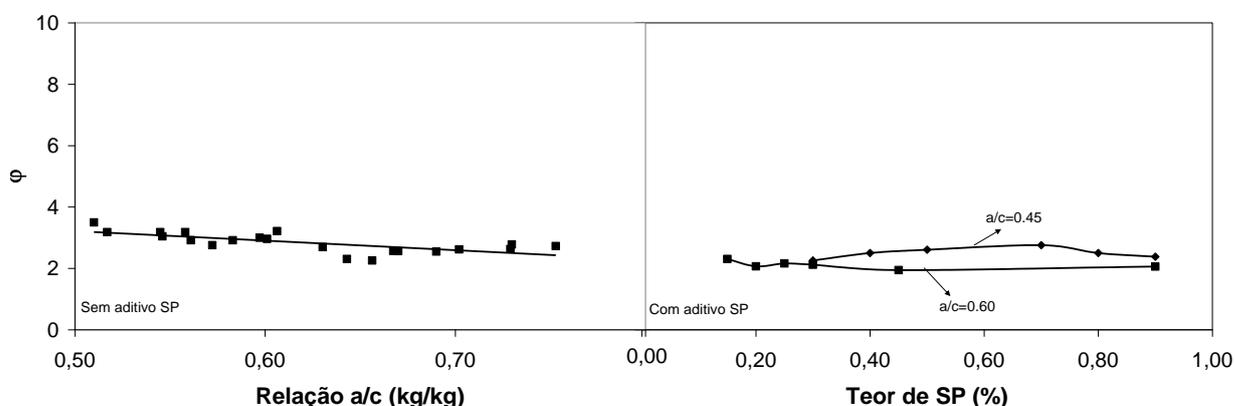


Figura 79: Fator de inclinação  $\phi$  das pastas

Nessa direção, as pastas com aditivo apresentaram valores menores do fator de inclinação  $\phi$ , já que o aditivo SP provoca retardo do início das reações, bem como lentidão no intervalo do início ao fim da pega. Isso principalmente nos maiores teores de aditivo SP.

Salientando que o cálculo de  $\phi$  é a partir da curva do grau de hidratação  $\alpha$  que provém dos resultados de calorimetria  $Q_{max}$ , é de se esperar que os resultados de maior calor possam indicar um maior fator de inclinação.

A figura 80 das argamassas de RCD e de CZP com e sem aditivo SP apresentam os resultados do estudo de  $\phi$ .

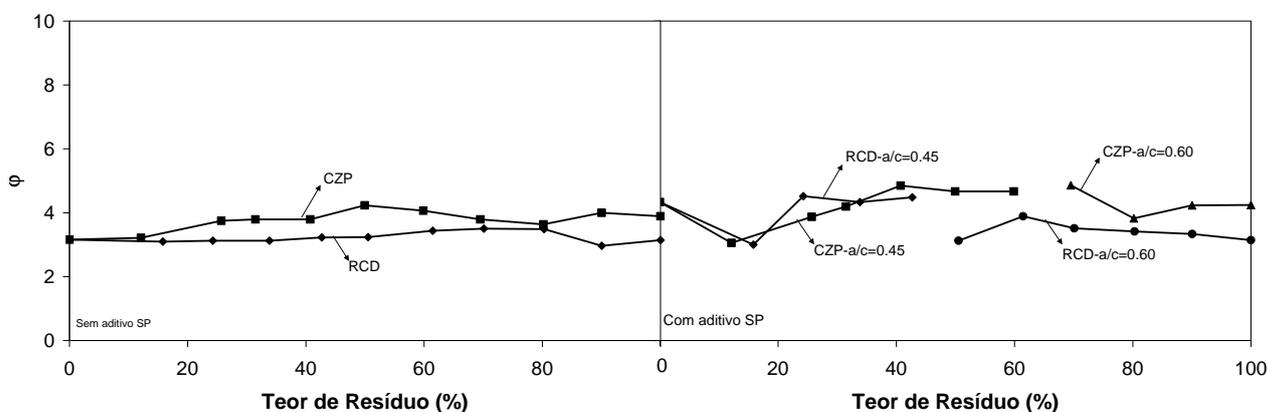


Figura 80: Fator de inclinação  $\phi$  das argamassas

Nas argamassas de CZP sem aditivo SP, há uma leve tendência ao aumento do fator de inclinação, já que os resultados de  $Q_{20h}$  e  $\alpha_{20h}$  mostram elevação com o aumento do teor de CZP. Mesmo que seja modesta a ascendência da curva, pode-se afirmar que, nas argamassas de CZP, houve uma taxa máxima de reação mais elevada para maiores teores de CZP.

Nas argamassas de CZP com aditivo SP, a mesma tendência foi observada, não corroborando os resultados nas pastas, que mostraram retardo no fator de inclinação com o aumento do teor de aditivo SP. Isso pode ser explicado devido a migração de parte do aditivo incorporado para o interior da CZP porosa já que a quantidade de água, que normalmente teria essa direção, foi reduzida. E pela figura 80 se vê que isso foi mais expressivo para a relação a/c menor, igual a 0,45.

Entretanto, não pode-se desprezar o efeito benéfico de melhoramento da dispersão das partículas propiciando melhor superfície de contato para hidratação, com conseqüência numa maior quantidade de reações, aumentando a taxa máxima de reação.

Os resultados das argamassas de RCD, na figura 80, se apresentam bastante semelhantes quanto à tendência explicada acima. Mas o RCD, mesmo poroso, contribui para a aceleração das reações de outras formas, como anteriormente discutido nos tópicos referentes aos parâmetros  $\alpha$  e  $\tau$ .

## ***5.5 Conclusões parciais***

De acordo com os resultados obtidos e apresentados neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

- Não foi possível a manutenção de uma mesma relação a/c nas argamassas quando o RCD e a CZP foram incorporadas em substituição parcial ou total do AGN. Isso foi devido primeiro à característica porosa, promovendo a migração de água para o interior do agregado reciclado, em segundo devido à superfície bastante irregular, e por fim a um alto teor de finos, que demanda maior quantidade de água de molhagem superficial;
- O estudo da fixação da relação a/c para todas as argamassas com RES, foi possível com a incorporação de um aditivo SP, em teores diferentes para cada teor de substituição. Entretanto, a fixação de uma relação a/c para todos os teores de RES incorporado não foi possível, pois a diferença de a/c entre os teores extremos ultrapassou a possibilidade de manutenção da consistência com redução da água promovida pelo aditivo SP. Assim, duas séries de misturas foram feitas:  $a/c = 0,45$  e  $a/c = 0,60$ ;
- Um estudo prévio em pastas com as mesmas características de a/c e de teor de SP das argamassas de RCD e CZP foi realizado. Os mesmos ensaios das argamassas foram executados em pastas. Os resultados preliminares nas pastas mostraram tendências bastante interessantes para prever o comportamento em argamassas;
- De uma maneira geral, a incorporação de CZP como agregado miúdo alterou consideravelmente a cinética de calor gerado e, por conseguinte, a cinética de hidratação do cimento nas misturas. A variação máxima da temperatura, o pico de calor gerado, a taxa máxima de calor, o calor total envolvido em 20 horas e o grau de hidratação em 20

horas, apresentaram tendência de crescimento com o aumento do teor de CZP. Isso foi devido principalmente a duas características do material reciclado: calor específico menor, com perda de calor menor, e maior porosidade, conseqüentemente maior quantidade de ar interno ao grão, aumento do isolamento térmico da mistura, sem que houvesse perda de calor;

- Nas argamassas de RCD, mesmo com menores valores da variação máxima de temperatura, a tendência dos parâmetros de calor foi crescente com o aumento do teor de RCD. Os dois principais efeitos que modificaram a cinética de hidratação avaliada pelos parâmetros de calorimetria foram o potencial de contribuir com pontos extras de nucleação, pela presença de material cimentício nos agregados de RCD, e de uma possível retomada da hidratação de alguma parcela cimentícia anidra;
- Para ambos os resíduos, RCD e CZP, a parcela de finos presentes possibilitou uma melhor distribuição das partículas, contribuindo para uma separação dos aglomerados de cimento, com uma melhor hidratação. Por conseqüência, os parâmetros de calor aumentaram, caracterizando um melhor desenvolvimento da hidratação;
- Na presença de aditivo SP, as argamassas de RES tiveram sensíveis modificações em relação ao estudo sem aditivo. Isso foi mais acentuado quanto maior o teor de aditivo SP, levado pelo aumento no teor de RES, para uma mesma relação a/c. Para a relação a/c 0,45, o aditivo SP foi o fator modificador. Entretanto, para a/c 0,60, a relação a/c mais alta contribuiu para as variações na cinética de hidratação juntamente com o aditivo SP, levando-se em consideração o estudo das pastas.

---

# **Capítulo 6 - Análise da incorporação de cinzas pesadas na retração plástica de concretos**

---

Analisar os parâmetros de retração plástica de concretos significa identificar os fatores que a provocam. Alguns desses principais fatores de influência são explorados nessa tese: cinética de hidratação e desenvolvimento da temperatura e do calor, evolução da hidratação através da consideração dos tempos de início e fim de pega, potencial de perda de água por exsudação, potencial de saída de água do concreto por evaporação e a deformação linear por retração plástica.

A curva modelo do monitoramento da deformação por retração plástica dos concretos está mostrada na figura 81.

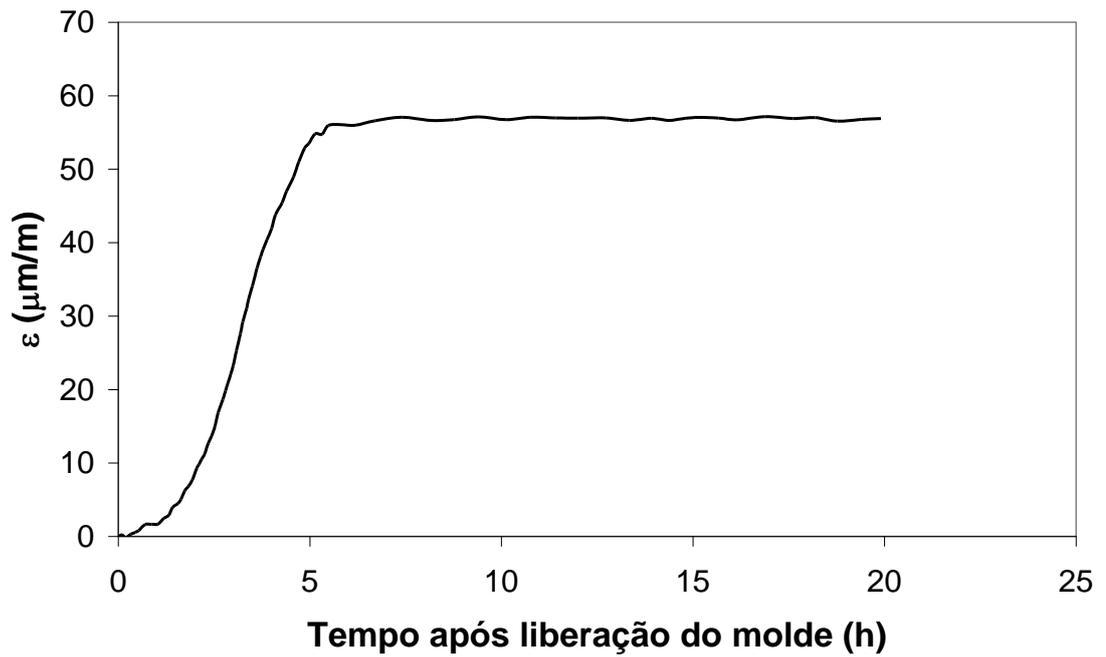


Figura 81: Curva típica de deformação por retração plástica  $\epsilon$  do concreto

As curvas de evolução dos resultados obtidos nos ensaios, plotadas todas num mesmo gráfico, está mostrada na figura 82 e serão apresentadas para cada teor estudado das três séries de concretos no anexo 6 desse documento.

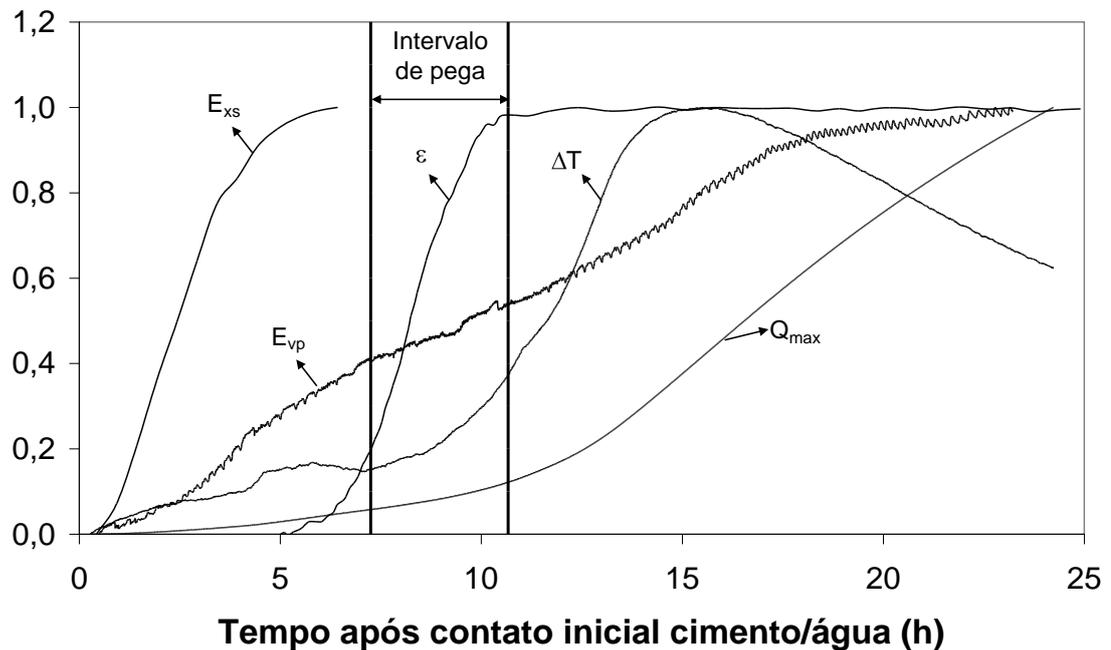


Figura 82: Curvas típicas dos parâmetros de retração plástica estudados ( $E_{xs}$ : exsudação;  $E_{vp}$ : evaporação;  $\varepsilon$ : deformação por retração plástica;  $\Delta T$ : variação da temperatura;  $Q_{max}$ : calor gerado ao longo do tempo)

Como já explorado no terceiro capítulo, “*Materiais e métodos experimentais*”, a bancada experimental foi montada e todos os ensaios de medição dos parâmetros de retração plástica foram realizados num mesmo tempo e sob uma mesma condição de exposição, em uma sala climatizada.

O ambiente climatizado foi monitorado continuamente. A umidade relativa e a temperatura inicial fixadas para os ensaios foram de  $23\pm 1^\circ\text{C}$  e  $65\pm 5\%$ , respectivamente. A figura 83 apresenta o resultado médio final do monitoramento da sala climatizada para a execução dos ensaios de retração plástica ao longo de 28 dias de utilização da sala.

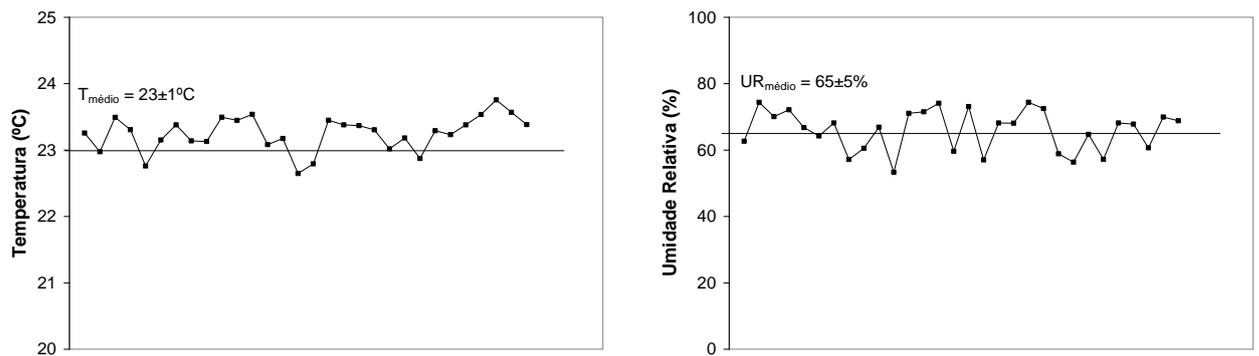


Figura 83: Valores médios da temperatura e umidade relativa

As três séries de concretos com CZP incorporadas, série 1, 2 e 3, resultaram em misturas diferentes do ponto de vista dos parâmetros de retração plástica. Como será explorada nos tópicos seguintes, a diferença basicamente concentrou-se sobre a relação a/c diferente da série 1 para as séries 2 e 3 e sobre a dosagem do aditivo SP diferente em todas as séries, para cada teor de CZP. A manutenção de uma mesma quantidade de materiais sólidos (cimento+agregados) para todas as séries contribui para um melhor entendimento da influência da relação a/c e do teor do aditivo SP nos parâmetros de retração plástica abordados.

A variação de a/c dos concretos de CZP da série 1 em relação às séries 2 e 3 manifesta a mesma tendência de outros concretos com materiais convencionais, exceto pela magnitude da variação dos parâmetros. Isso ocorre já que a CZP possui características excepcionais aos materiais comuns naturais, com possibilidade de absorção e fixação de água pelas características porosa e forma irregular. Também aumenta a demanda de água com a incorporação de uma parcela maior de material fino passante na peneira 0,15mm comparado à areia natural substituída.

Os concretos de CZP da série 1 foram os que tiveram a relação a/c semelhantes ao estudo em argamassa, conforme o quinto capítulo, “*Influência de materiais granulares reciclados como agregado miúdo na evolução do calor de hidratação de concretos*”. Como com os valores do ajuste de água nas argamassas transportados para os concretos não foi possível obter uma trabalhabilidade adequada com vistas em concreto para fins estruturais, com adequada bombeabilidade, a incorporação de um aditivo superplastificante SP foi necessário para aumentar a fluidez.

Assim, o aditivo SP foi utilizado buscando: a) contribuição para o aumento da fluidez na série 1, fixando teor de SP e variando a/c; b) redução de água da série 1 para uma mesma

trabalhabilidade e nova relação a/c fixa, série 3; e c) estudo da influência do teor de aditivo SP fixado na série 1 para a relação a/c fixada na série 3.

A tendência dos resultados dos concretos da série 1 é de que a relação a/c maior exerça maior influência nos resultados do que a presença do aditivo SP. Isso poderá ocorrer principalmente para a/c mais elevado, conduzindo a maiores tempos de pega com forte contribuição do aditivo SP, que funciona bem para relações a/c abaixo de 0,48, conforme o fabricante. De outra maneira, pode retardar o tempo de início de pega.

A série 2, com a/c fixa e teor de SP fixo, tende a apresentar forte influência do aditivo SP nos teores mais baixos de CZP de M500 até M300, já que a relação a/c dos concretos desses é aumentada para que todos os concretos estejam iguais em a/c, de acordo com a série 3. Esse fato leva a um aumento excessivo da fluidez, que tende a provocar segregação excessiva com elevada perda de água por exsudação, com conseqüente evaporação, e, assim, grande deformação por retração plástica. Já os concretos de maior teor de substituição, M200 e M150<sup>5</sup>, tendem a ter o comportamento semelhante aos concretos ajustados de aditivo SP da série 3.

Por fim, a partir da série 3, produziram-se concretos com realidades mais justas de comparação da influência da CZP em substituição do AGN. Contudo, em virtude da alta demanda de água dos concretos de maiores teores de CZP, em comparação ao concreto referência M500, houve necessidade de aumento do teor de SP acima do limite de uso especificado pelo fabricante. Assim, há tendência em aumento da deformação por retração plástica em virtude de um possível retardo de pega que o alto teor de SP poderá acarretar.

Dentro dessa perspectiva geral de características e tendências dos parâmetros de dosagem dos concretos das séries 1, 2 e 3, os parâmetros de retração plástica serão abordados e analisados.

---

<sup>5</sup>Os concretos M100, M50 e M0 da série 2 não resultaram em misturas trabaláveis pela alta demanda de aditivo SP em virtude da redução de a/c. Dessa forma, não foram realizados os ensaios dos parâmetros de retração plástica.

## ***6.1 Análise da cinética das reações de hidratação pela evolução da temperatura e do calor gerado***

A importância da análise da cinética de hidratação do cimento nos concretos de CZP, através do ensaio de calorimetria, é fundamental para verificar o desenvolvimento do calor envolvido durante as reações para o estabelecimento da influência da CZP e do aditivo SP na deformação por retração plástica, pois o tempo e a velocidade de formação da matriz rígida que resistirá às deformações por retração plástica estão diretamente ligados com a curva de calor envolvido e a curva do grau de hidratação.

O tempo de ocorrência de um fenômeno no ensaio de calorimetria está relacionado com o tempo de pega e o estabelecimento inicial do estado semi-rígido e não plasticamente deformável, conforme ESPING e LÖFGREN (2005), ou com o início da fase endurecida no final da pega.

A velocidade está vinculada à taxa de crescimento dos valores dos parâmetros analisados, como deformação, intervalo entre início e fim de pega, grau de hidratação, evaporação.

O calor calculado através do monitoramento contínuo da temperatura da amostra foi obtido através do ensaio em um calorímetro semi-adiabático, já discutido nos capítulos 3 e 5.

A evolução da temperatura foi realizada segundo o procedimento descrito no item 3.2.5.2 do capítulo terceiro, da amostra de concreto do ensaio de evaporação. Um modelo da curva de evolução de temperatura por este método de medição está mostrado na figura 84.

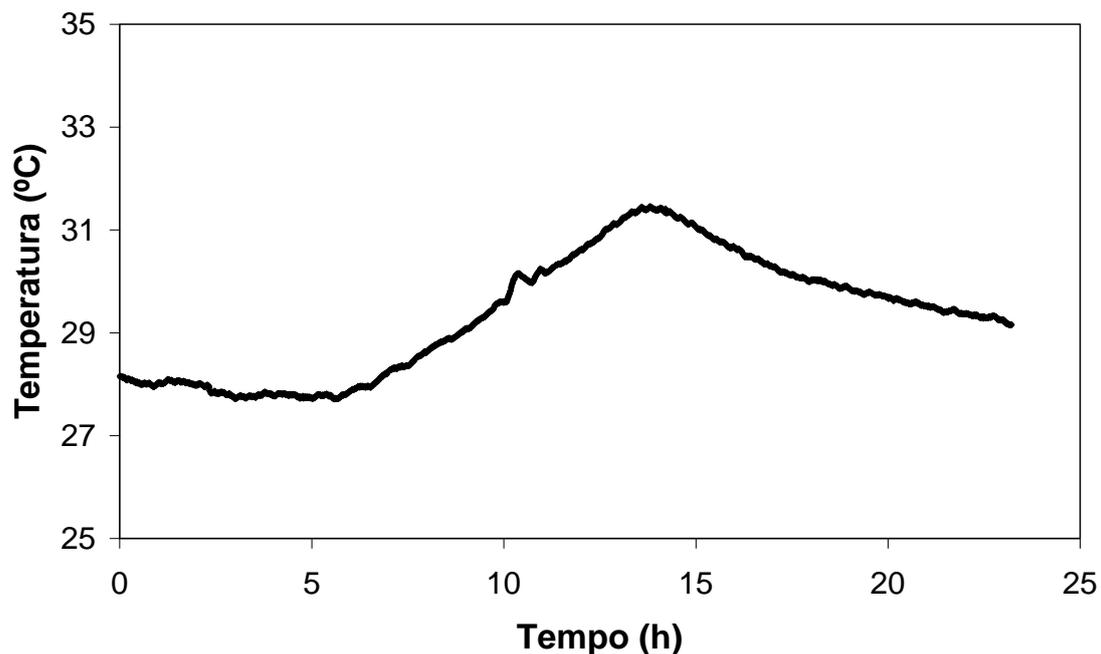


Figura 84: Curva típica de evolução de temperatura da amostra do ensaio de evaporação

Não é conveniente que os parâmetros de caracterização da cinética de hidratação sejam calculados a partir desses dados, e sim a partir da curva obtida do ensaio em calorímetro semi-adiabático, onde não há variação da temperatura do ambiente significativa e nem perda de água da amostra por evaporação.

A partir dos dados obtidos, não foi possível obter o valor do tempo de início de pega próximos dos tempos obtidos pelo de Vicat modificado. Assim, essa medição proposta por ESPING e LÖFGREN (2005) não é interessante para a verificação, pelo menos com essa categoria de concreto, que incorpora resíduos industriais em substituição ao AGN.

Observando os resultados referentes às variações máximas de temperatura e o tempo até alcançá-las, mostrados na figura 85, é possível traçar uma tendência para modificações em virtude do teor de CZP, da presença e teor de SP, da influência da relação a/c e, principalmente, do tipo de dosagem (série 1, 2 e 3).

Como no capítulo 5, as curvas de evolução de calor estão mostradas no anexo 7 desse documento.

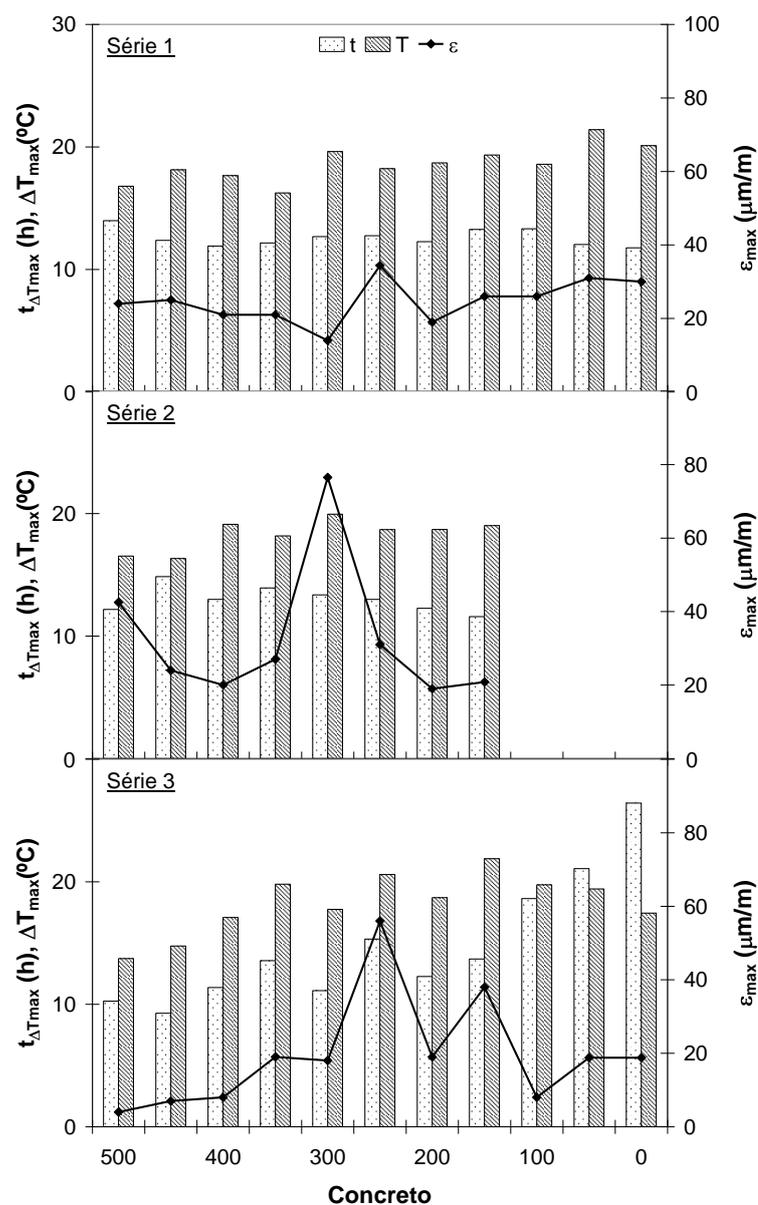


Figura 85: Influência da variação máxima da temperatura e tempo até a máxima temperatura, na retração plástica dos concretos de CZP

O aumento da temperatura do concreto tende a estabelecer que há um aumento na quantidade de reações e, assim, um aumento da cinética de hidratação. Se o aumento da temperatura estiver relacionado com uma diminuição do tempo até o endurecimento, ou seja, redução do tempo até o pico de maior temperatura, pode-se afirmar que o concreto terá maior deformação por retração plástica.

Entretanto, se houver efeitos simultâneos de aumento da temperatura e do tempo até o pico de temperatura, não se pode afirmar decisivamente que haverá aumento da deformação.

Segundo a figura 85, na série 1, para um mesmo tempo do pico de calor com um aumento da variação da temperatura em função do aumento do teor de CZP, observa-se que há um aumento na deformação máxima por retração plástica  $\epsilon_{\max}$ .

Como a série 1 teve a relação a/c variável, com valores mais altos para maiores teores de CZP, o esperado seria redução de  $\epsilon_{\max}$ , já que há uma maior quantidade de água disponível para aliviar o efeito da retração. Porém, com o efeito de melhoramento da dispersão das partículas pelo aditivo SP, pode-se considerar que há maior quantidade de reações, com conseqüente aumento da temperatura e também maior concentração de calor pelo efeito da CZP, já explorado no capítulo quinto.

Contudo, se forem observados os menores teores de CZP (até 40%), percebe-se que há uma redução de  $\epsilon_{\max}$ , para uma diferença de 7% na relação a/c, considerada baixa. Nessa direção, poder-se-ia intuir que a CZP poderia contribuir para a redução de  $\epsilon_{\max}$ .

Para a série 2, a trabalhabilidade nos menores teores de CZP (até 30%) foi fortemente alterada pela elevação de a/c em relação à série 1, com a fixação de SP em um valor alto para a quantidade de água envolvida. Dessa forma,  $\epsilon_{\max}$  apresentou redução considerável com o aumento do teor de CZP, exceto pelo valor em M300, que mostrou característica atípica em comparação aos outros teores.

Nessa série, o efeito de elevação do pico de temperatura e diminuição do tempo até esse pico pode ser conferido, embora o efeito da presença da CZP tenha sido o fator preponderante para a redução de  $\epsilon_{\max}$ .

A partir da dosagem equilibrada do aditivo SP para a relação a/c utilizada na série 3, o efeito CZP já não pode ser considerado, pois o teor de SP foi significativo nos concretos com maior quantidade de CZP, resultando em aumento do tempo até o pico de temperatura. Assim, o retardo das reações não possibilitou maior deformação por retração, mesmo que com um patamar de temperatura maior do que M500 na série 3.

Já nos teores de CZP até 60%, considerando M250 como espúrio, o efeito da dosagem adequada do SP, sem provocar retardo nas reações, e o fato do aumento do teor de CZP elevar a temperatura, possibilitaram uma tendência de elevação de  $\epsilon_{\max}$  com o aumento da temperatura. Nisso, não pode-se conferir o efeito de melhoramento da deformação por retração plástica

esperada pela presença da CZP. Isso se explica pela relação a/c não ser adequada para uma migração efetiva da água para a CZP.

Os parâmetros de calor calculados a partir dos dados de temperatura e da amostra permitem que as afirmações anteriores sejam confirmadas. A figura 86 mostra os resultados calculados dos parâmetros do calor envolvido.

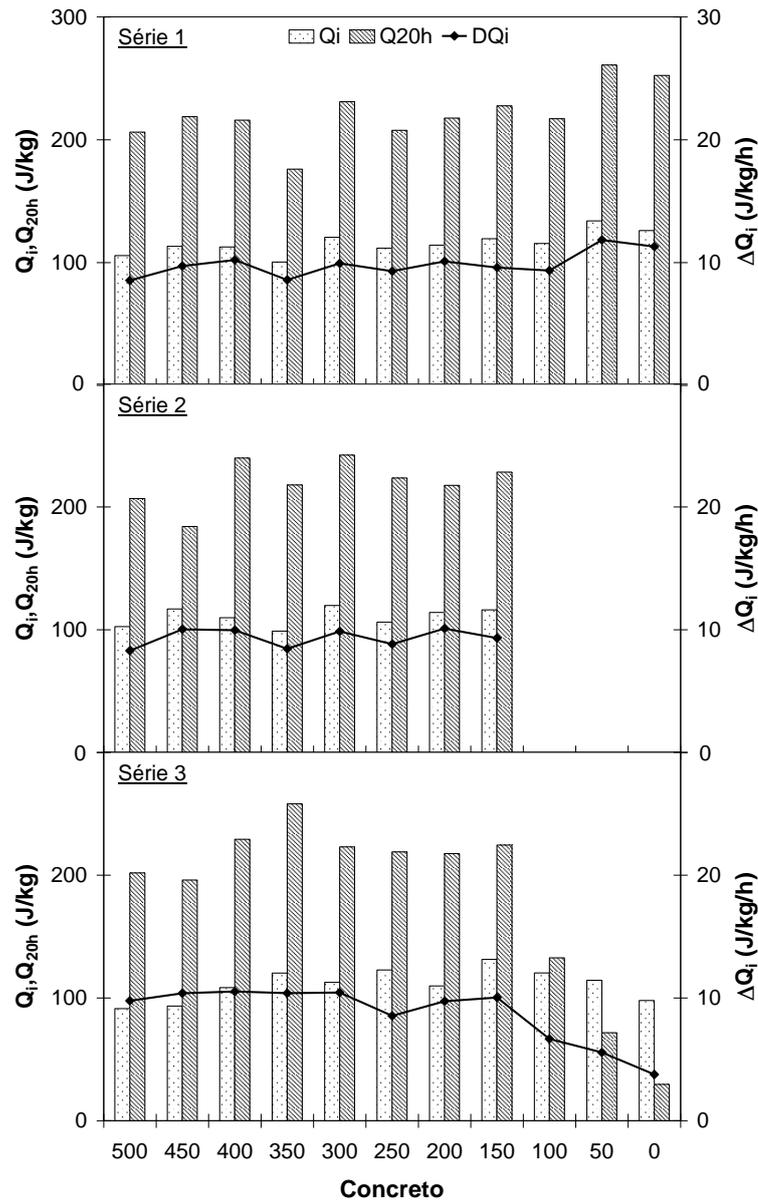


Figura 86: Pico de calor, calor total em 20 horas e taxa máxima de calor

Como os valores de  $Q_i$ ,  $Q_{20h}$  e  $\Delta Q_i$  são calculados a partir dos dados da figura 86, então as tendências são as mesmas.

O pico de calor  $Q_i$  está diretamente envolvido com a elevação da temperatura; assim, onde na figura 85 houve aumento da variação máxima da temperatura o valor de  $Q_i$  aumentou, estabelecendo a afirmação de que há maior quantidade de reações e maior concentração de calor, devido à maior cinética de hidratação e à presença da CZP, respectivamente.

A taxa de desenvolvimento do calor  $\Delta Q_i$  melhora o entendimento para a consideração de um efeito de retardo ou aceleração. Para a série 1, os concretos com maiores teores de CZP apresentaram maiores taxas  $\Delta Q_i$ , pois continham maior quantidade de água. Como a CZP não funcionou como mitigadora da deformação plástica e o tempo para o pico de calor foi menor do que o concreto de referência propõe-se que o fator de maior  $\Delta Q_i$  proporcionou mais reações em menores tempos.

Para a série 2, a taxa se manteve praticamente constante nos teores de CZP, e na série 3 mostrou a redução significativa devido ao retardo forte das reações de hidratação pelo aumento do aditivo SP.

Os valores do calor total em 20 horas de ensaio  $Q_{20h}$  concordam com as considerações feitas sobre a taxa de calor, já que depende do crescimento do calor ao longo do tempo. Esse parâmetro permite que seja relacionado o grau de hidratação do cimento no concreto em função do tempo. Logo, possibilita afirmações de que há aceleração ou retardo das reações de hidratação para valores maiores ou menores num mesmo tempo.

A evidência mais significativa dos resultados está na série 3, nos teores mais elevados de CZP M100, M50 e M0, devido ao retardo das reações pelo aumento do teor de aditivo SP.

Uma outra forma de apresentar o retardo das reações e, conseqüentemente, o atraso no tempo de início de pega, é através dos parâmetros resultantes da curva do grau de hidratação ao longo do tempo.

Considerando um tempo base de 20 horas, a figura 87 apresenta a influência da dosagem dos concretos e teor de CZP nos parâmetros de grau de hidratação  $\alpha_{20h}$ , fim do tempo de indução  $\tau_i$  e taxa de reação  $\phi$ .

O grau de hidratação e o calor máximo envolvido em 20 horas estão diretamente ligados e apresentam as mesmas características nos gráficos.

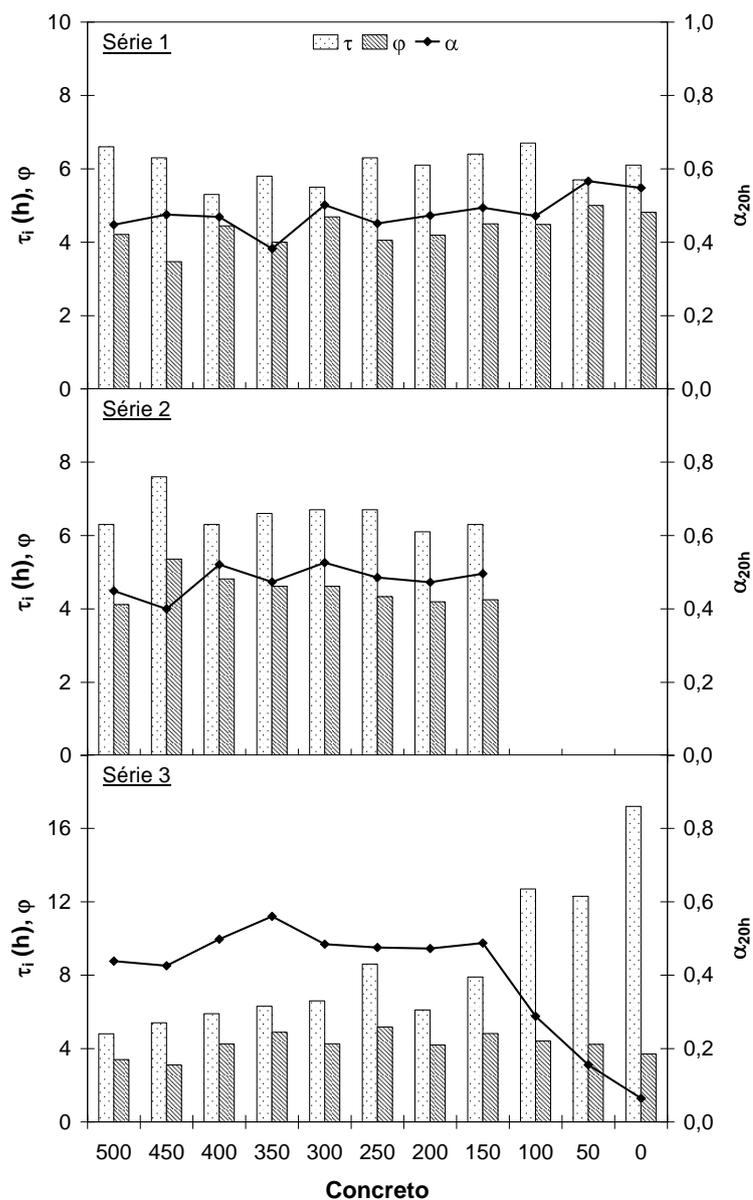


Figura 87: Parâmetros da curva do grau de hidratação no tempo

É importante verificar que a presença de CZP proporcionou pelo menos a manutenção do patamar de hidratação em relação a M500, exceto em M100, M50 e M0 da série 3. Este fato está relacionado com o calor mais elevado gerado nas amostras com CZP. A dispersão melhorada das partículas de cimento pela inclusão do aditivo SP também contribuiu para o desenvolvimento da cinética de hidratação com elevação do calor.

Pode-se afirmar ainda que a CZP influencia ainda mais na cinética de hidratação se se considerar seu efeito de reservatório de água liberando-a para a hidratação ao passo que se consome ou se perde por exsudação e evaporação.

Dessa forma, tanto o calor quanto o grau de hidratação são afetados e a cinética é melhorada. Entretanto, a evolução diferenciada das reações poderá resultar em aumento da deformação por retração plástica, de acordo com o resultado comparativo das figuras 86 e 87.

O fator de inclinação  $\phi$ , que representa a taxa de reação no trecho linear da curva do grau de hidratação, esclarece a afirmação acima, pois, para maiores valores de  $\phi$ , há mais reações, com aumento de  $\alpha_{20h}$  e aumento da taxa  $\epsilon_{max}$ , figura 88 .

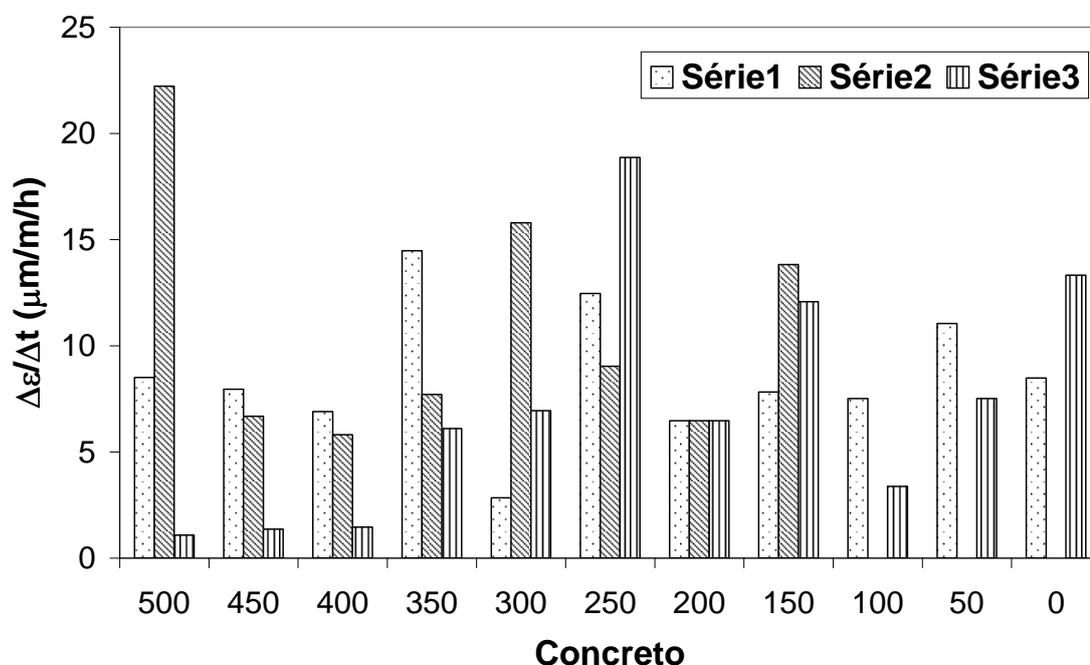


Figura 88: Taxa de desenvolvimento da deformação por retração plástica

Se a taxa de  $\epsilon_{max}$  aumenta, há grande chance de o valor de  $\epsilon_{max}$  aumentar, principalmente se o intervalo linear e o próprio valor de  $\phi$  aumentarem. Com isso se teria grande inclinação durante maior tempo.

Na série 1, a suave elevação de  $\alpha_{20h}$  foi motivada em parte pelo aumento de  $\phi$ . Este fato pode ser considerado mais significativo se for levado em consideração que há diminuição de  $\tau_i$ , em relação ao concreto referência, fazendo com que as reações iniciem mais cedo. Contudo, se isto ocorre,

pode-se dizer que a deformação será maior, como se mostra na figura 85, já que o concreto apresenta maior taxa de reação, em presença de maior quantidade de água, e menos tempo foi disponível para a evaporação até o fim do período de indução  $\tau_i$ . E se mais água está disponível para ser perdida por evaporação, maior será a deformação  $\varepsilon_{\max}$ .

Na série 2, observou-se um equilíbrio entre os teores de CZP nos parâmetros da curva do grau de hidratação, pois, para teores menores (M500-M300), a relação a/c e o teor de aditivo foram elevados, aumentando  $\tau_i$ , reduzindo  $\phi$  e, assim, diminuindo a deformação. Nos maiores teores de CZP (M250-M150), com dosagens de água mais justas (a/c=0,60), de acordo com o teor de SP utilizado (SP = 0,60%), o efeito modificador da CZP manteve a tendência na série, observada para o, teores mais altos, exceto em M300, que mostrou resultado elevado de  $\varepsilon_{\max}$ .

Por fim, a dosagem da série 3, que teve o teor de aditivo SP fixado de acordo com a trabalhabilidade, apresentou um crescimento em  $\tau_i$  com o aumento de CZP, já que a demanda de SP aumentou. Porém, a taxa de reação não diminuiu e igualmente o grau de hidratação, exceto para os concretos de CZP com dosagens elevadas de SP: M100, M50 e M0.

Até M150, na série 3,  $\phi$  foi maior do que M500 e também  $\alpha_{20h}$ , porém  $\varepsilon_{\max}$  também foi maior, pois o efeito da CZP não ocorreu.

Acredita-se que a dosagem da série 3 até M150 não promova o efeito de liberação da água pela CZP, pois a quantidade de água utilizada não possibilita uma migração para o interior das partículas porosas suficiente para uma subsequente liberação, e o efeito do aditivo tenha o seu pleno desenvolvimento, melhorando a trabalhabilidade para um a/c fixo.

## ***6.2 Análise dos tempos de início e fim de pega***

A determinação dos tempos de início e fim de pega é importante para a análise do início do período de desenvolvimento da deformação por retração plástica e também para verificar se esse mesmo período apresenta uma ocorrência mais ou menos alongada.

A presença da CZP tende a elevar tanto o início como o fim da pega, pois há maior demanda de água. Se a relação a/c for fixada, o efeito de liberação de parte da água contida na CZP poderá ser analisado.

A presença do aditivo SP também influencia os tempos de pega. Para teores otimizados em relação à quantidade de água, o efeito pode ser acelerador. Porém, para altas dosagens de SP, ocorrerá retardo.

Diante dessas considerações, salienta-se que, na série 1, os concretos tiveram a quantidade de água otimizada, de acordo com o estudo em argamassa, e a dosagem de SP foi adequada para a meta de fluidez. Com isso, a presença de CZP mostra elevação dos tempos de início e fim de pega com o aumento do teor, conforme a figura 89.

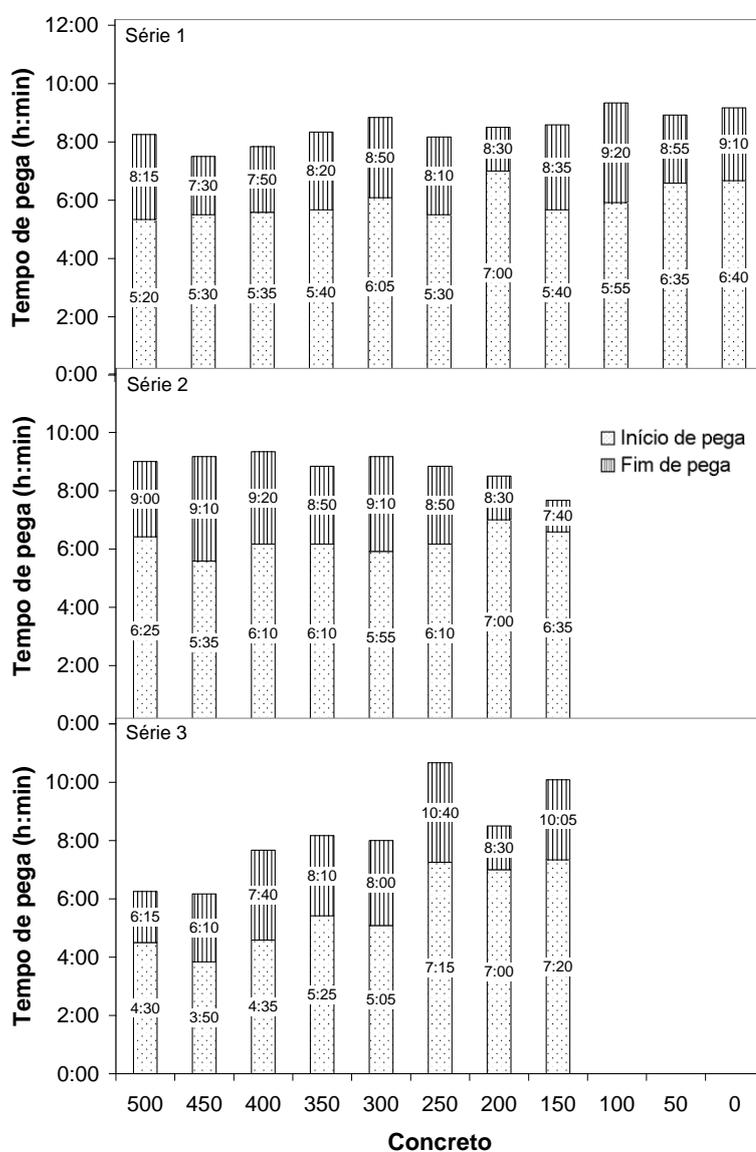


Figura 89: Determinação dos tempos de início e fim de pega dos concretos pelo método de Vicat modificado

A cargo de uma maior relação a/c, afirma-se que a presença de CZP retarda o início da pega e seu final nos concretos da série 1. Muito embora a modificação seja bastante suave, os teores acima de 80% apresentaram significativa elevação.

Na série 2, a grande fluidez nos menores teores de CZP, desde M500 até M300, e o efeito da dispersão excessiva do aglomerante levou a maiores retardos, crescente com a diminuição do teor de CZP. A partir de M300, quando a quantidade de aditivo e a quantidade de água estão equilibradas para o teor de CZP empregado, o efeito retardador do resíduo pode ser mais bem considerado. O efeito de retardo em relação a M500 pode-se considerar sob o aspecto da liberação de parte da água absorvida internamente pelo grão poroso para a mistura. Isso ocorre durante o período de indução, aumentando o tempo de pega, e durante o intervalo entre o início e fim de pega, aumentando a água disponível para a hidratação, contribuindo para a cinética das reações, mas não levando a um aumento da deformação por retração plástica.

Para os concretos com o teor de SP ajustados em função da trabalhabilidade, série 3, vale a afirmação de que um teor de SP acima do otimizado acarreta em retardo da pega. Muito embora haja um atraso das reações, não há diminuição de  $\epsilon_{\max}$  se não houver água suficiente para exsudar frente à evaporação durante o período de indução e durante o período entre início e fim de pega.

Para o caso aqui considerado, a quantidade de água que saiu por exsudação não foi suficiente para manter o mesmo nível de deformação de M500.

Como há possibilidade de se obter o tempo de início de pega através das curvas de evolução da temperatura, do ensaio de evaporação e da curva do grau de hidratação, pela consideração de  $\tau_i$ , a figura 90 propõe uma comparação do resultado do tempo de início de pega.

Nos concretos da série 1, pode-se dizer que há uma menor homogeneidade na distribuição da água na mistura, e com isso a dispersão dos resultados da pega nos três métodos é maior. Quando o aditivo SP comandou a dispersão, nos concretos da série 2 e principalmente nos da série 3, os resultados mostraram menor dispersão e até pode-se traçar uma tendência. Segue-se com o método da curva do grau de hidratação resultando em valores maiores, o da evolução da temperatura menores valores, e o método do Vicat modificado os valores intermediários.

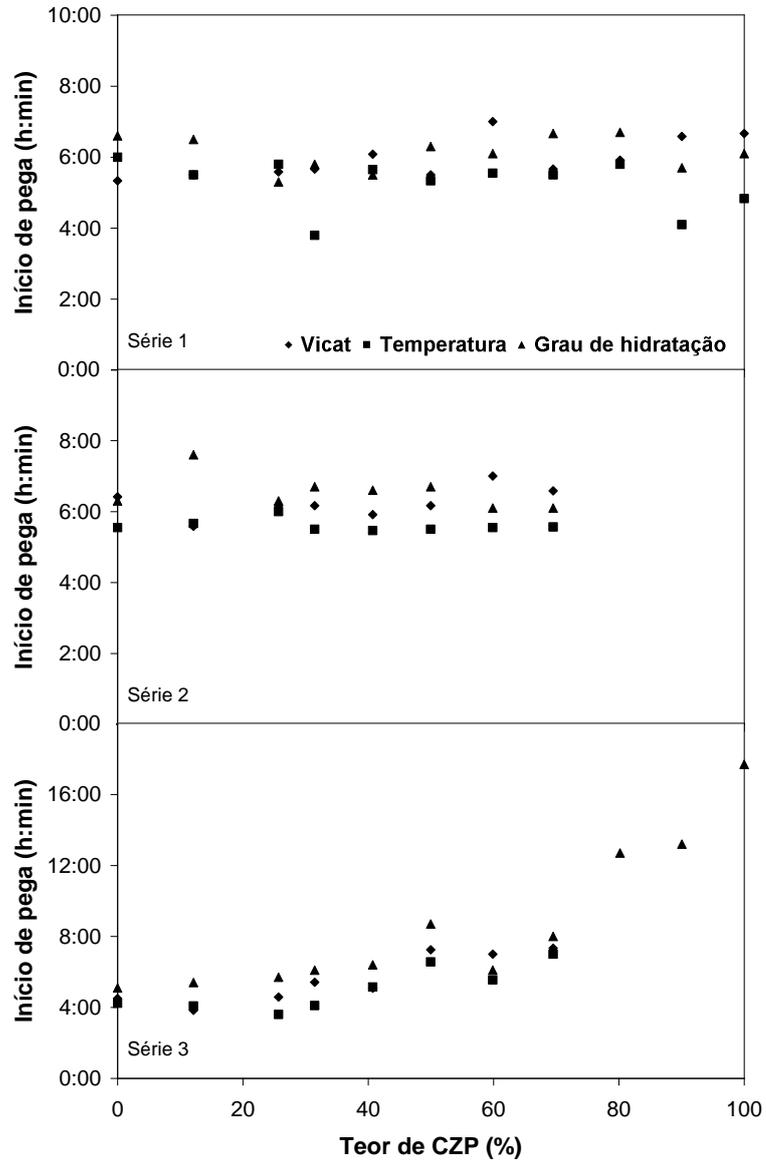


Figura 90: Tempos de início de pega determinados pelo Vicat modificado, curva de evolução de temperatura e curva do grau de hidratação

### ***6.3 Análise da perda de água por exsudação***

Enquanto houver exsudação, há um meio normal de fornecimento de água para a superfície para que seja evitada a retração plástica. Para entender o fenômeno, é necessário que o diagnóstico passe pelo entendimento do parâmetro de exsudação.

É importante salientar que o ensaio e as medições se desenvolvem durante o estado fresco, antes da pega do cimento. Assim, toda a água que ascendeu à superfície por exsudação foi coletada sem que se tenha formado nenhuma lâmina de água posterior ao início da pega. Isto sugere que este parâmetro seja um indicativo de previsão para o estado pós-pega.

Contudo, o ensaio de deformação por retração plástica e o de medição da água evaporada no tempo não tem a água exsudada coletada e, dessa forma, consideram o estado real do fenômeno.

A perspectiva geral é de que o aumento na quantidade de água nas misturas eleve a quantidade que migra do interior do concreto para a superfície.

A figura 91 mostra a evolução da quantidade de água que ascende à superfície por exsudação  $E_{xs}$ .

Observando a figura 91 na série 1 nota-se que o concreto referência M500 não foi a dosagem que levou a menores valores de  $E_{xs}$ , e sim as mesclas M450 e M400. Partindo das afirmações do capítulo 4 sobre o melhoramento granulométrico e de efeito de preenchimento que os finos abaixo de 0,15mm das CZP proporcionam, pode-se concluir que há uma melhor distribuição das partículas de agregado no concreto, tornando-o menos susceptível à perda de água.

Considerando que as mesclas M450 e M400 continham mais água incorporada e que poderiam permitir uma liberação com mais eficácia dessa água durante a exsudação pela hipótese de efeito de reservatório da CZP, os menores índices demonstram que há um melhoramento da distribuição das partículas, que resultará, após a pega inicial, num refinamento dos poros.

Para os outros teores abaixo de M400, o comportamento foi na direção de maior perda de água quanto maior o teor de CZP.

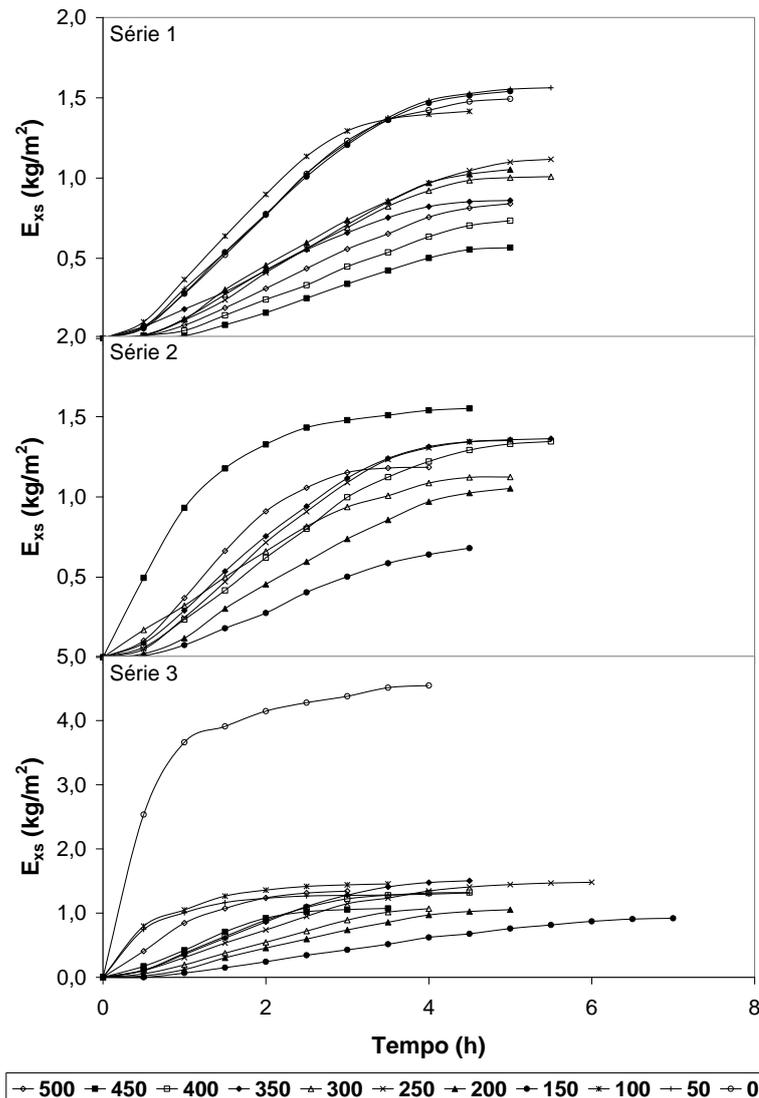


Figura 91: Evolução da ascensão de água por exsudação à superfície

Nos concretos da série 2, com mesma relação a/c, o efeito da migração de parte da água para o interior da partícula e a possibilidade de fixação da água na superfície devido à forma irregular e pelo aumento do número de partículas finas pode ser melhor visto. Os concretos de menores perdas por exsudação são os de maior teor. Isso porque parte da água está na CZP e não há uma liberação durante o tempo de ensaio tal que modifique a tendência.

Assim, os valores de  $E_{xs}$  são menores para os maiores teores de CZP, exceto o teor da mescla M450, que resultou em valor distante.

Da mesma forma que na série 2, na série 3 os concretos com mais CZP resultaram em menores perdas por exsudação. Exceto os concretos M100, M50 e M0, que tiveram alto teor de aditivo SP

e assim uma diminuição brusca da viscosidade da água, que resultou em dificuldade na fixação, e em elevada perda de água por exsudação.

As afirmações acima são melhor entendidas se forem observadas as curvas de tendência da figura 92, que relaciona a exsudação total  $E_{xs-T}$  e a taxa de exsudação  $\Delta E_{xs-T}$  com o teor de CZP.

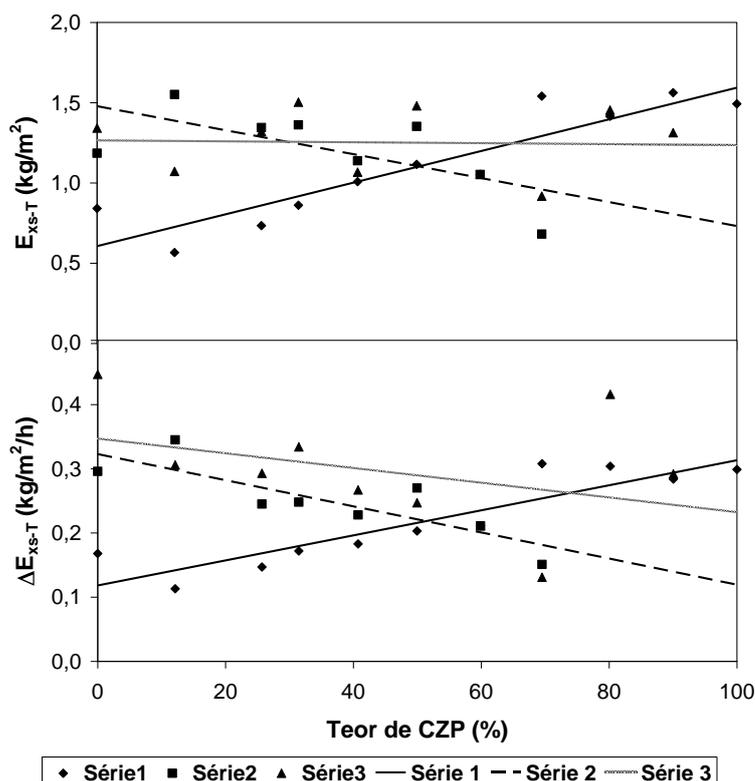


Figura 92: Perda total de água por exsudação e taxa de perda no tempo total

Os dados da figura 92 foram relacionados desprezando os valores de M0 da série 3, que resultou num ponto bastante distante e impossibilitaria a apresentação de uma curva de tendência.

De acordo com a figura 92, há uma tendência na série 1 de aumento de  $E_{xs-T}$  com o aumento do teor de CZP. Na série 2, a diminuição de  $E_{xs-T}$ , com o aumento do teor de CZP, e, na série 3, uma curva constante de  $E_{xs-T}$  resultando em valores muito próximos.

O mesmo comportamento das tendências de  $E_{xs-T}$  são estabelecidas para  $\Delta E_{xs-T}$ , exceto na série 3, que demonstra que há uma diminuição de  $\Delta E_{xs-T}$  com o aumento do teor de CZP. Isso mostra que a velocidade de perda de água por exsudação também foi afetada pelos tipos adotados de dosagem das séries de concretos.

Observando os resultados de exsudação, pode-se afirmar que as dosagens propostas não contribuíram para que o efeito de reservatório de água pudesse ocorrer com plenitude. Há uma mitigação do possível efeito, por hipótese, já que menos água esteve presente para que fosse inicialmente absorvida para o interior da CZP e posteriormente liberada para a compensação da perda por evaporação, e, assim, a deformação por retração plástica fosse reduzida ou totalmente mitigada.

## ***6.4 Análise da perda de água por evaporação***

Ao passo que a água possa migrar do interior do concreto para a superfície por exsudação, forma-se uma lâmina tal que há disponibilidade para a saída de água da superfície para o ambiente por evaporação.

O monitoramento da perda de água por evaporação foi realizado por pesagem contínua da amostra, como explicado no terceiro capítulo desta tese.

Uma curva modelo de perda de água por evaporação  $E_{vp}$  pode ser vista na figura 93. A totalidade das curvas pode ser vista no anexo 8.

A tendência geral é que, para os concretos onde ocorreu maior perda de água medida no ensaio de exsudação, haja maior perda por evaporação. Caso aconteça de o fornecimento de água não ser suficiente com a demanda por evaporação, haverá deformação por retração plástica, se o fenômeno ocorrer entre o início e o fim da pega.

Como visto anteriormente, os concretos da série 1 tiveram maiores quantidades disponíveis de água para evaporação por terem maior exsudação, em relação ao concreto referência. E os concretos da série 2, menores quantidades para evaporação, pois os resultados de exsudação foram menores do que M500.

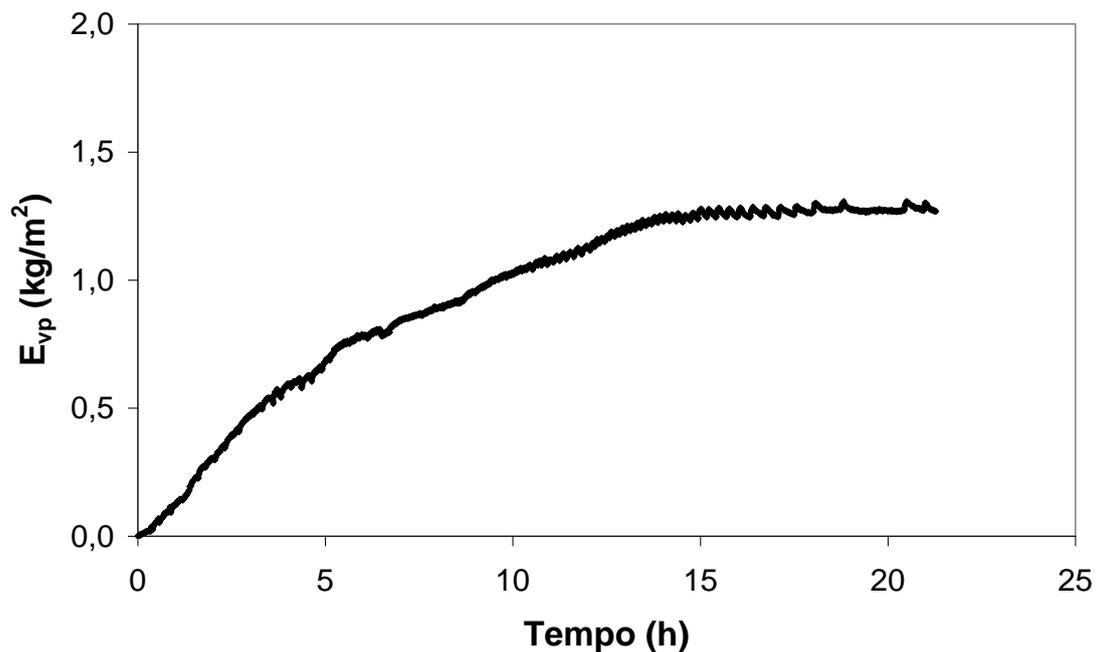


Figura 93: Curva típica de perda de água por evaporação ao longo do tempo

Pela figura 94, a grande dispersão dos resultados dos parâmetros referentes à perda de água por evaporação impossibilita traçar uma tendência dos concretos com a incorporação das CZP. Nem mesmo se consegue comparação com os resultados de  $\epsilon_{max}$ , pois são inconsistentes.

Não é possível, através dos dados, uma resposta consistente para os resultados. Porém, há uma ocorrência de que os concretos com maior teor de CZP resultaram em maiores valores de evaporação. Isso tanto para a série 1 como para a série 3, já que na série 2 não foi possível obter concretos trabalháveis pela dosagem empregada.

Outro resultado relevante foi o mesmo comportamento dos valores da evaporação para os valores da taxa de evaporação, relacionada com a velocidade de perda de água.

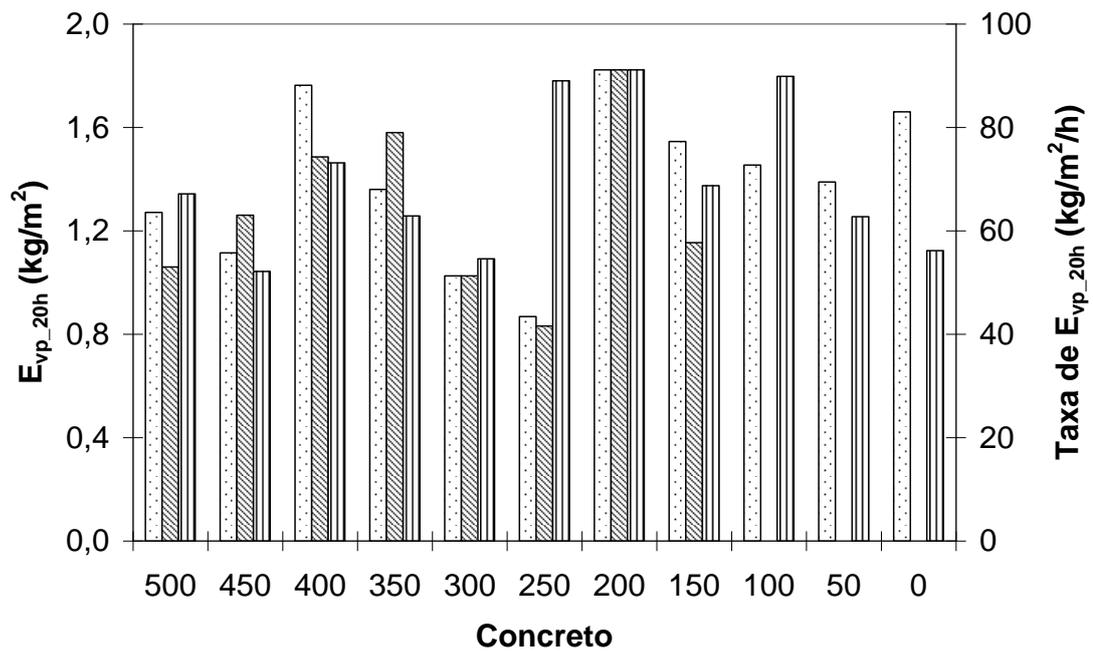


Figura 94: Evaporação e taxa de evaporação no tempo de 20 horas

Igualmente os resultados da taxa de evaporação do trecho linear da curva, mostrados na figura 95, não permitiram uma conclusão satisfatória em relação às modificações pela incorporação das CZP e pelas características de cada dosagem.

Sendo assim, ficam bastante reduzidos os comentários e conclusões referentes a esse parâmetro, ficando como sugestão para futuros trabalhos um aprimoramento da técnica.

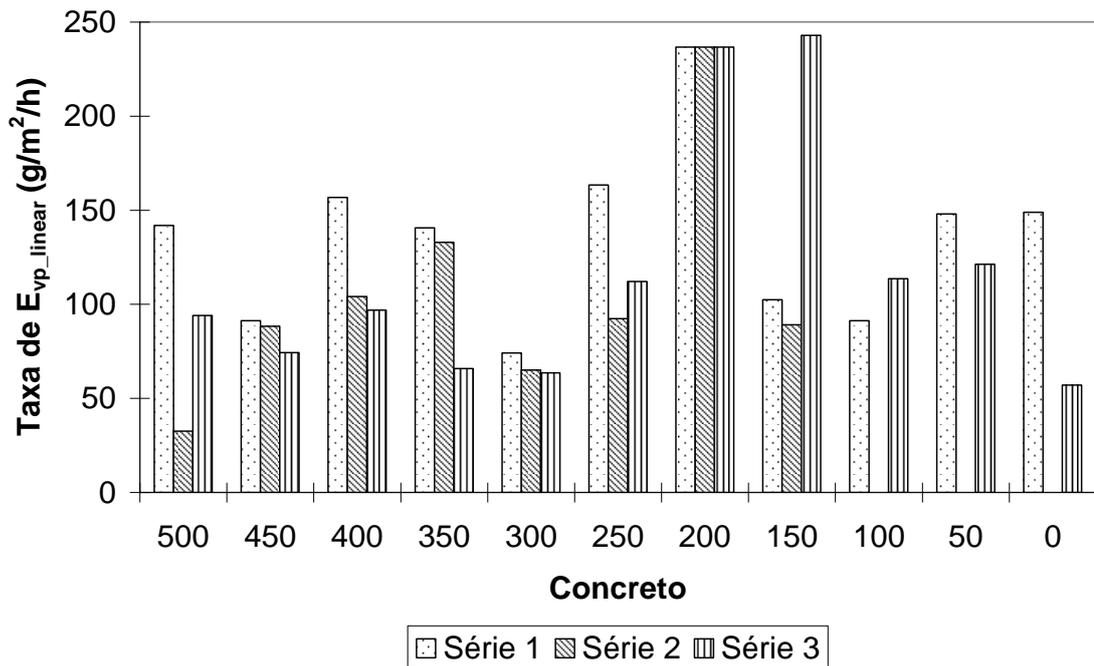


Figura 95: Taxa de evaporação do trecho linear

## 6.5 Conclusões parciais

De acordo com os resultados obtidos e apresentados neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

- As diferenças das dosagens dos concretos das séries 1, 2 e 3 foram significativas para as modificações nos parâmetros da retração plástica. A série 1 teve como fator preponderante a elevação da relação  $a/c$  com o aumento do teor de CZP, que proporcionou concretos com maior tendência a deformações por retração plástica. A série 2 teve como característica marcante a alta dosagem de aditivo SP nos teores mais baixos de CZP para o nível de  $a/c$  utilizado (0,60). Porém, para os menores teores de CZP, a quantidade de SP incorporado foi bastante compatível com  $a/c$  devido à maior demanda pela CZP, resultando em concretos mais bem ajustados e de variação positiva em relação aos parâmetros de retração plástica. Por fim, os concretos da série 3 tiveram dosagens de SP mais justas em relação à trabalhabilidade, contudo a dosagem do aditivo SP precisou

ser aumentada com o aumento do teor de CZP até que atingiu um nível acima do indicado pelo fabricante, levando a um excessivo retardo das reações, levando o material a uma modificação significativa, inviabilizando a comparação com os outros teores, principalmente devido ao aumento do tempo de início de pega;

- Os parâmetros da cinética das reações de hidratação pela medição contínua da temperatura da amostra em calorímetro semi-adiabático como parâmetros de influência na retração plástica foram importantes. A variação máxima da temperatura e o pico de calor são bons indicadores da intensidade de calor gerado, da permanência desse calor na amostra por mais ou menos tempo e também de estimativa de maior ou menor número de reações num dado tempo. Na série 1, há um aumento da temperatura da amostra com o teor de CZP, mas com diminuição da deformação por retração plástica. Esse resultado pode indicar, por hipótese, que há uma contribuição da CZP para o alívio parcial da retração, mesmo com maior temperatura e, por consideração, maior quantidade de reações que aumentam a tendência à retração. Para os concretos da série 2, o aumento excessivo da fluidez para os teores de CZP até 30% provocou uma redução importante na deformação por retração plástica, mesmo com os picos de temperatura da mesma ordem dos da série 1. Já na série 3, não pode-se estabelecer a influência da CZP na deformação pelos valores dos picos de temperatura, pois o teor de aditivo SP foi o fator preponderante;
- A taxa de desenvolvimento de calor e o valor do calor total envolvido no tempo de 20 horas possibilitaram um melhor entendimento da velocidade e patamar das reações de hidratação. Os resultados mostraram que os concretos da série 1 apresentaram maiores taxas para maiores teores de CZP, com maior quantidade de reações em menores tempos, e com maior calor envolvido no tempo de 20 horas. Na série 2 não ficou evidenciada a modificação na taxa de calor e calor em 20 horas, permanecendo os resultados praticamente constantes com o aumento de CZP. E, na série 3, a forte influência do aditivo SP na redução da taxa e do calor em 20 horas, por consequência, retardo das reações de hidratação, retardo na pega;

- O desenvolvimento da cinética de hidratação é bem avaliado pelo grau de hidratação da mistura em um tempo determinado. A presença de CZP não reduziu o grau de hidratação das amostras, já que os concretos de CZP tendem a não liberar o calor gerado com maior facilidade do que o concreto referência. Portanto, as mesmas considerações do calor no tempo de 20 horas valem para o grau de hidratação, exceto para as mesclas M100, M50 e M0 da série 3. Observou-se ainda que o aditivo SP proporcionou um melhor desenvolvimento da hidratação, pois permite melhor dispersão das partículas de aglomerante;
- Outros parâmetros da curva de calor interessantes na avaliação da retração plástica é a taxa de reação  $\phi$  e o tempo de fim do período de dormência  $\tau_i$ . Na série 1, quando aumenta-se o valor de  $\phi$ ,  $\Delta\varepsilon_{\max}$  é aumentado e também  $\varepsilon_{\max}$ . Isso é mais significativo com a diminuição mostrada de  $\tau_i$ . Na série 2, não houve modificação significativa com o aumento do teor de CZP, já que nos menores teores até M300  $\tau_i$  aumentou,  $\phi$  diminuiu, levando à redução de  $\varepsilon_{\max}$ . E na série 3, o fato do aumento do teor do aditivo SP elevou  $\tau_i$ , mas não houve redução na taxa de reações e também do grau de hidratação, exceto para M100, M50 e M0;
- Para os tempos de início e fim de pega, a série 1 proporcionou um retardo dos tempos com o aumento do teor de CZP. Isso se explica pela maior quantidade de água na mistura. Na série 2, o retardo foi conferido para os menores teores de CZP a partir de M300, pois os menores teores de CZP na série 2 tiveram fluidez inadequada com a meta buscada. Já a série 3, para os teores acima do M300, se mostrou mais lenta nas reações pelo efeito retardador da pega do aditivo SP em teores acima do convencional utilizado para os menores teores de CZP da série 3 desde M300;
- Os resultados de exsudação da série 1 foram bastante esclarecedores para confirmar a hipótese de melhoramento da microestrutura do estado fresco dos concretos de CZP em relação a M500, pelo menos para os menores teores. Os concretos M450 e M400 proporcionaram menor quantidade de água exsudada, mesmo com maior relação a/c. Nos maiores teores acima de M400, houve aumento da exsudação com o aumento do teor. Na série 2, a hipótese do efeito da migração de parte da água para o interior da CZP contribuiu para que os maiores teores de CZP apresentassem menores valores de exsudação em relação a M500. Isso porque parte da água está na CZP e não há uma

liberação durante o ensaio para modificar a tendência. Como na série 3, a relação a/c é a mesma da série 2, vale o mesmo comportamento, exceto em M100, M50 e M0;

- Os dados finais do estudo da perda de água por evaporação não foram consistentes e não permitiram que se traçasse uma tendência de comportamento nos concretos de CZP das séries estudadas. Somente uma consideração de que há uma suave elevação dos resultados de evaporação dos concretos de CZP em relação a M500, para os maiores teores. Isso tanto na série 1 como na série 3, já que na série 2 não foram produzidos concretos trabalháveis nos maiores teores.

---

## Capítulo 7 - Considerações finais

---

A investigação da influência da incorporação das cinzas pesadas CZP e do resíduo de construção e demolição RCD em argamassas e concretos como materiais substitutos dos agregados miúdos naturais nos parâmetros que estão envolvidos no fenômeno de retração plástica foi realizada nesta pesquisa.

Partindo de considerações fundamentais da ação desses resíduos, em presença de umidade, como materiais constituintes das dosagens das argamassas e concretos, buscou-se identificar as modificações diante dos parâmetros que envolvem a retração plástica.

Essas considerações fundamentais em relação ao AGN foram:

- A significativa mudança nas características de movimentação de umidade interna da mistura pelos RES apresentarem porosidade, e, com isso, grande possibilidade de absorção de água;
- A influência na demanda de água para os concretos pela forma irregular das partículas dos RES;
- A incorporação de um maior número de partículas finas menores do que 0,15mm que também aumenta a demanda de água.

Todas as considerações acima estão envolvidas com processos de transporte de umidade e requereram um estudo sobre o fenômeno para melhor entendimento do comportamento dos materiais reciclados em concretos.

A hipótese de que parte da água de trabalhabilidade das argamassas e concretos produzidos com os agregados reciclados estaria dentro ou fixada nos RES precisou ser considerada com mais destaque.

Buscou-se avaliar esta característica frente às modificações provocadas pela incorporação dos RES nas bases cimentícias.

Um programa experimental foi proposto com o objetivo de verificar três pontos principais:

- 1- Potencial dos agregados reciclados CZP e RCD de absorção e liberação da água quando em presença de umidade. Esta verificação foi realizada através de um esquema de ensaio proposto nesta tese, que visa inicialmente à migração de água para os agregados reciclados numa amostra granular, sem presença de aglomerante, por meio de absorção capilar. Após atingir a saturação capilar intergranular e intragranular, as amostras foram submetidas à secagem ao ar até o equilíbrio de umidade com o ambiente;
- 2- Análise da influência dos RES na cinética das reações de hidratação através da calorimetria semi-adiabática. Os experimentos foram realizados em argamassas com medição contínua da temperatura e os parâmetros de calor e do grau de hidratação puderam ser calculados. Assim, a modificação dos parâmetros de cinética de hidratação pôde ser analisada e a presença dos RES considerada;
- 3- Considerações da presença de CZP em concretos, frente aos parâmetros que regem o fenômeno de retração plástica. Medições dos parâmetros, evolução das reações e do tempo de pega, da saída de água por exsudação e da perda de água por evaporação foram tomadas comparando-se com os resultados obtidos da deformação linear por retração plástica medida nos concretos com CZP.

Além da proposta das medições dos parâmetros relacionados acima, uma metodologia de proporcionamento de agregados à base de resíduos também foi executada para a determinação dos traços das argamassas e dos concretos para os ensaios no estado fresco.

No estudo dos materiais granulares, uma seqüência de mesclas natural-resíduo foi fixada para determinados teores de substituição do AGN pelo RES, levando em consideração a massa unitária dos agregados naturais e reciclados. Uma metodologia de substituição é então proposta nesta tese de acordo com o aparato explicado no capítulo terceiro referente aos materiais e aos métodos experimentais.

Afirma-se que os resultados foram bastante satisfatórios para a incorporação dos RES em substituição à areia natural, abrindo uma perspectiva para futuras utilizações desses materiais em concretos e argamassas.

Sendo assim, 11 mesclas foram estabelecidas, isto é, 11 teores de RES foram considerados neste trabalho. Desde o teor 100% de AGN, M500, até o teor 100% de RES, M0 RCD ou CZP.

Somente composições binárias foram realizadas, sem que mesclas de AGN, RCD e CZP, juntas numa mesma amostra, fossem feitas.

Foi necessário considerar que houve uma interpenetração entre os grãos dos materiais diferentes utilizados nas mesclas AGN-CZP ou AGN-RCD.

Portanto, para as 11 mesclas consideradas, os teores de substituição sem considerar a interpenetração dos grãos foram:

- AGN-RES: 0,0%, 10,0%, 20,0%, 30,0%, 40,0%, 50,0%, 60,0%, 70,0%, 80,0%, 90,0%, 100,0%

E considerando a interpenetração dos grãos, os teores foram:

- AGN-RCD: 0,0%, 15,8%, 24,3%, 33,9%, 42,7%, 50,5%, 61,5%, 70,1%, 80,3%, 90,1%, 100,0%
- AGN-CZP: 0,0%, 12,1%, 25,7%, 31,5%, 40,7%, 50,0%, 59,9%, 69,5%, 80,2%, 90,0%, 100,0%

Antes da produção dos concretos para a verificação do comportamento frente aos parâmetros de retração plástica, um estudo das argamassas foi realizado para fixar os parâmetros de dosagem dos concretos, relação a/c variável e fixa, e teor de aditivo superplastificante SP. Nesse estudo em argamassas, ambos os resíduos RCD e CZP foram utilizados.

A partir dos resultados de proporcionamento das argamassas, os traços dos concretos foram fixados. Porém, somente foi utilizada a CZP para a produção dos concretos, já que o consumo de RCD seria alto e não havia disponibilidade desse material para a continuidade da pesquisa.

Três séries de concretos de CZP foram desenvolvidas: série 1, com a/c variável e SP fixo, proporcionando a observação do efeito da quantidade de água nos parâmetros de retração plástica e o efeito da CZP na cinética dessa umidade; série 2, com a/c e SP fixos, objetivando uma mesma característica de rede capilar e de desenvolvimento das reações de hidratação, com a CZP tendo uma ação fundamental no transporte da água interna no concreto; e série 3, com a/c fixa e SP variável, sendo a dosagem mais equilibrada em relação à trabalhabilidade dos concretos, mas conduzindo a dosagens altas de SP.

Diante desse panorama de considerações e proposta de experimentos, os resultados foram analisados e as discussões foram feitas.

No capítulo quarto, referente ao estudo da cinética de umidade nos resíduos granulares porosos, a verificação do transporte de água por absorção capilar e saída por secagem ao ar permitiu o estabelecimento do comportamento característico de mesclas natural-resíduo.

Como o material reciclado se apresenta como material poroso, os resultados esperados, assumidos na definição teórica da tese, eram de que houvesse uma maior intensidade de absorção com o aumento do teor de RES nas mesclas.

Essa expectativa foi confirmada pelos resultados obtidos. Com o aumento do teor de CZP e RCD nas mesclas granulares, a intensidade de absorção de água por capilaridade, de acordo com o método proposto, aumentou.

Entretanto, atribui-se esse aumento da quantidade de água absorvida em função dos aspectos da hipótese da incorporação dos resíduos porosos: devido ao aumento da quantidade de finos, que possibilitam um maior número de partículas que necessitam de maior quantidade de água para molhagem da superfície, devido ao aumento da irregularidade dos grãos, característica marcante dos resíduos, demandando mais água com o aumento da superfície de contato, e, por fim, devido à absorção interna dos grãos porosos. Esta última se torna a característica mais interessante quando forem analisados os parâmetros de retração plástica.

Assumindo-se um índice de absorção  $I_{\text{abs\_H}_2\text{O}}$  para comparação dos resultados das mesclas, vê-se que foi fortemente afetado nas mesclas com resíduos, e maior foi o aumento quanto mais resíduo presente.

A velocidade de absorção e a taxa de absorção foram calculadas e também resultaram em valores mais elevados, como o aumento do teor de RES. Isso leva a concluir que a presença dos RES porosos tem influência significativa na cinética de umidade, com maior trânsito de água em relação à amostra de AGN M500.

Com parte da água de absorção capilar nas mesclas granulares natural-resíduo localizada no interior das partículas, por absorção dos grãos, um estudo de saída da água por secagem foi realizado.

Como não foi possível verificar somente a saída da água interna ao grão, as considerações tiveram que ser tiradas da possibilidade de perda da água total nas amostras granulares.

Um resultado de relevância foi a verificação de que o equilíbrio higroscópico, que marcou o fim do ensaio, se prolongou até quase a secagem total das amostras, com a umidade dessas muito próxima do zero percentual.

Sendo assim, pode-se concluir que, nas condições ambientais do ensaio (temperatura e umidade relativa), a umidade interna ao grão e a água superficial e contida nos poros da mescla granular com os RES será perdida para o meio. Dessa forma, considerando um ambiente de secagem

agressivo nos materiais cimentícios após o tempo de pega, espera-se que haja liberação da água dos RES para o interior do concreto.

Após os ensaios com materiais granulares, duas séries de concretos foram testadas para a verificação das afirmações feitas em relação à intensidade de absorção e perda de água por secagem. Esses concretos não foram proporcionados conforme a proposta da tese para a verificação da influência dos RES nos parâmetros da retração plástica.

Como os ensaios nos materiais granulares foram realizados antes da idealização das dosagens dos concretos, foram utilizados os resultados de pesquisas anteriores em concretos com CZP para a comprovação dos dados obtidos nos ensaios com as mesclas granulares.

A cinética de umidade dos concretos com a CZP, substituindo parcialmente ou totalmente o agregado miúdo natural, é fortemente afetada. Os parâmetros de transporte de umidade analisados foram a secagem ao ar, após a moldagem dos corpos-de-prova, o índice de absorção capilar, segundo o mesmo método de ensaio proposto para materiais granulares, a sorptividade e o ângulo de contato aparente.

Duas dosagens de concretos foram utilizadas nesse estudo de verificação da cinética de umidade: CRT3, com reposição de CZP em função da umidade, em que se buscou a manutenção do mesmo volume de material natural substituído por CZP; e CRT4, sem a reposição de CZP em função da umidade.

Para CRT3, o cálculo da equivalência de volume foi feito com a massa específica da CZP e da areia natural. Porém, os resultados não são satisfatórios, pois há incerteza no valor obtido para a CZP, acarretando um maior volume de material incorporado.

Sendo assim, a formulação da dosagem da série CRT3 resultou em concretos com maior potencial de trânsito de líquido pela rede capilar. Também o CRT4 proporcionou o aumento da cinética de umidade, mas com patamares bem mais baixos em relação ao CRT3, mais próximos do concreto referência.

Após as conclusões formuladas do estudo da influência dos RES na cinética de umidade em amostras de material granular e a verificação em concretos de CZP, seguem-se com o estudo em argamassa para a fixação dos parâmetros de dosagem para os concretos utilizados na investigação das modificações dos parâmetros de retração plástica com a incorporação de CZP.

O método de substituição dos agregados natural-resíduo proposto na metodologia foi muito bem empregado na dosagem das argamassas. Valores mais justos do proporcionamento dos RES foram obtidos em relação aos concretos CRT3 e CRT4 estudados no capítulo 4.

No ajuste da relação a/c não foi possível a manutenção de uma mesma quantidade de água devido às características físicas dos RES, como explicado anteriormente. Por isso, duas séries de argamassas foram estabelecidas. Nessas duas séries, um aprofundamento do estudo da evolução do calor de hidratação foi realizado.

As duas séries foram de argamassas com RES com relação a/c variável e sem aditivo SP e de argamassas com RES com relação a/c fixa e com aditivo SP. Contudo, não foi possível a manutenção de uma mesma relação a/c para todas as argamassas com os dois RES, CZP e RCD, sem que o teor de SP fosse excessivamente dosado, e todas as considerações da cinética de hidratação não pudesse ser melhor observada. Assim, dentro da série de dosagem das argamassas com relação a/c fixa, duas outras séries foram estabelecidas: a/c de 0,45 e a/c de 0,60.

Também foram realizados estudos prévios de calorimetria em pastas nas relações a/c das argamassas, série 1 e 2, e nos teores de SP para a/c 0,45 e 0,60. Esse estudo em pasta foi importante para a delimitação da influência da relação a/c e do teor de aditivo SP nas argamassas com RES, tentando isolar a análise do comportamento das argamassas com RES em diferentes teores.

Os resultados em pastas foram bastante interessantes para prever o comportamento das argamassas sobre o enfoque das variações de a/c e SP.

Do estudo da calorimetria nas argamassas, conclui-se que a presença da CZP alterou consideravelmente a cinética do calor envolvido nas reações de hidratação pela evolução da temperatura da amostra. O aumento do teor de CZP conduziu a resultados de tendência à elevação dos parâmetros relativos ao estudo de calorimetria: a variação máxima da temperatura, o pico de calor gerado, a taxa máxima de calor, o calor total envolvido em 20 horas e o grau de hidratação em 20 horas. Isso foi devido a dois fatores relativos a CZP: calor específico menor, com perda de calor menor, e maior porosidade, conseqüentemente maior quantidade de ar interno ao grão, aumento do isolamento térmico da mistura, sem que houvesse perda de calor.

Nas argamassas de RCD, mesmo com menores valores da variação máxima de temperatura, a tendência dos parâmetros de calor foi crescente com o aumento do teor de RCD. Os dois principais efeitos que modificaram a cinética de hidratação avaliada pelos parâmetros de calorimetria foram o potencial de contribuir com pontos extras de nucleação, pela presença de material cimentício nos agregados de RCD, e de uma possível retomada da hidratação de alguma parcela cimentícia anidra.

Pela incorporação de uma maior parcela de finos, as argamassas com RCD e CZP possibilitaram uma melhor distribuição das partículas sólidas, com melhor dispersão do cimento, levando à melhor hidratação no tempo considerado. Portanto, aumento dos parâmetros de calor e melhor desenvolvimento da cinética de hidratação.

Nas argamassas com aditivos, da série 2 com *a/c* fixa em dois patamares, observou-se uma sensível modificação em relação ao estudo das argamassas sem SP. A partir do estudo em pastas, essas considerações puderam ser feitas. Para maiores teores, as diferenças aumentaram, com a relação *a/c* 0,45 sendo mais afetada pelo efeito do aditivo SP, e em *a/c* 0,60 as variações da cinética de hidratação foram afetadas conjuntamente pela relação *a/c* mais alta e a dosagem de aditivo SP.

Diante dos resultados obtidos do estudo de argamassa, do capítulo 5, partiu-se para o estudo dos concretos das séries 1, 2 e 3, na direção de que a incorporação dos RES altera a cinética de reações de hidratação.

Para os concretos, além da evolução da temperatura por calorimetria semi-adiabática, os ensaios de determinação dos tempos de pega pelo método de Vicat modificado, a evolução da temperatura na amostra exposta ao ambiente, a perda de água por exsudação e evaporação, e a deformação linear por retração plástica foram realizadas.

Num âmbito geral, os dados revelaram que há influência da incorporação de CZP nos concretos nos parâmetros de retração plástica. Entre os concretos, a série 1 teve maior influência da relação *a/c*, e a série 3 maior influência de SP.

Na série 1, a elevação da relação *a/c* com o aumento do teor de CZP, para um mesmo teor de SP, teve papel fundamental para promover a quantidade de água necessária para a migração para o interior da CZP. Porém, o aumento da quantidade de água levou a maiores valores da deformação por retração plástica dos concretos entre as séries. Contudo, o efeito da influência da liberação da água pela CZP pode ser considerado, já que há diminuição da deformação com o aumento do teor de CZP.

Os parâmetros da cinética das reações de hidratação pela medição contínua da temperatura da amostra em calorímetro semi-adiabático como parâmetros de influência na retração plástica foram importantes. A variação máxima da temperatura e o pico de calor são bons indicadores da possibilidade de calor gerado, da permanência desse calor na amostra por mais ou menos tempo e também de estimativa de maior ou menor número de reações num dado tempo. Na série 1, há um aumento da temperatura da amostra com o aumento do teor de CZP, mas com diminuição da

deformação por retração plástica. Esse resultado pode indicar, por hipótese, que há uma contribuição da CZP para o alívio parcial da retração, mesmo com maior temperatura e, por consideração, maior quantidade de reações que aumentam a tendência à retração. Para os concretos da série 2, o aumento excessivo da fluidez para os teores de CZP até 30% provocou uma redução importante na deformação por retração plástica, mesmo com os picos de temperatura da mesma ordem dos da série 1. Já na série 3 não pode-se estabelecer a influência da CZP na deformação pelos valores dos picos de temperatura, pois o teor de aditivo SP foi o fator preponderante.

Sobre o calor envolvido nas reações de hidratação até 20 horas, os concretos da série 1 apresentaram maiores taxas de desenvolvimento de calor e maior calor envolvido com o aumento do teor de CZP. Na série 2, não ficou evidente a variação do calor envolvido e da taxa de calor no tempo de 20 horas, com os resultados praticamente constantes com o aumento do teor de CZP. Já na série 3, o retardo nas reações provocado pelo aditivo SP reduziu consideravelmente os parâmetros de calor.

Caso não haja água suficiente para chegar à superfície por exsudação em concretos que apresentam reações mais rápidas, a aceleração da cinética de hidratação poderá causar aumento de  $\epsilon_{\max}$ . Foi o que ocorreu nos concretos da série 1. Já os concretos da série 3, mesmo com a quantidade de água ainda mais baixa, não possibilitaram que a formação da rede capilar fosse efetivada num tempo semelhante à série 1, apresentando retardo na pega. Assim, a tendência de os valores da deformação serem menores, mas com endurecimento do concreto também retardado.

Pela análise do grau de hidratação em 20 horas dos concretos de CZP, mostrou-se que não há perda de desenvolvimento da hidratação com a incorporação da CZP. Essa afirmação tem significado importante, pois normalmente se direcionaram os atrasos nas reações à presença da CZP. Contudo, os atrasos precisam ser avaliados do ponto de vista da relação a/c e não somente da presença e do teor de CZP.

Nessa conclusão, também pode-se incluir o fato de os concretos da série 1 terem o valor da taxa de reação  $\phi$  aumentado para maiores teores de CZP. O aumento desse parâmetro permite que se afirme que há aumento na taxa de deformação  $\Delta\epsilon_{\max}$ , acarretando em maiores valores de  $\epsilon_{\max}$ , como observado nos resultados apresentados.

Na seqüência da cinética das reações, é fundamental analisar os tempos de início e fim de pega que delimitam o intervalo em que o concreto estará submetido à retração plástica por secagem da água na superfície.

Como já relatado, a série 1 tem os tempos de início e fim de pega aumentados com o aumento do teor de CZP devido à elevação da quantidade de água, para um teor fixo de SP. Na série 2, os menores teores de CZP até M300, em virtude da fixação de a/c para um patamar acima do ajustado na série 1, os tempos de pega também foram maiores. E, na série 3, a problemática da utilização do aditivo SP num teor elevado conduziu a elevados tempos de pega dos concretos desde M300, principalmente nos concretos com maiores teores M100, M50 e M0.

Muito embora sejam a cinética da hidratação e o escape da água da superfície do concreto os principais fatores da retração plástica, se a água não tiver condições de ser enviada para a superfície por exsudação numa taxa compatível com a perda por evaporação, haverá retração.

Os resultados dos concretos analisados mostraram que a CZP proporcionou um melhoramento da distribuição das partículas no estado fresco, proto-microestrutura, em teores até 20% (M400). A partir desse percentual, o valor da exsudação total aumentou com o teor de CZP, em relação a M500.

A melhor demonstração da possibilidade de migração de parte da água para o interior das CZP nos concretos está apresentada nos resultados da série 2. O estudo indicou que os valores da exsudação e da taxa de exsudação foram mais elevados no concreto referência, diminuindo gradativamente com o aumento do teor de CZP. Isso aconteceu porque a água que migrou para o interior da CZP (ou já estava contida no momento da mistura do concreto) não foi submetida à secagem, já que o ensaio acontece no estado fresco antes da pega, com umidade relativa interna equivalente a 100%.

Na série 3, vale a mesma tendência da série 2, pois a relação a/c foi a mesma, de acordo com os resultados observados.

Para finalizar as conclusões referentes aos resultados observados das modificações causadas pela incorporação de CZP em concretos mediante a análise dos parâmetros de retração plástica, a perda de água da amostra pelo ensaio de evaporação não possibilitou uma conclusão coerente.

Os dados não foram consistentes e não permitiram que se traçasse uma tendência de comportamento nos concretos de CZP das séries estudadas. Somente uma consideração de que há uma suave elevação dos resultados de evaporação dos concretos de CZP em relação a M500,

para os maiores teores. Isso tanto na série 1 como na série 3, já que na série 2 não foram produzidos concretos trabalháveis nos maiores teores, acima de 80%.

Diante das discussões da análise dos resultados da incorporação de materiais granulares reciclados, resíduo de construção e demolição RCD e cinzas pesadas CZP, em substituição ao agregado miúdo natural, tem-se como conclusão geral que a presença desses materiais em matrizes cimentícias de argamassa e concreto provocam alterações consideráveis nos parâmetros de retração plástica estudados.

As dosagens diferentes das séries de concretos permitiram que as modificações pudessem ser melhor percebidas, pois a fixação da relação a/c acarreta uma profunda mudança na cinética de umidade das partículas porosas, já que há a necessidade de parte da água livre ficar no interior dos agregados porosos.

O estudo da calorimetria é um excelente indicador de desempenho dos concretos no estado fresco, pois possibilita a determinação de indicadores, aplicados nesse estudo, para a observação da cinética de reações de hidratação e das mudanças subsequentes na retração plástica.

Pelos resultados, não há restrição alguma para a utilização dos materiais reciclados analisados de acordo com os parâmetros de dosagem e os fenômenos analisados para cada resíduo.

## ***7.1 Sugestões para trabalhos futuros***

Como parte importante da pesquisa científica, a sugestão para a continuidade dos resultados obtidos na tese a serem realizados em trabalhos futuros é aqui apresentada.

- Verificar a influência da compactação dos agregados porosos reciclados no ensaio de absorção de água por capilaridade em amostras granulares;
- Examinar a composição de mesclas buscando a equivalência granulométrica dos resíduos RCD e CZP em relação ao agregado miúdo natural utilizado na produção de concretos para a análise dos parâmetros de retração plástica;
- Estudar a possibilidade de reativação da hidratação dos agregados reciclados de C&D com vistas no melhoramento do concreto e na influência do calor de hidratação;

- Verificar a possibilidade de formação de pontos de nucleação extras em virtude da incorporação de finos de RCD;
- Monitorar o fenômeno de deformação do concreto por adensamento antes da pega inicial e da retração plástica das misturas com resíduos porosos granulares de RCD e CZP;
- Analisar a influência da incorporação de RCD e CZP em concretos com alto consumo de cimento ( $C_c > 500$  kg) em relação aos parâmetros de retração plástica e de retração autógena.

---

## Capítulo 8 - Referências bibliográficas

---

ACI 308-R01: **Guide to curing concrete.** ACI Committee, 2001

AL-AMOUDI O.S.B., MASLEHUDDIN M., ABIOLA T.O. Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 737-743, 2004.

AL-AMOUDI O.S.B., MASLEHUDDIN M., SHAMEEM M., IBRAHIM M. Shrinkage of plain and silica fume cement concrete under hot weather. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 690-699, 2007.

AL-FADHALA M., HOVER K.C. Rapid evaporation from freshly cast concrete and the gulf environment. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 1-7, 2001.

ANDRADE L.B. **Metodologia de avaliação para uso de cinzas pesadas de termelétricas como agregado natural para concreto.** 2004. 268 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da composição granulométrica, NBR NM 248:2003.

\_\_\_\_\_. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem, NBR NM 46:2003.

\_\_\_\_\_. Agregado Graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, NBR NM 53:2003.

\_\_\_\_\_., Agregado para concreto – Especificação, NBR 7211:2005.

\_\_\_\_\_., Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, NBR 9779:1995.

\_\_\_\_\_., Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo, NBR NM 18:2004.

\_\_\_\_\_., Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, NBR 7215:1996.

\_\_\_\_\_., Cimento Portland – Determinação do tempo de pega, NBR NM 65:2003.

\_\_\_\_\_., Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, NBR NM:1998.

\_\_\_\_\_., Concreto – Determinação da exsudação NM 102:1996.

\_\_\_\_\_., Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração, NBR NM 9:2003.

\_\_\_\_\_., Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar, pelo método gravimétrico NM 56:1996.

\_\_\_\_\_., Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, NBR 6508:1984.

ATIS C.D. Heat evolution of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 751-756, 2002.

BAI J., WILD S. Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating pfa and metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 201-209, 2002.

BAI Y., DARCY F., BASHEER P.A.M. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 691-697, 2005.

BARCELO L., BOIVIN S., RIGAUD S., ACKER P., CLAVAUD B., BOULAY C. Linear vs. Volumetric autogenous shrinkage measurement: Material behaviour or experimental artefact? In: International Seminar on Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology, 2., 1999, Lund. **Proceedings...** p. 109-125.

BATAYNEH M., MARIE I., ASI I. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management**, v. 27, p. 1870-1876, 2007.

BAZUCO R.S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos**. 1999. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

BENTZ D.P., SNYDER K.A. Protected paste volume in concrete: extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1863-1867, 1999.

BERHANE Z. Evaporation of water from fresh mortar and concrete at different environmental conditions. **ACI Journal Proceedings**, v. 81, p. 560-565, 1984.

BINICI H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1191-1197, 2007.

CABRERA J.G., CUSENS A.R., WANG Y.B. Effect of superplasticizers on the plastic shrinkage of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 44, p. 149-155, 1992.

CHEN H.J., YEN T., CHEN K.H. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 125-132, 2003.

CHERIAF, M., PERA, J., ROCHA, J.C. Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1387-1391, 1999.

COLLINS F., SANJAYAN J.G. Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 607-610, 1999.

CUSSON D., HOOGEVEEN T. Internally-cured high-performance concrete under restrained shrinkage and creep. In: *Concreep - Workshop on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures*, 7., 2005, Nantes. **Proceedings...** p. 579-584.

CUSSON D., HOOGEVEEN T. Internally-cured high-performance concrete under restrained shrinkage and creep. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 200-209, 2007.

Deutsches Institut für Normung -**DIN- 4226-1** Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen, 2001.

Deutsches Institut für Normung -**DIN- 4226-100** Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen, 2002.

ESPING O. **Early age properties of self-compacting concrete - Effects of fine aggregate and limestone filler**. 2007. 206 f. Thesis (PhD) – Chalmers University of Technology, Göteborg.

ESPING O., LÖFGREN I. **Cracking due to plastic and autogenous shrinkage – investigation of early age deformation of self-compacting concrete**. 2005. 95 f. Report 11 – Chalmers University of Technology, Göteborg.

ETXEBERRIA M. **Experimental study on microstructure and structural behavior of recycled aggregate concrete**. 2004. 242 f. Thesis (Doctoral) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

ETXEBERRIA M., VÁZQUEZ E., MARÍ A., BARRA M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 735-742, 2007.

EVANGELISTA L., DE BRITO J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 397-401, 2007.

EUROLIGHTCON – Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete **Evaluation of the early age cracking of lightweight aggregate concrete**. Project BE96-3942, The European Union – Brite EuRam III, 2000.

FRÍAS M., ROJAS M.I.S., CABRERA J. The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 209-216, 2000.

GHAFOORI N., BUCHOLC J. Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 8, p. 128-137, 1996.

GHAFOORI N., BUCHOLC J. Properties of high-calcium dry bottom ash concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, p. 90-101, 1997.

HAMMER T.A., FOSSÅ K.T., BJØNTEGAARD Ø. Cracking tendency of HSC: Tensile strength and self generated stress in the period of setting and early hardening. **Materials and Structures**, v. 40, p. 319-324, 2007.

HANSEN T.C. **RILEM Report 6: Recycling of Demolished of Concrete and Masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316 p.

HOLT E.E. **Early age autogenous shrinkage of concrete**. 2001. 184 f. VTT Publications 446 – Technical Research Centre of Finland, Helsinki.

HOLT E.E., LEIVO M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 521-530, 2004.

INCROPERA F.P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 4<sup>th</sup> edition. New York: J. Wiley, 1985. 886 p.

JOLICOEUR C., SIMARD M.A. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 87-101, 1998.

JUVAS K., KÄPPI A., SALO K., NORDENSWAN E. The effects of cement variations on concrete workability. **Nordic Concrete Research**, v. 26, 2001.

KASEMCHASIRI R., TANGTERMSIRIKUL S. A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1322-1334, 2007.

KATZ A. Properties of Concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 703-711, 2003.

KHATIB J.M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 763-769, 2005.

KOHNO K., OKAMOTO T., ISIKAWA Y., SIBATA T., MORI H. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 611-614, 1999.

KOLAY P.K., SINGH D.N. Physical, chemical, mineralogical, and thermal properties of cenospheres from an ash lagoon. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 539-542, 2001.

KOVLER K., ZHUTOVSKY S. Overview and future trends of shrinkage research. **Materials and Structures**, v. 39, p. 827-847, 2006.

KREUZ, A.L. **Utilização de cinzas pesadas de termoeletricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

KRONLOF A., LEIVO M., SIPARI P. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1747-1754, dez. 1995.

KULA I., OLGUN A., ERDOGAN Y., SEVINC V. Effects of colemanite waste, coal bottom ash, and fly ash on the properties of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 491-494, 2001.

KULA I., OLGUN A., SEVINC V., ERDOGAN Y. An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash, and coal bottom ash as portland cement replacement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 227-232, 2002.

KUMAR S., STEWART J., MISHRA S. Strength characteristics of illinois coal combustion by-product: pcc dry bottom ash. **International Journal of Environmental Studies**, v. 61, p. 551-562, 2004.

LANGAN B.W., WENG K., WARD M.A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1045-1051, 2002.

LAWRENCE P., CYR M., RINGOT E. Mineral admixtures in mortars: effects of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1939-1947, 2003.

LEA, F.M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 4<sup>th</sup> edition. London: Edward Arnold, 2004. 1092p.

LEITE M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEVY S., HELENE P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1975-1980, 2004.

LIMBACHIYA M.C., MARROCCHINO E., KOULOURIS A. Chemical–mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate. **Waste Management**, v. 27, p. 201-208, 2007.

LURA P., BREUGEL K. V., MARUYAMA I. Autogenous and drying shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete at early ages: the effect of specimen size. In: RILEM International Conference on Early Age Cracking in Cementitious System (EAC'01), 2001, Hifa. **Proceedings...** p. 337-344.

LURA P., JENSEN O.M. Discussion Paper: On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete [Bjøntegaard Ø, Hammer TA, Sellevold EJ. *Cement & Concrete Composites* 2004;26:427–435]. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 854-856, 2005.

LUZ C.A. **Comportamento do cimento sulfo-aluminoso (CSA) e da cinza pesada (CZP) do tratamento de resíduos: Fosfogesso e Lodo galvânico (LDG)**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MARSHAK A.V.U., ZLATKOVSKII O.A., CIAK M. Assessing the efficiency of chemical and mineral admixtures in early cement hydration. **Inorganic Materials**, v. 40, p. 886–890, 2004

MEROUANI, L. **Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment : étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade**. 1987. 180 f. Thèse Docteur 3<sup>o</sup> Cycle – Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.

MEHTA P.K., MONTEIRO P.J.M. **Concrete**. 3<sup>rd</sup> edition. McGraw-Hill Professional, 2005. 659 p.

MINDESS S., YOUNG J.F., DARWIN D. **Concrete**. 2<sup>rd</sup> edition. Prentice Hall, 2002. 644 p.

MIRANDA L.F.R., SELMO S.M.S. CDW recycled aggregates renderings: part i – analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 615-624, 2006.

NEVILLE A.M. **Properties of Concrete**. 3<sup>rd</sup> edition. Great Britain: Pitman international text, 1981. 779 p.

NIEDZWIEDZKA D.J. Scaling resistance of high-performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 709-715, 2005.

NISNEVICH M. Improving lightweight concrete with bottom ash. **Concrete International**, v. 19, p. 56-60, 1997.

NISNEVICH M., SIROTIN G., DVOSKIN L., ESHEL Y. Effect of moisture content of highly porous bottom ash on properties of concrete mixture and hardened concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, p. 283-288, 2001.

NISNEVICH M., SIROTIN G., ESHEL Y. Lightweight concrete containing thermal power station and stone quarry waste. **Magazine of Concrete Research**, v. 55, p. 313-320, 2003.

PADMINI A.K., RAMAMURTHY K., MATHEWS M.S. Relative Moisture movement through recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 54, p. 377-384, 2002.

POWERS T.C. Physical properties of cement paste. In: International Symposium on the Chemistry of Cement: Session V – Properties of Cement Paste and Concrete, 4., 1960, Washington D.C. **Proceedings...** p. 577-613.

POON C.S., KOU S.C, LAM L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, v. 16, p. 281-289, 2002.

POON C.S., SHUI Z.H., LAM L., FOK H., KOU S.C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 31-36, 2004.

POON C.S., SHUI Z.H., LAM L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 461-468, 2004.

POON C.S., QIAO X.C., CHAN D. The cause and influence of self-cementing properties of Wne recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. **Waste Management**, v. 26, p. 1166-1172, 2006.

POON C.S., CHAN D. Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 164-175, 2007.

RADOCEA A. **Pore water pressure in fresh and young cement paste**. 1991. 153 f. Report P-91:5 (in Swedish) – Chalmers University of Technology, Göteborg.

RADOCEA, A. **A study on the mechanisms of plastic shrinkage of cement-based materials**. 1992. 125 f. Doctoral dissertation – Chalmers University of Technology, Göteborg.

RADOCEA A. A new method for studying bleeding of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p. 855-868, 1992.

RAHAL K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, p. 407-415, 2007.

RAVINA D. Early Longitudinal dimensional changes of fresh fly ash mortar exposed to drying conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 16, p. 902-910, 1986.

RILEM TC 119-TCE Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages. **Materials and Structures**, v. 30, p. 451-464, 1997.

RILEM TC 121-DRG: Specifications for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, v. 27, p. 557-559, 1994.

SANTOS, F.I.G. **Avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas**. 2006. 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

SCHAEFER, C.O. **Avaliação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD) e influência no potencial de lixiviação de matrizes cimentícias.** 2007. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

SOBERÓN J.M.G.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1301-1311, 2002.

STUMM, W. **Aquatic chemical kinetics: reaction rates of processes in natural waters.** New York: Wiley-Interscience, 1990. 545p.

TARGAN S., OLGUN A., ERDOGAN Y., SEVINC V. Effects of supplementary cementing materials on the properties of cement and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1551-1558, 2002.

TARGAN S., OLGUN A., ERDOGAN Y., SEVINC V. Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1175-1182, 2003.

TAYLOR H.F.W. **Cement Chemistry.** 2<sup>nd</sup> edition. Thomas Telford Ltd, 1997. 480 p.

TEKES – National Technology Agency **By-products and recycled materials in earth structures: materials and applications.** In: MÄKELÄ, H; HÖYNALA, H. (Editors) Technology Review 92/2000. Helsinki, 2000.

TOPÇU I.B., ELGÜN V. B. Influence of concrete properties on bleeding and evaporation. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 275-281, 2004.

UNO P.J. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas. **ACI Materials Journal**, v. 95, p. 365-375, 1998.

WAINWRIGHT P.J., AIT-AIDER H. The influence of cement source and slag additions on the bleeding of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1445-1456, 1995.

WEBER S. Curing of high strength concrete using lightweight aggregates. In: Festschrift zum 60 Geburtstag von H.-W. Reinhardt. Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, 1999. **Proceedings...** p. 377-391.

WEBER S., REINHARDT H.W. A new generation of high-performance concrete: concrete with autogenous curing. **Advanced Cement-based Materials**, v. 6, p. 59-58, 1997.

WIRQUIN E., ZAHARIEVA R.H., BODIN F.B. Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité - Application aux bétons de granulats recyclés. **Materials and Structures**, v. 33, p. 403-408, 2000.

WITTMANN F.H. On the action of capillary pressure in fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 6, p. 49-56, 1976.

XAVIER, L.L. **Diagnóstico do resíduo da construção civil na cidade de Florianópolis**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

YAMADA K., HANEHARA S. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1159-1165, 1999.

YANG Z. **Assessing cumulative damage in concrete and qualifying its influence on life cycle performance modeling**. 2004. 245 f. PhD Thesis – Purdue University, West Lafayette.

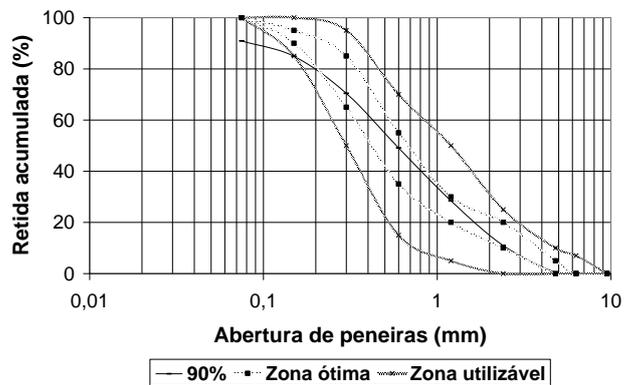
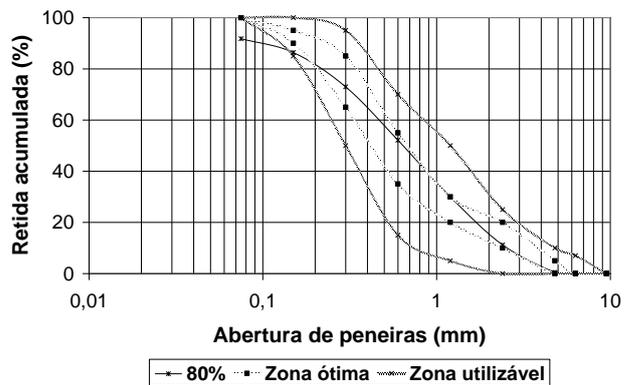
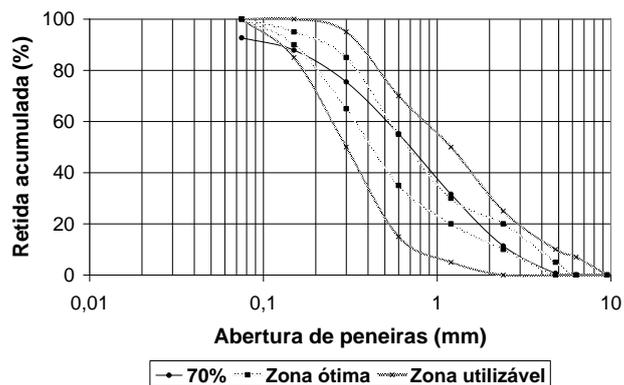
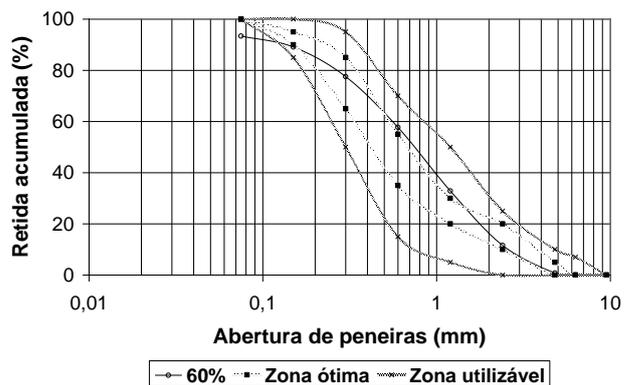
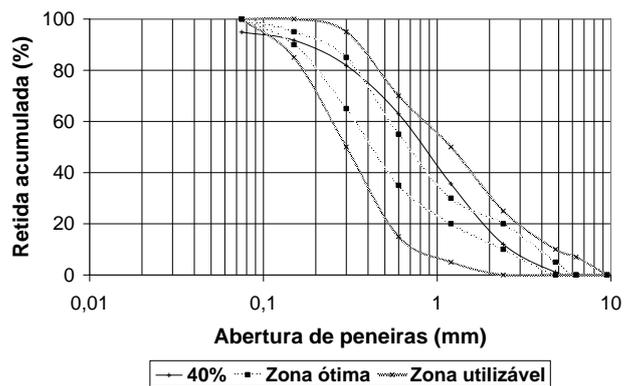
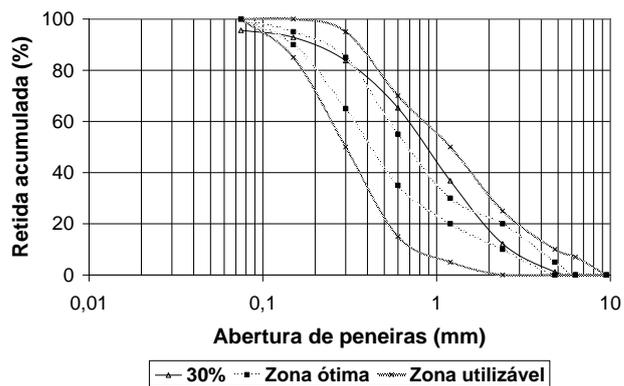
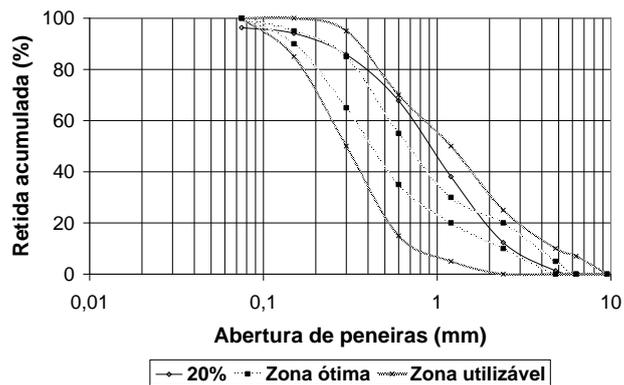
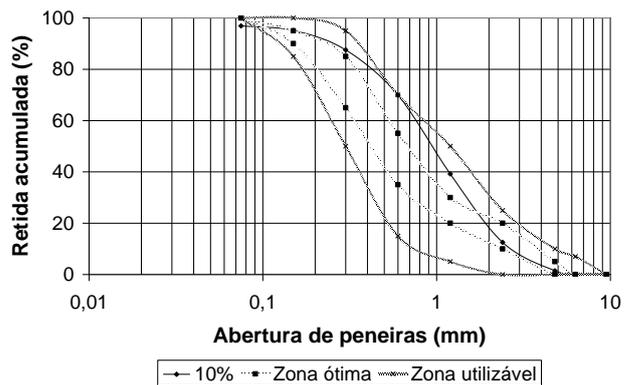
ZHUTOVSKY S., KOVLER K., BENTUR A. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 499-507, 2004.

---

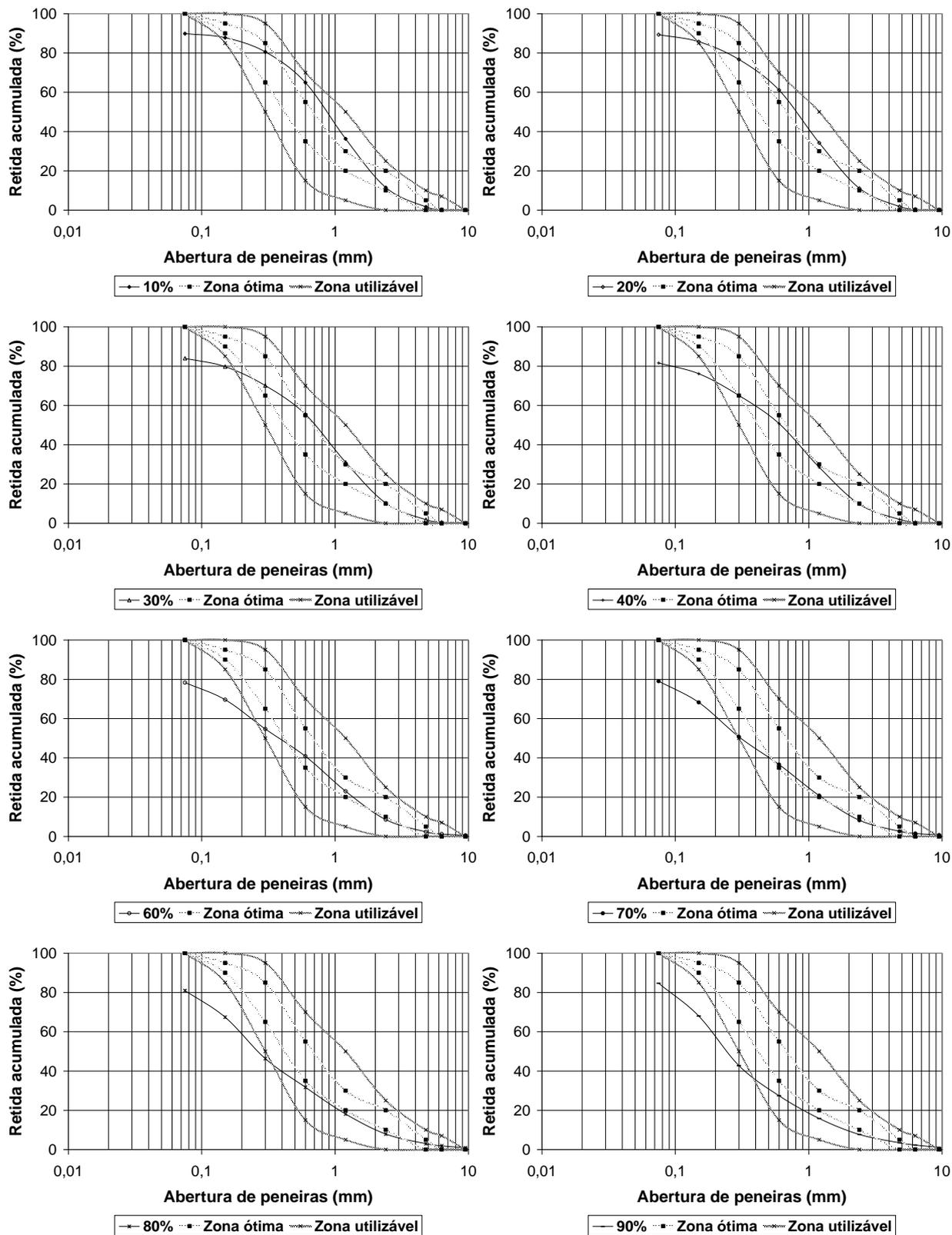
# **ANEXO 1 – Curvas de distribuição granulométrica das mesclas de agregados AGN-RES**

---

As figuras abaixo se referem às curvas de distribuição granulométrica das mesclas envolvendo AGN e RES tipo RCD e CZP.



Referente à distribuição granulométrica do RCD



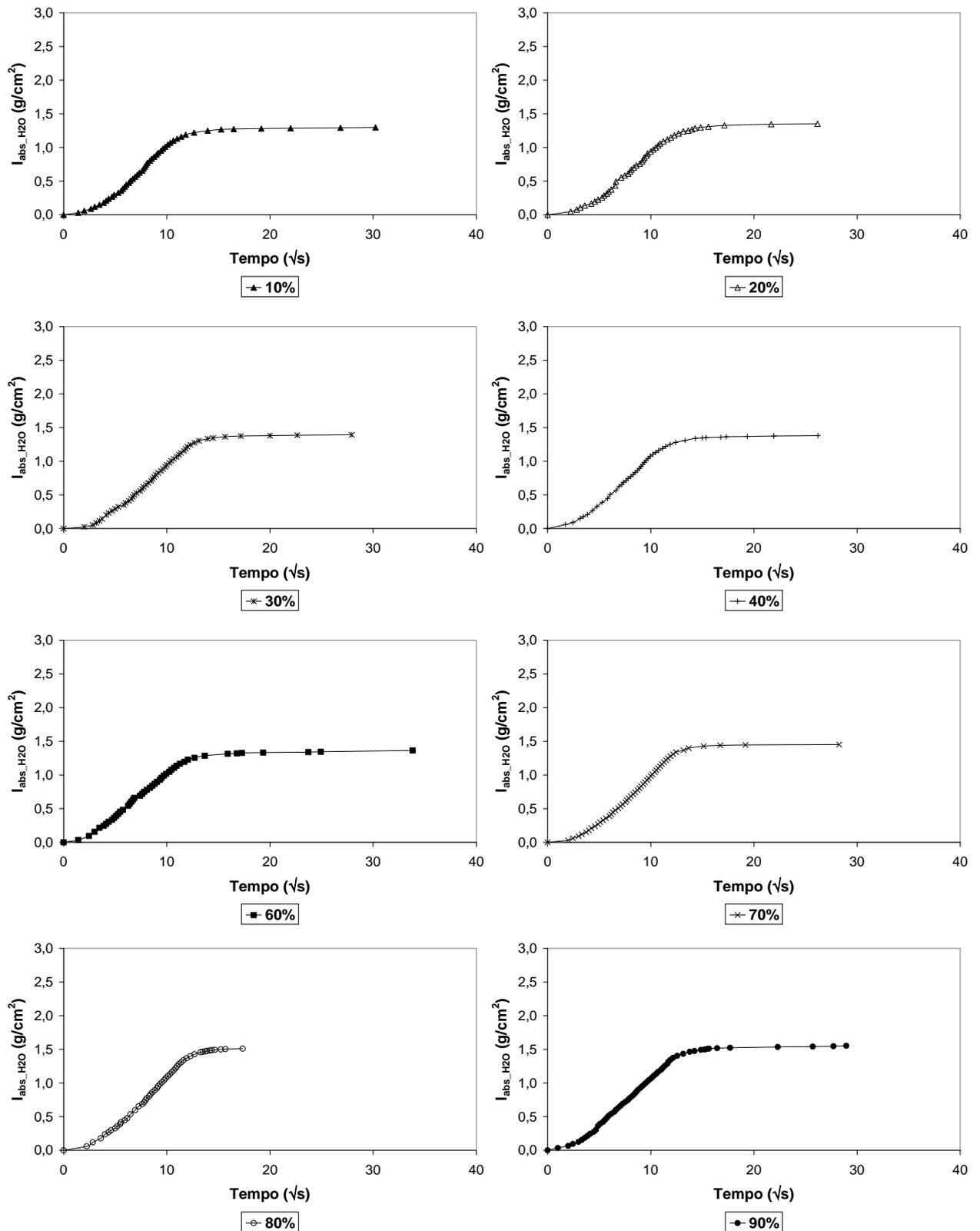
Referente à distribuição granulométrica da CZP

---

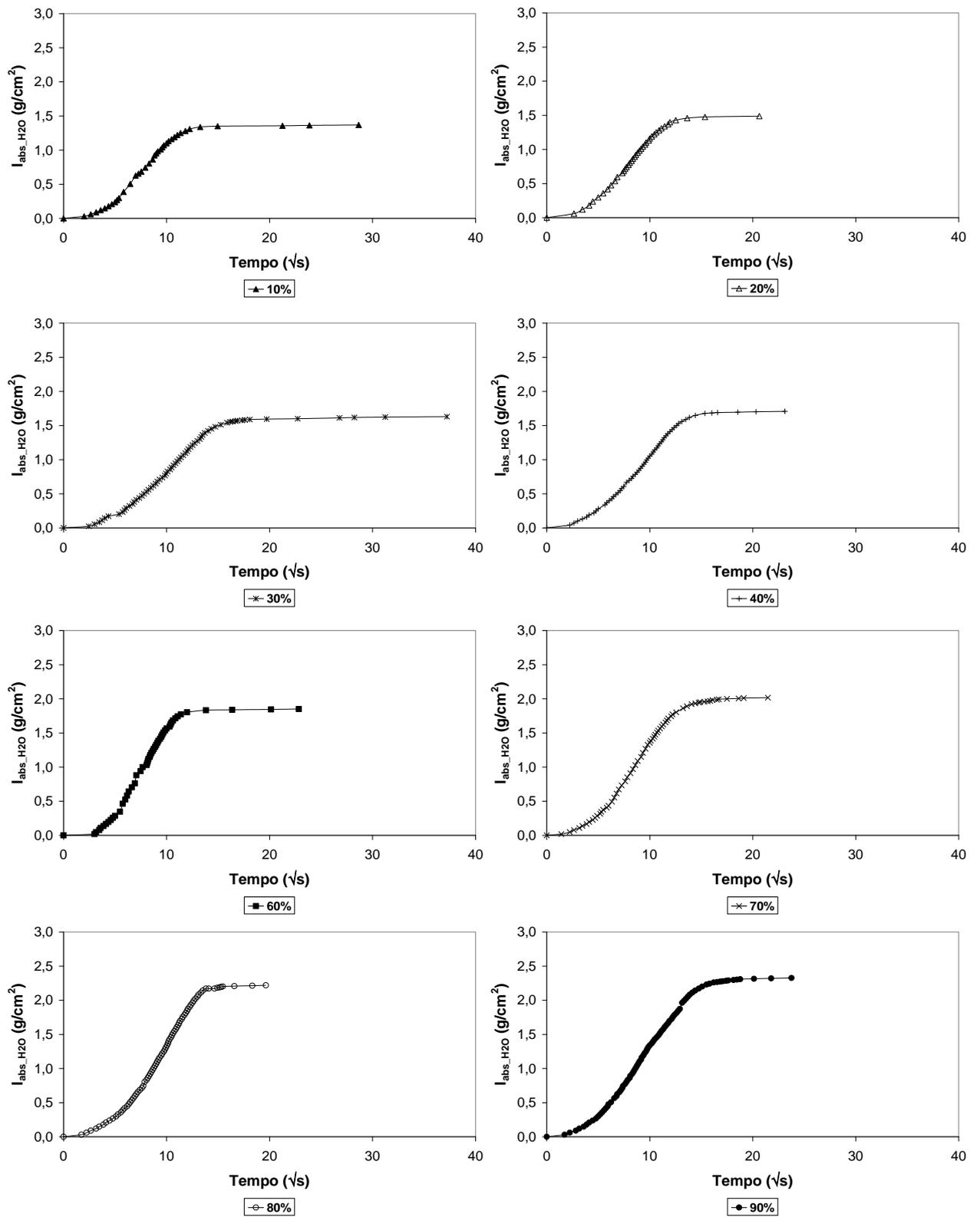
## **ANEXO 2 – Índice de absorção por capilaridade das mesclas de agregados AGN-RES**

---

As figuras abaixo se referem às curvas dos índices de absorção por capilaridade das mesclas envolvendo AGN e RES tipo RCD e CZP.



Referente ao índice de absorção por capilaridade das mesclas de RCD



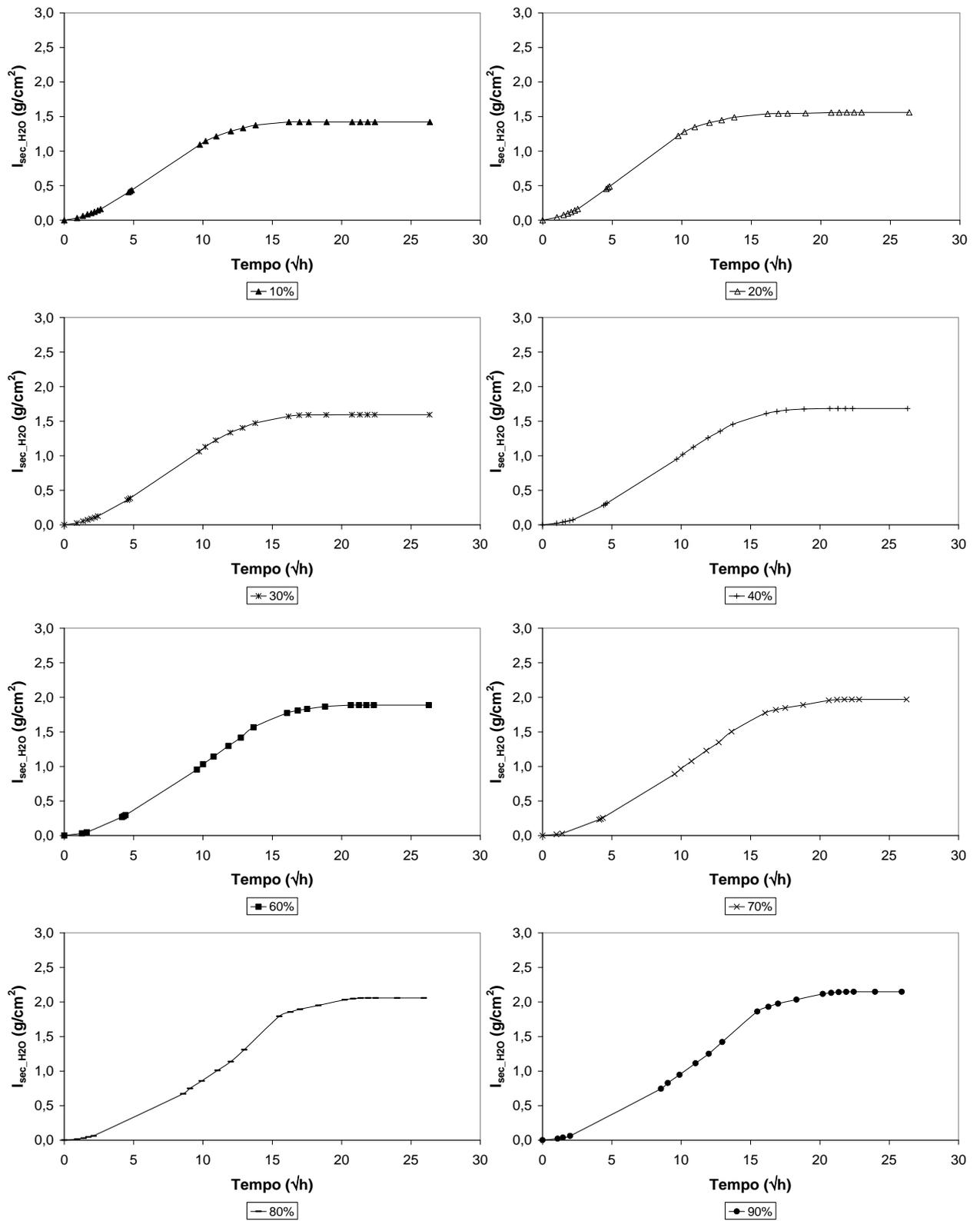
Referente ao índice de absorção por capilaridade das mesclas de CZP

---

# **ANEXO 3 – Perda de água por secagem ao ar das mesclas de agregados AGN-RES**

---

As figuras abaixo se referem às curvas de perda de água por secagem ao ar das mesclas envolvendo AGN e RES tipo RCD e CZP.

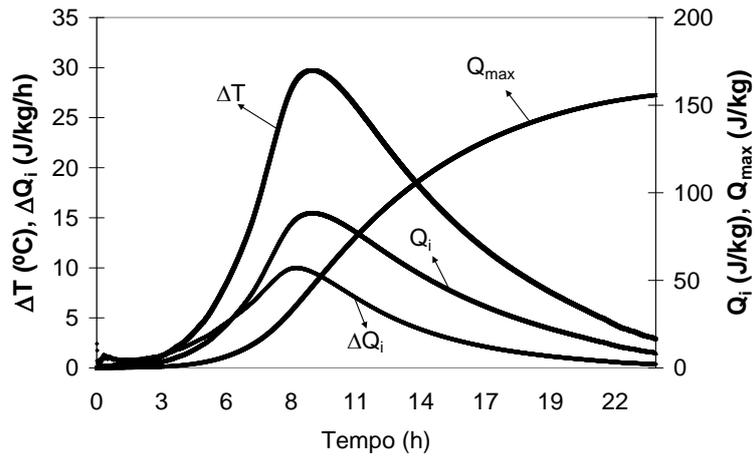


---

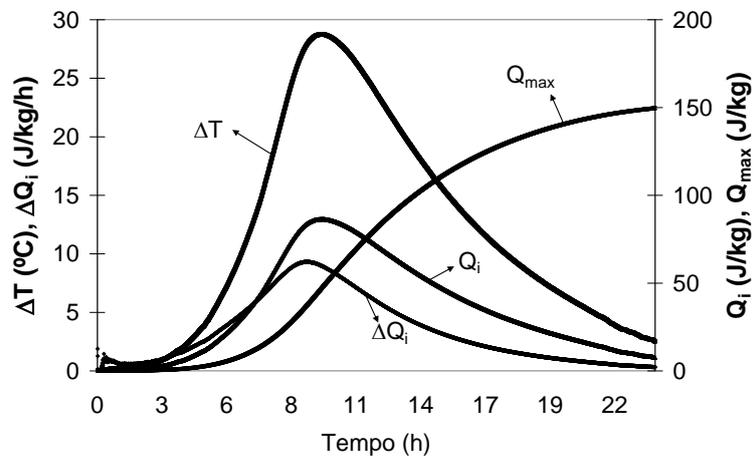
## **ANEXO 4 – Parâmetros do ensaio de calorimetria das pastas**

---

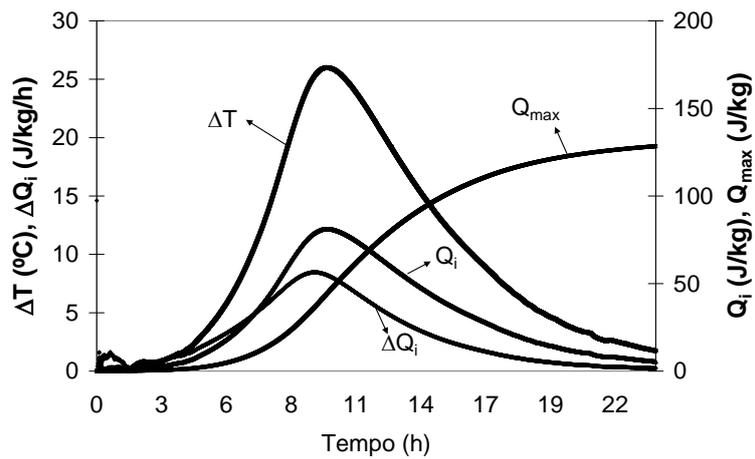
As figuras abaixo se referem aos parâmetros obtidos do ensaio de calorimetria semi-adiabática das pastas sem aditivo superplastificante e com aditivo superplastificante.



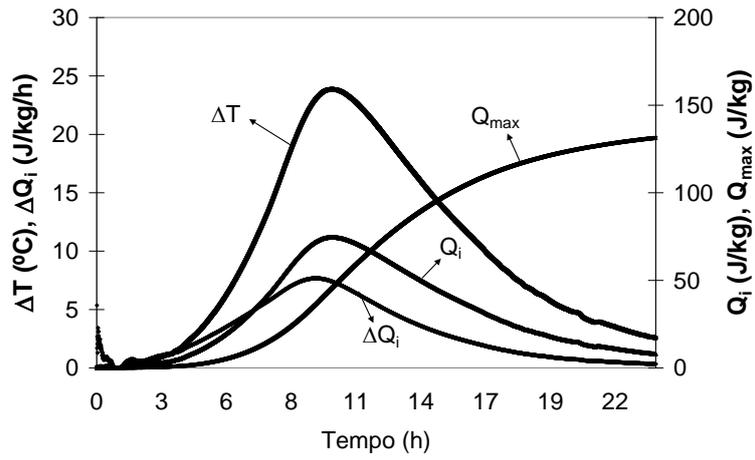
P1 (M500)



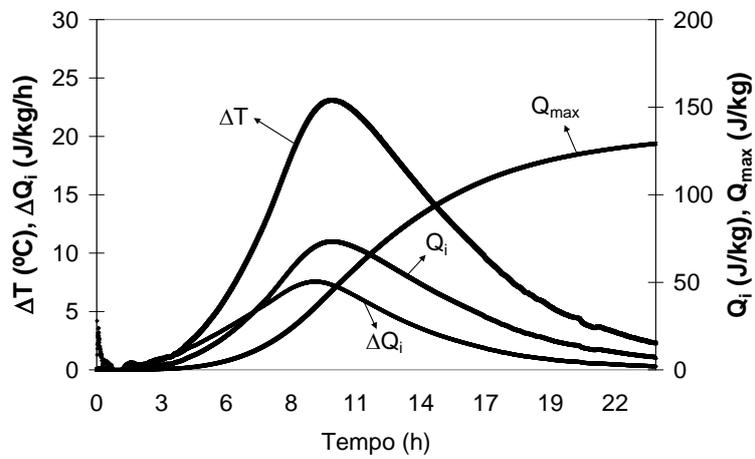
P2 (M450-CZP)



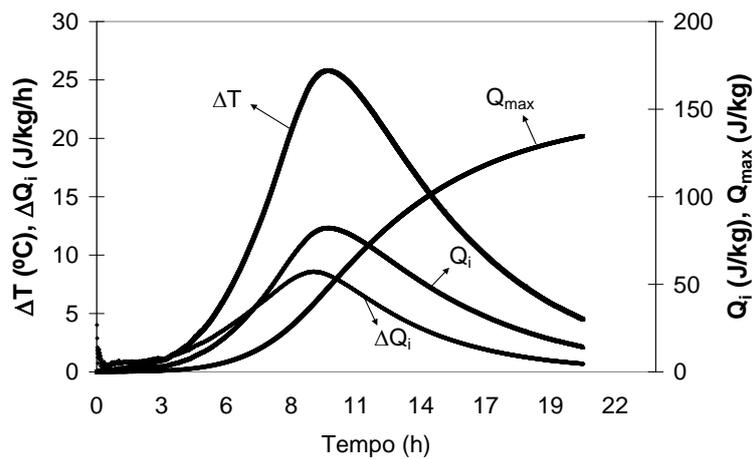
P3 (M450-RCD)



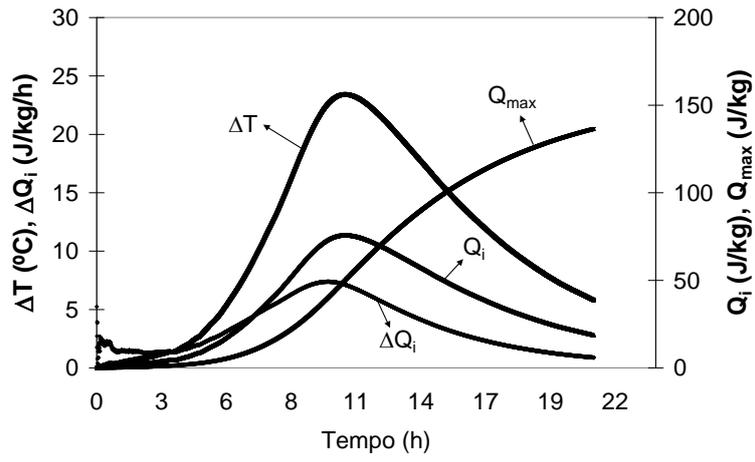
P4 (M350-CZP)



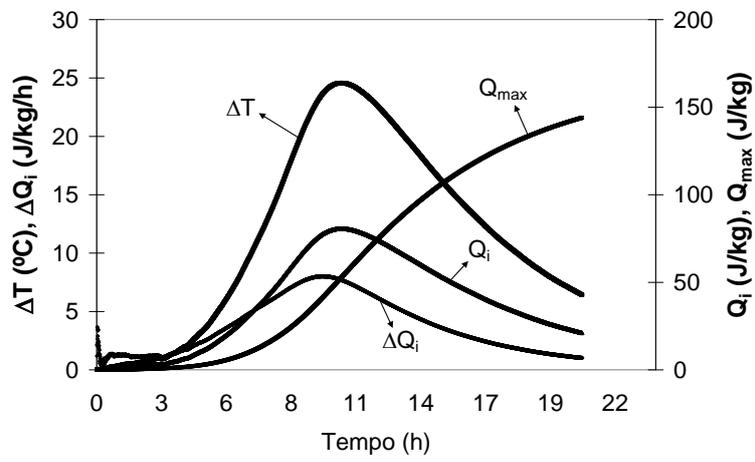
P5 (M400-CZP)



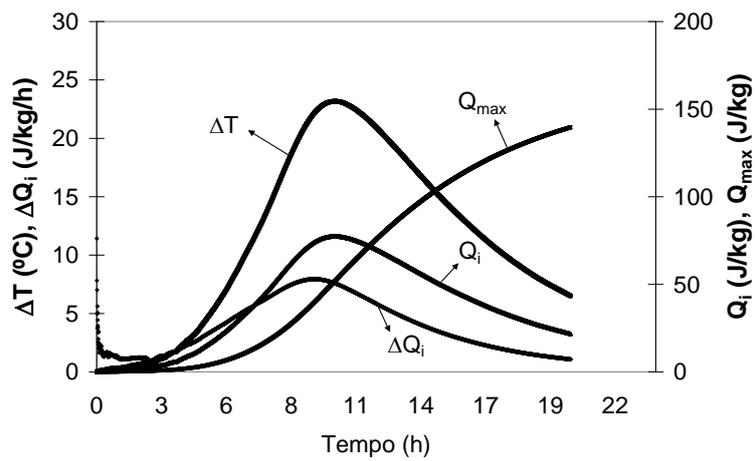
P6 (M300-CZP)



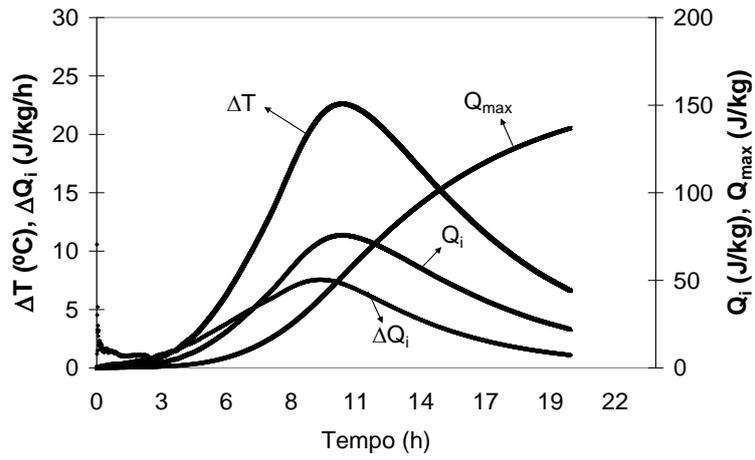
P7 (M400-RCD)



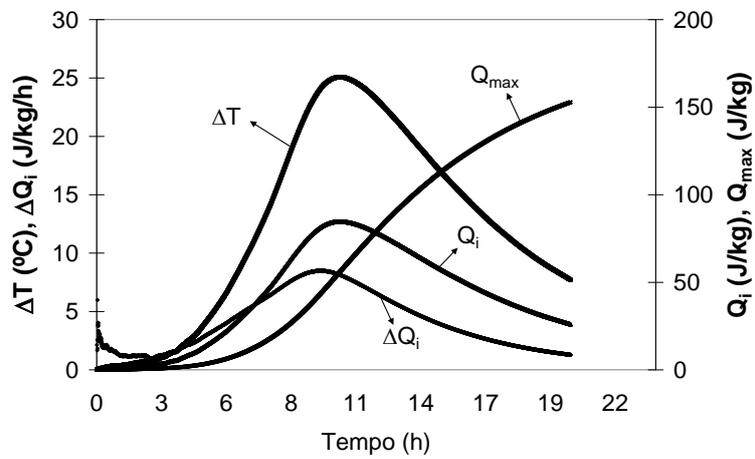
P8 (M250-CZP)



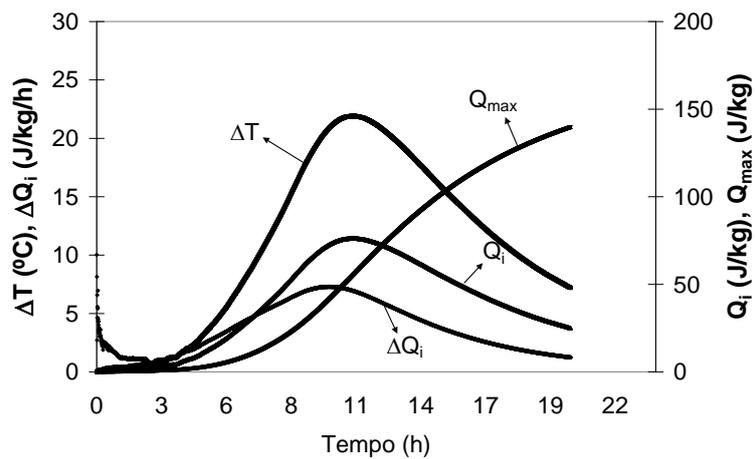
P9 (M300-RCD)



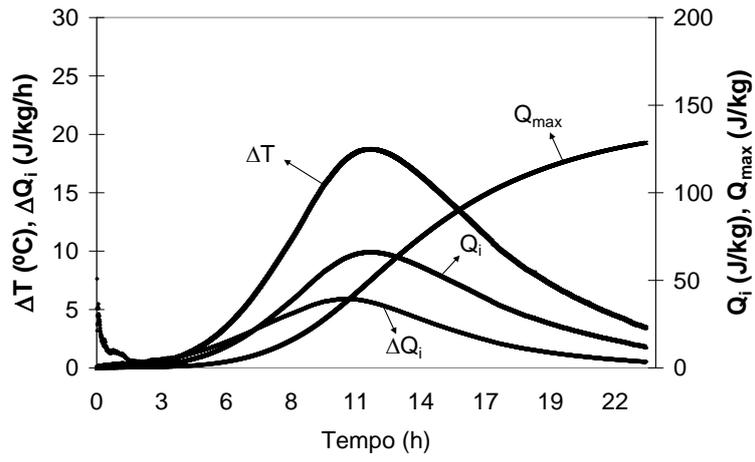
P10 (M200-CZP)



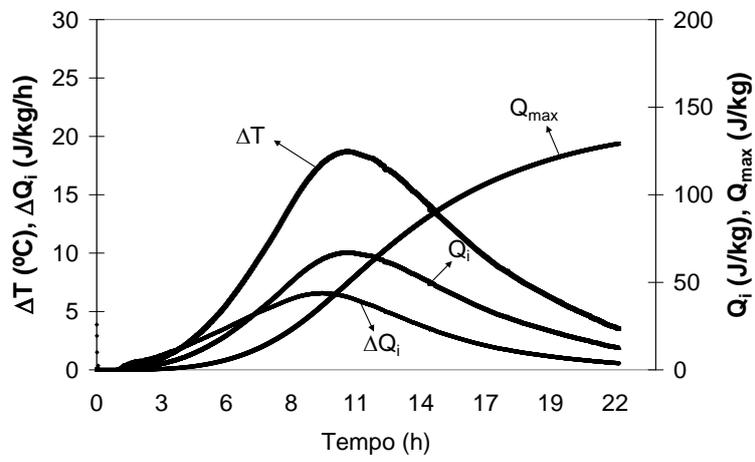
P11 (M350-RCD)



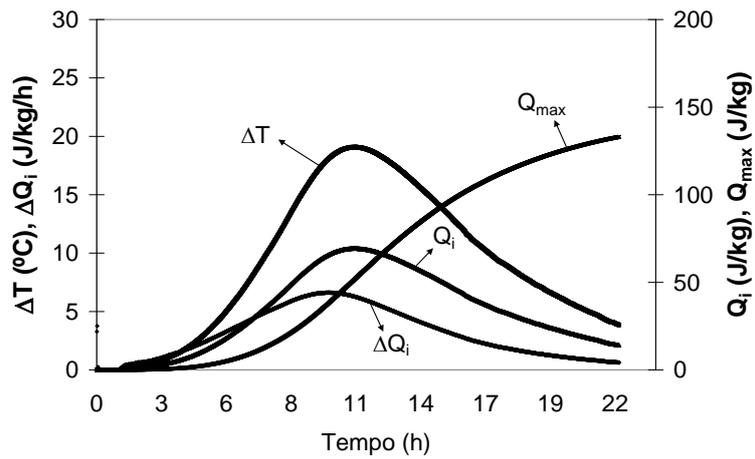
P12 (M250-RCD)



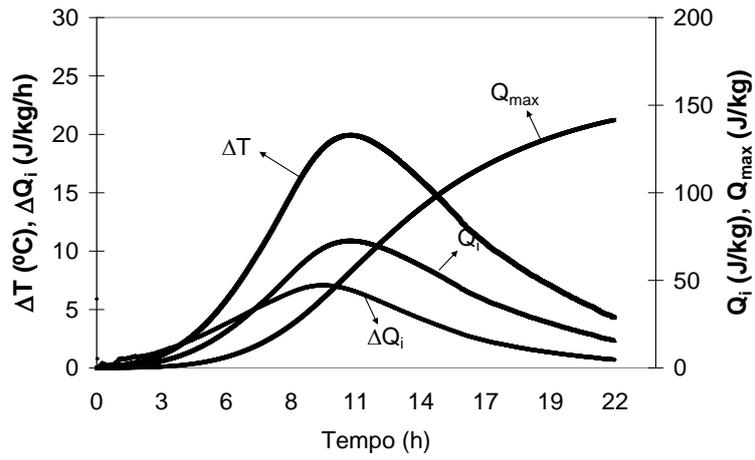
P13 (M150-CZP)



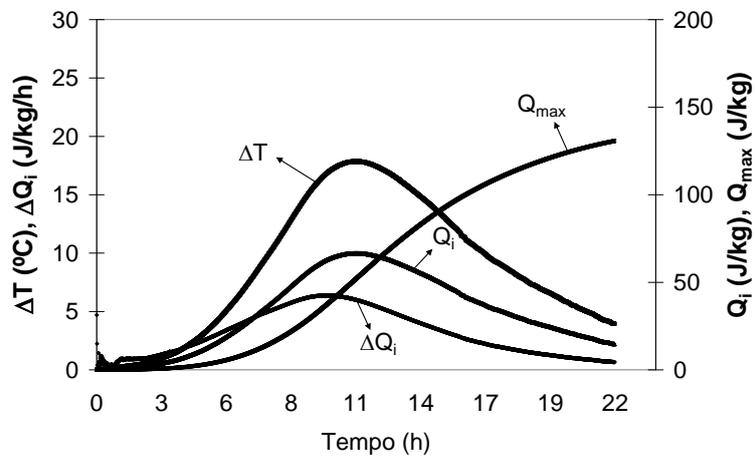
P14 (M150-RCD)



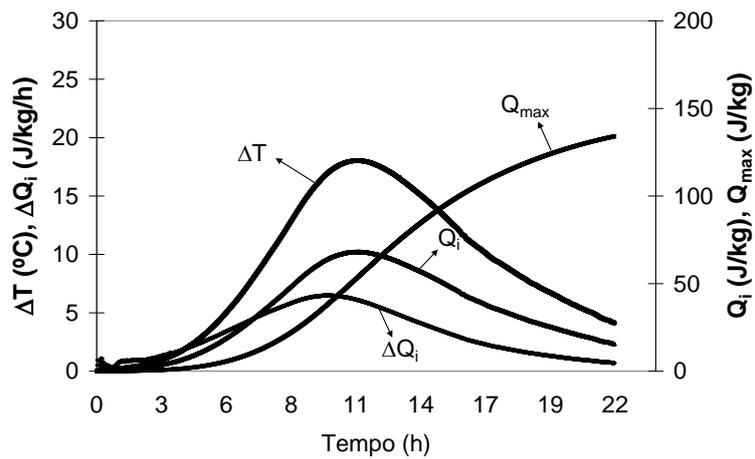
P15 (M200-RCD)



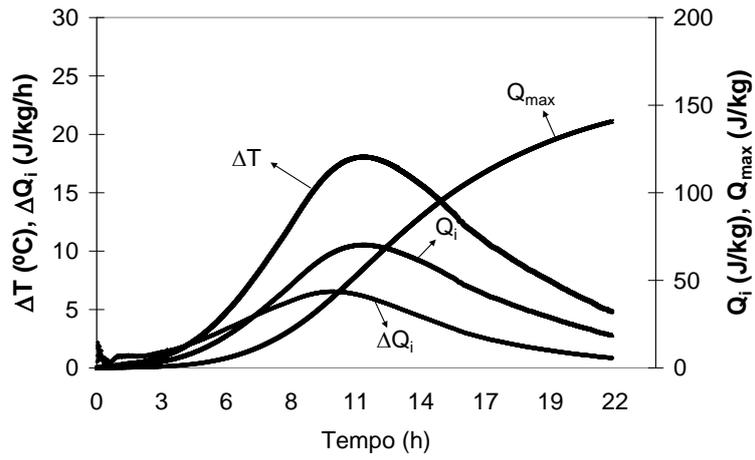
P16 (M100-CZP)



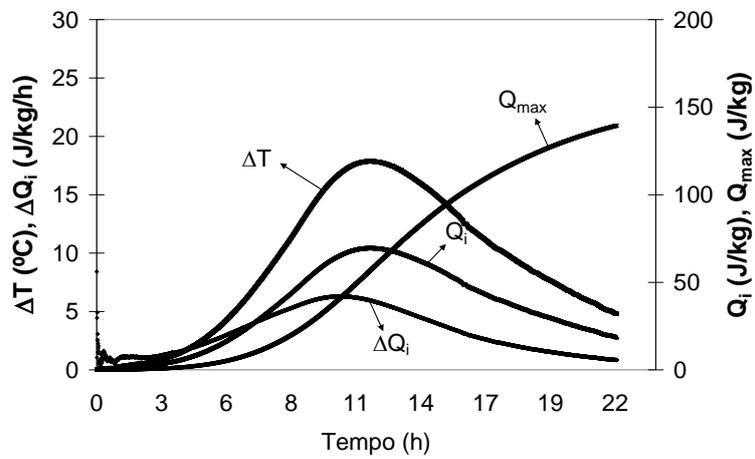
P17 (M100-RCD)



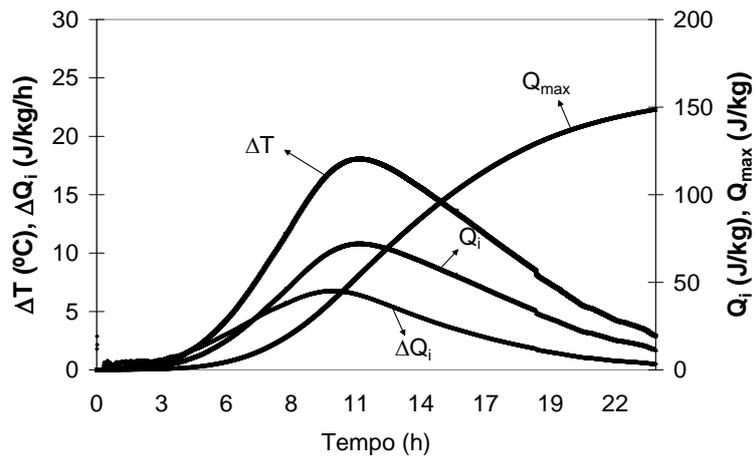
P18 (M50-CZP)



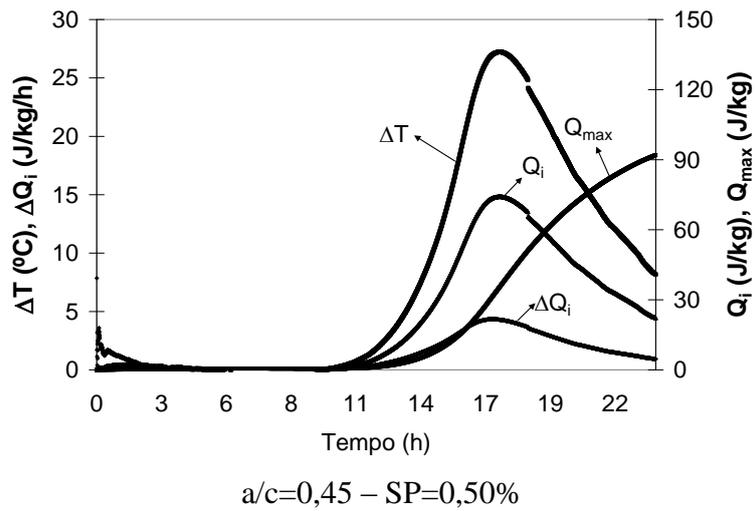
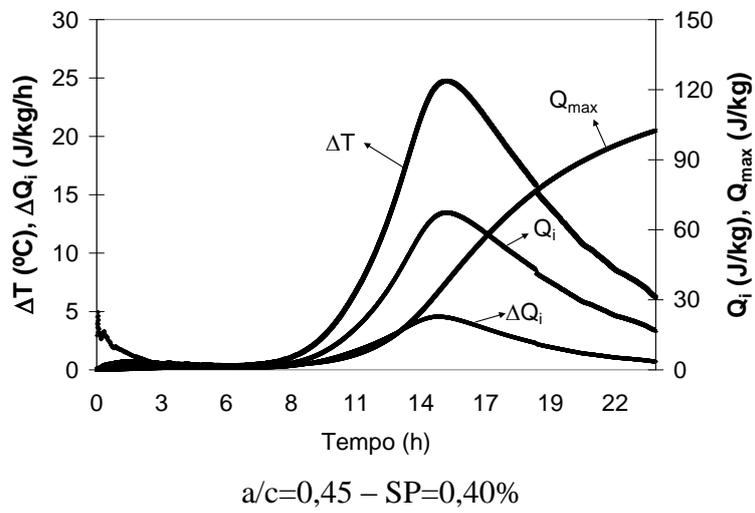
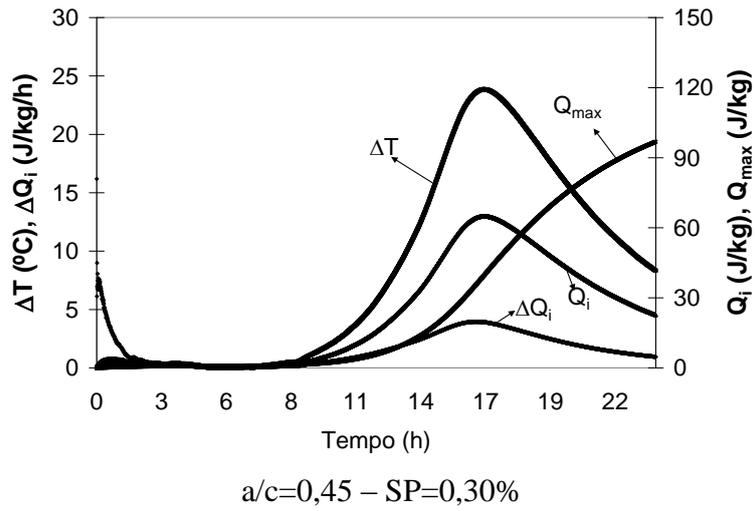
P19 (M0-CZP)

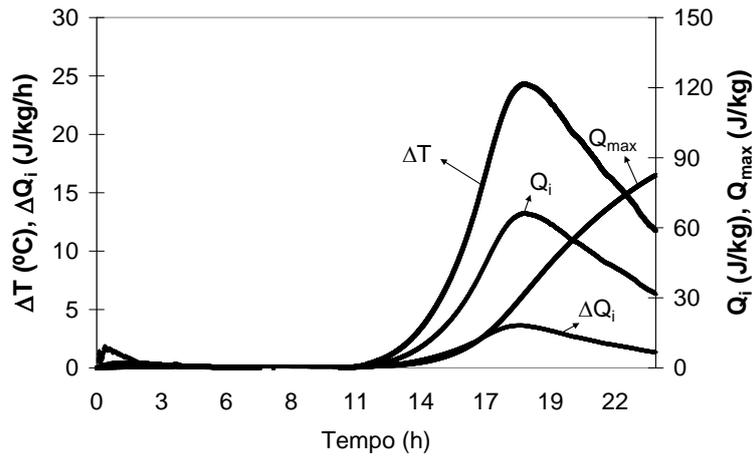


P20 (M50-RCD)

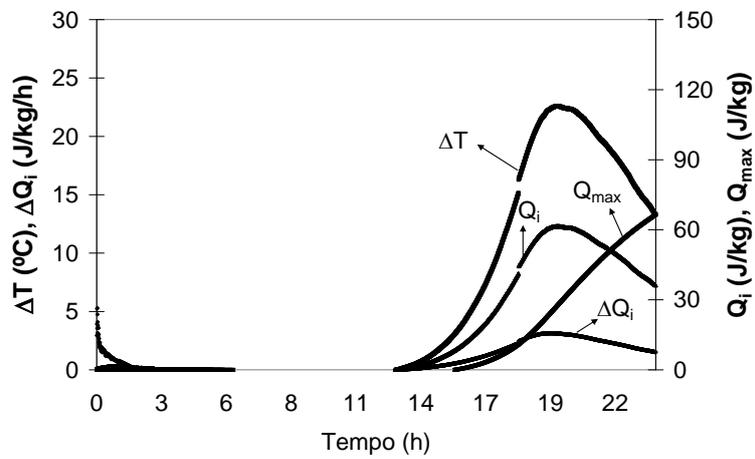


P21 (M0-RCD)

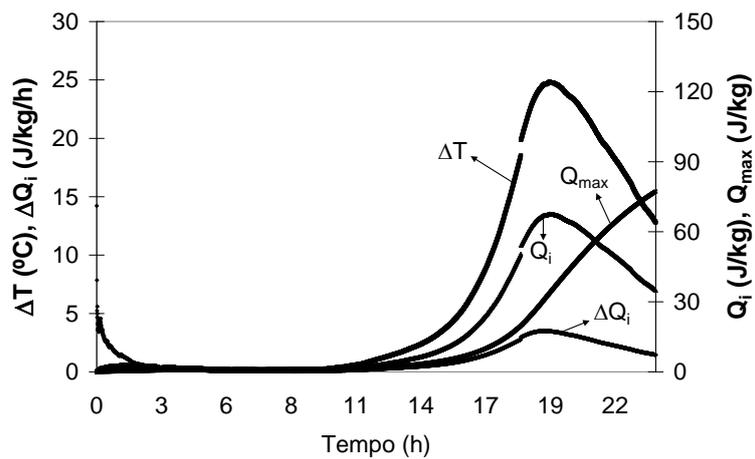




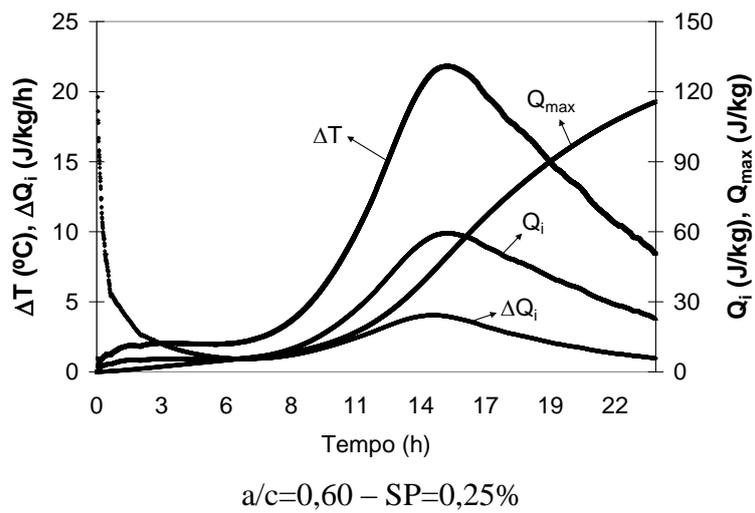
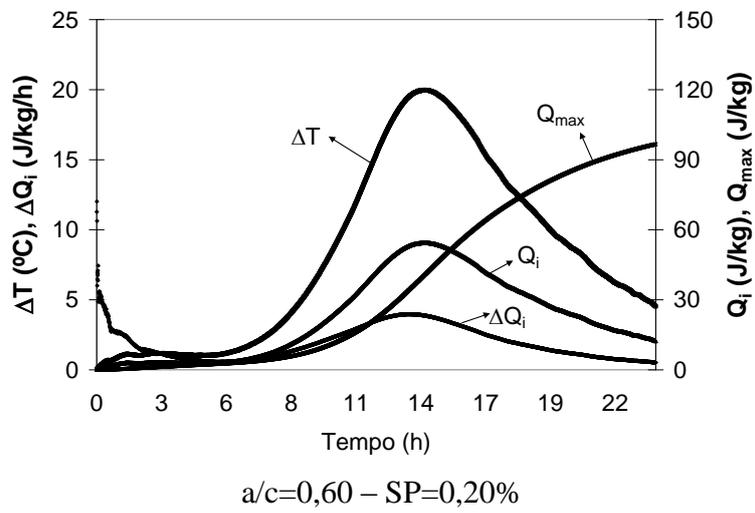
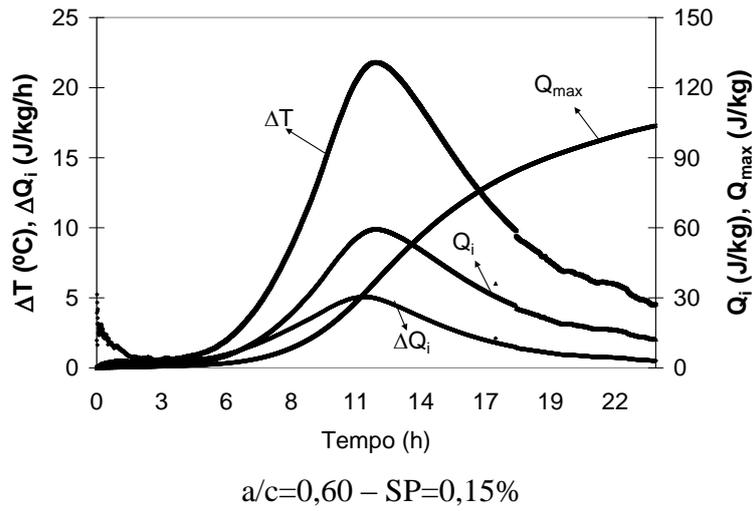
$a/c=0,45 - SP=0,70\%$

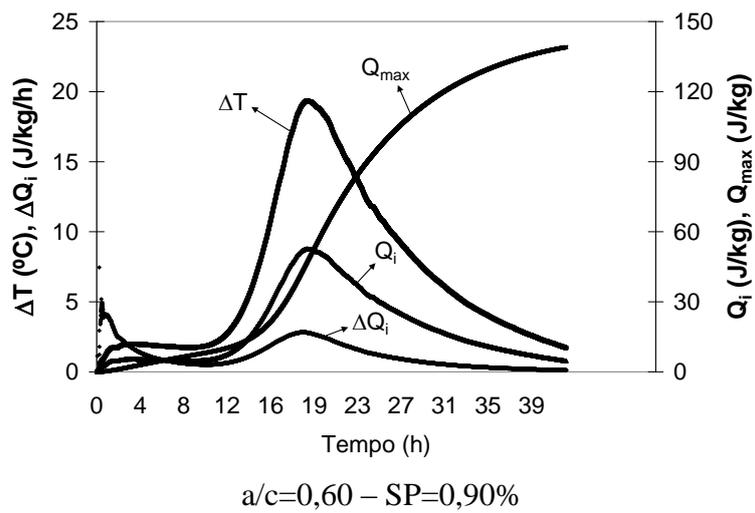
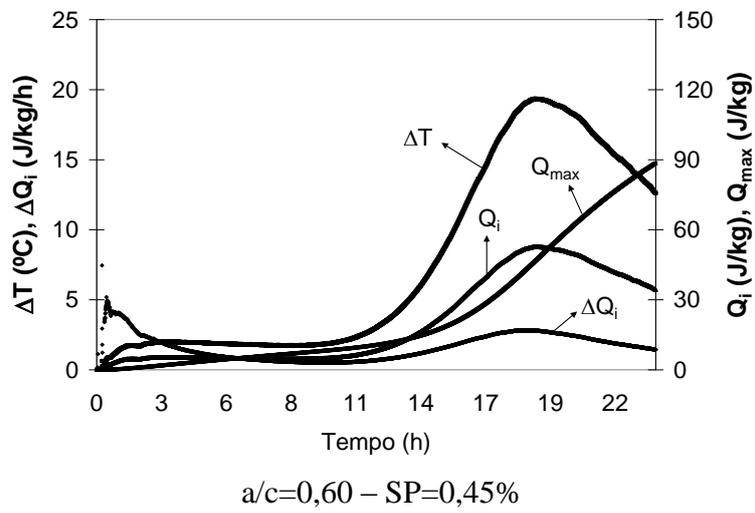
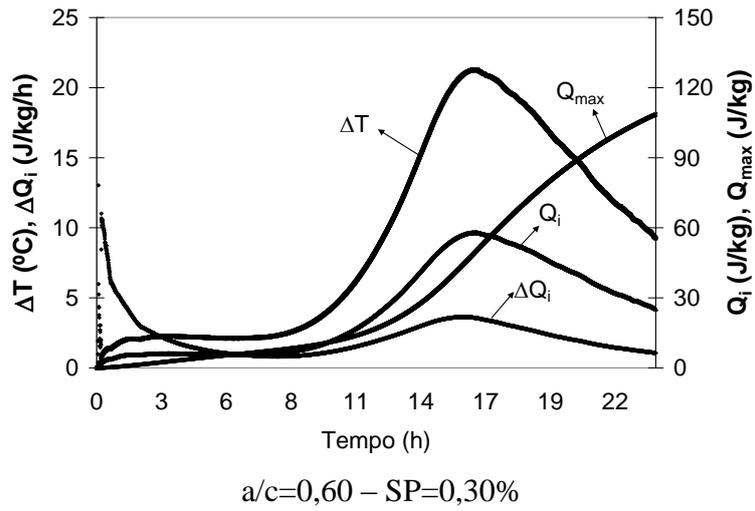


$a/c=0,45 - SP=0,80\%$



$a/c=0,45 - SP=0,90\%$



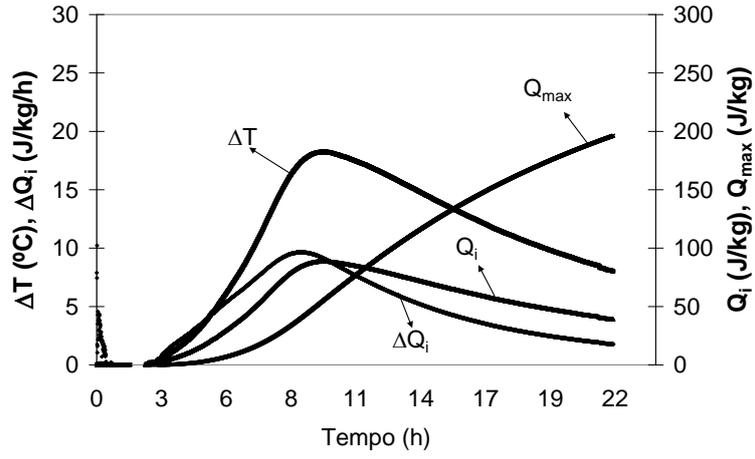


---

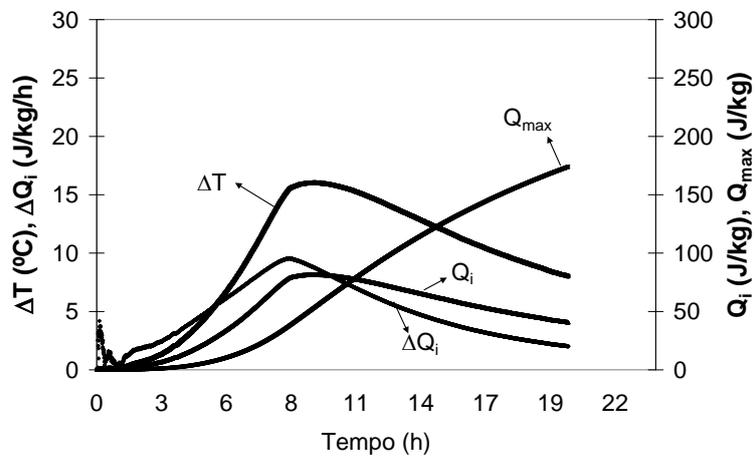
## **ANEXO 5 – Parâmetros do ensaio de calorimetria das argamassas**

---

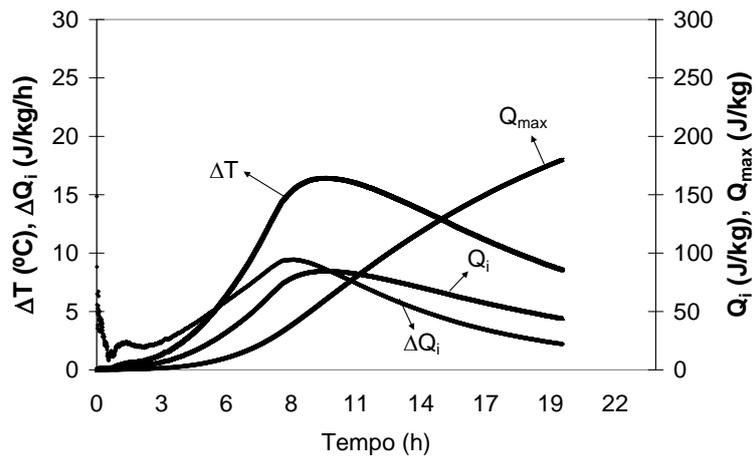
As figuras abaixo se referem aos parâmetros obtidos do ensaio de calorimetria semi-adiabática das argamassas sem aditivo superplastificante e com aditivo superplastificante.



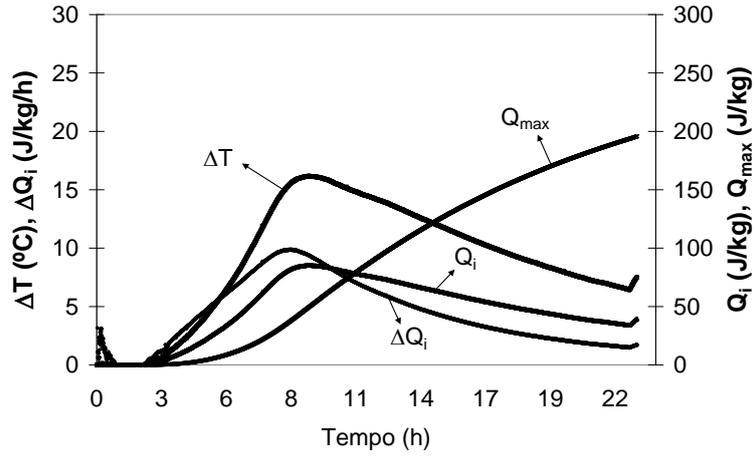
M500 – Série 1



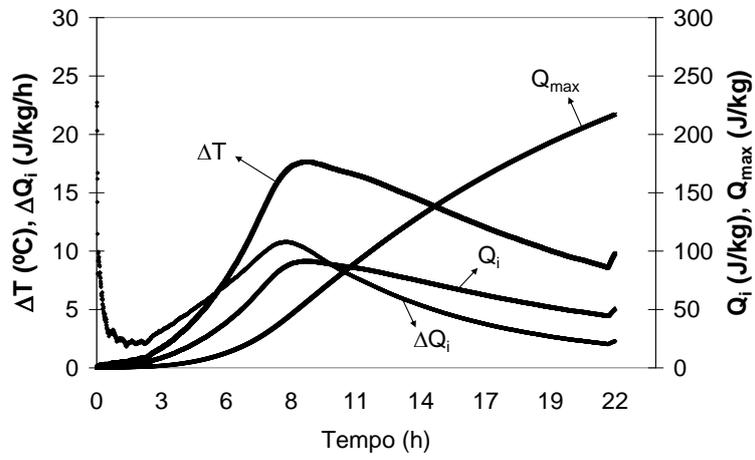
M450 RCD – Série 1



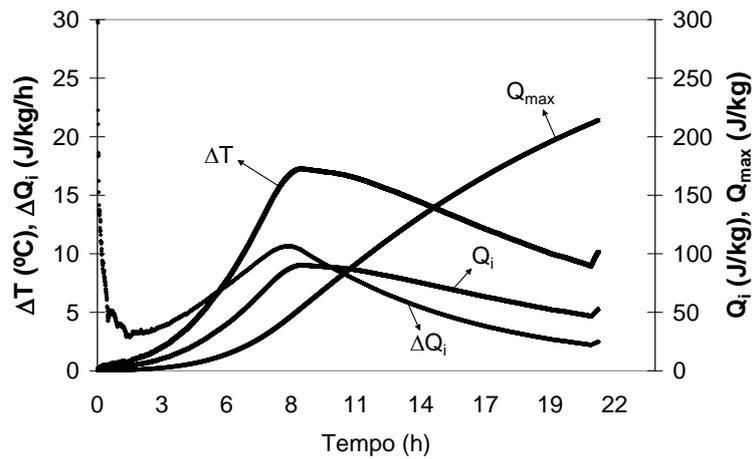
M400 RCD – Série 1



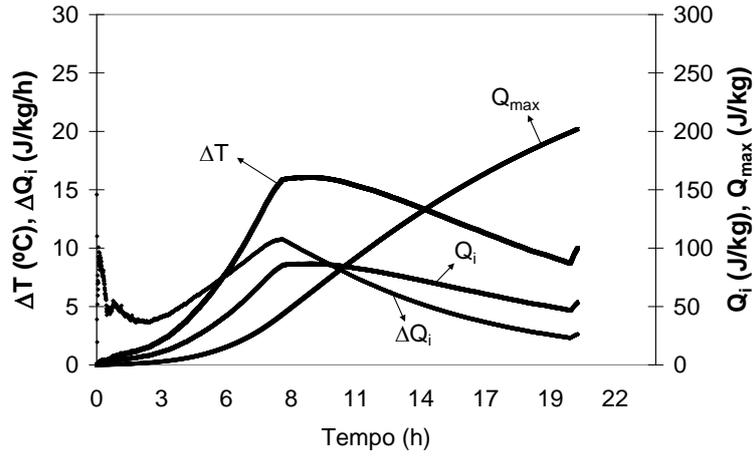
M350 RCD – Série 1



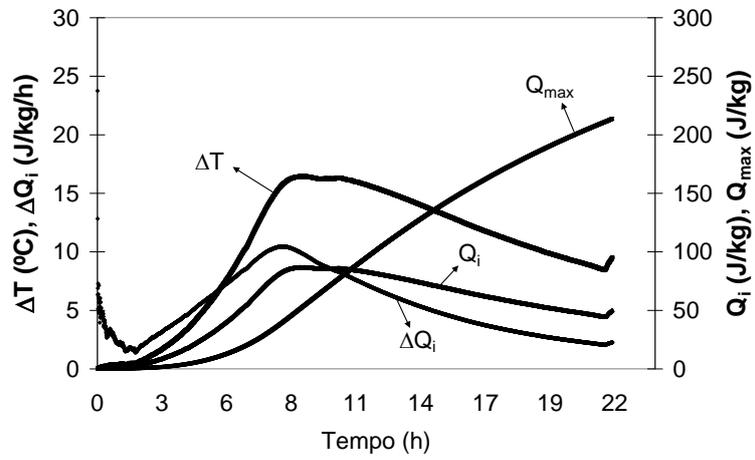
M300 RCD – Série 1



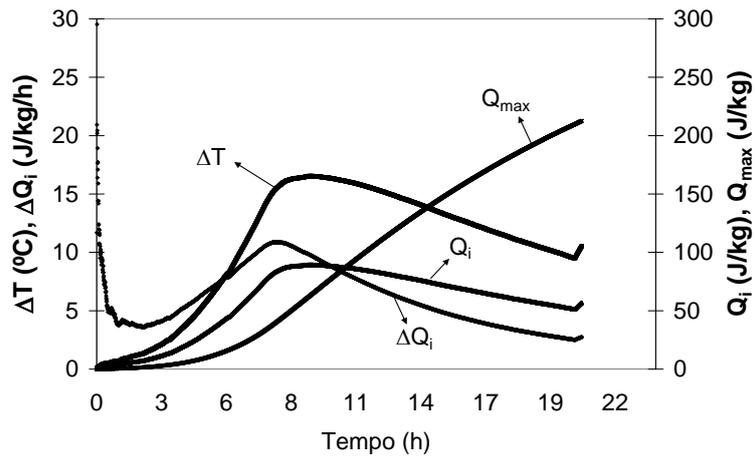
M250 RCD – Série 1



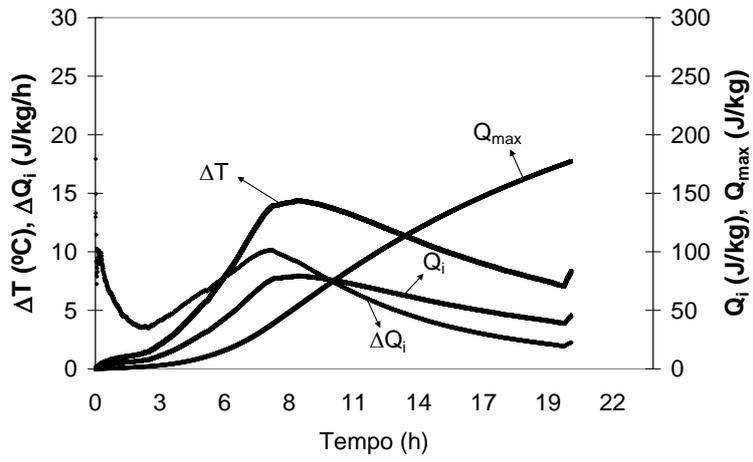
M200 RCD – Série 1



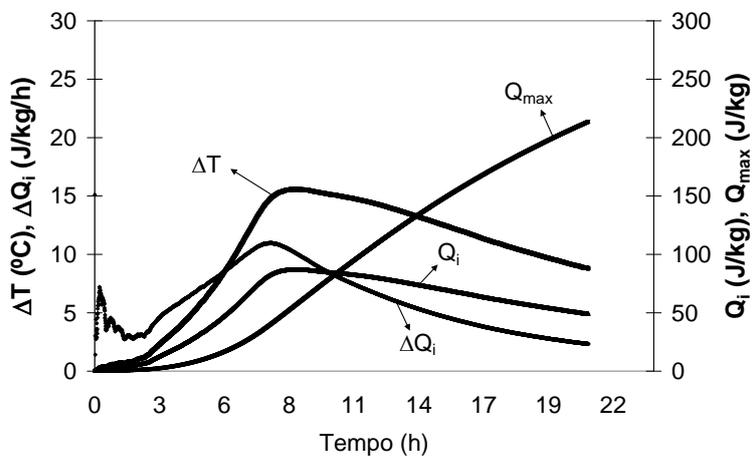
M150 RCD – Série 1



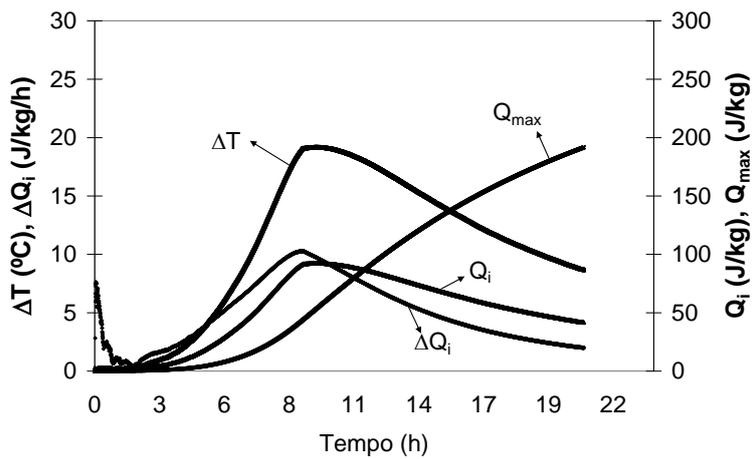
M100 RCD – Série 1



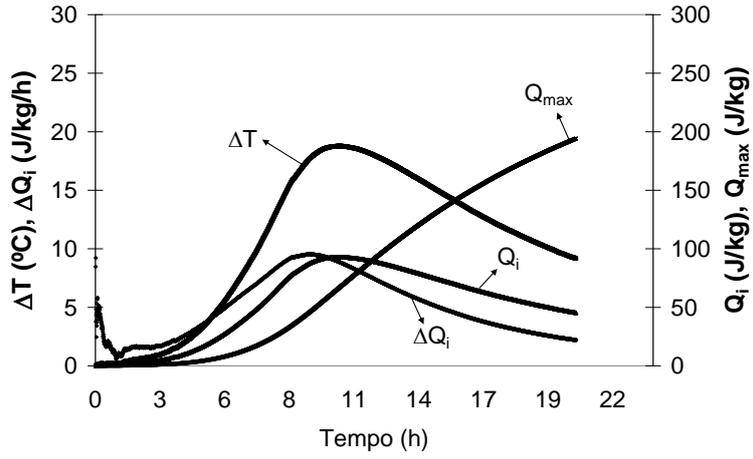
M50 RCD – Série 1



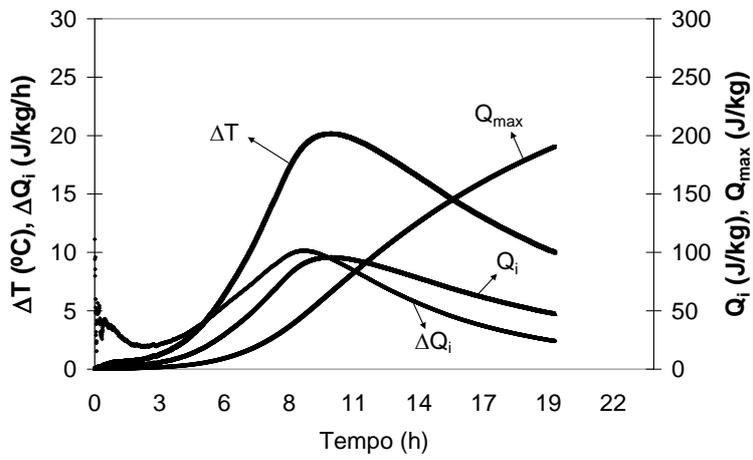
M0 RCD – Série 1



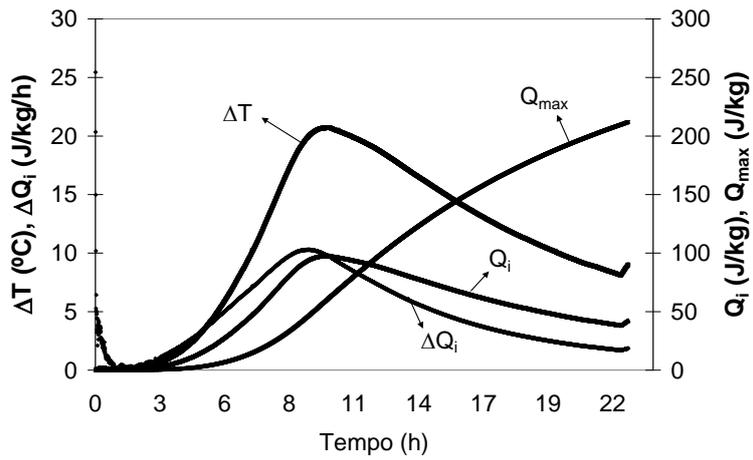
M450 CZP – Série 1



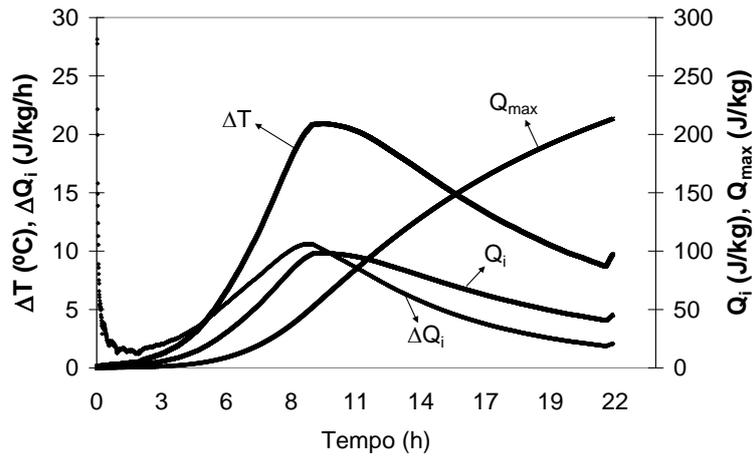
M400 CZP – Série 1



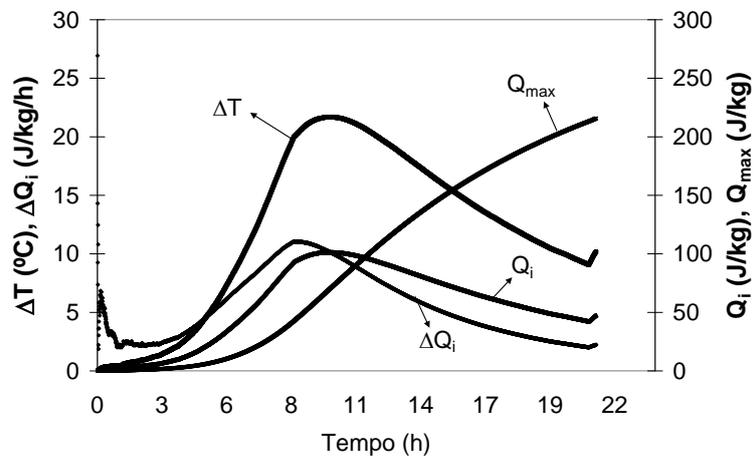
M350 CZP – Série 1



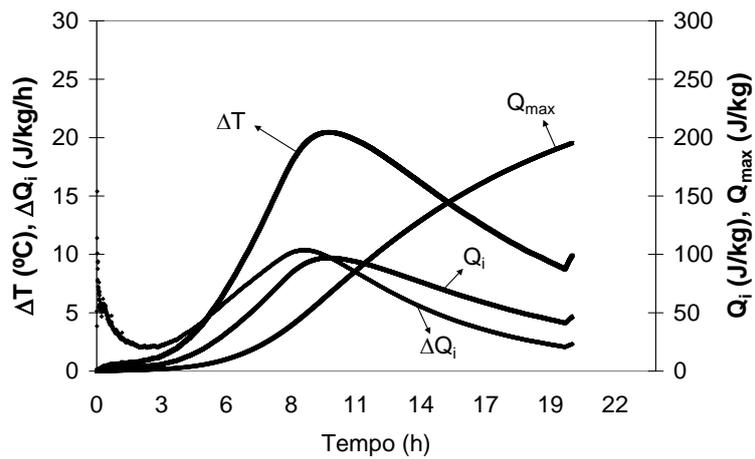
M300 CZP – Série 1



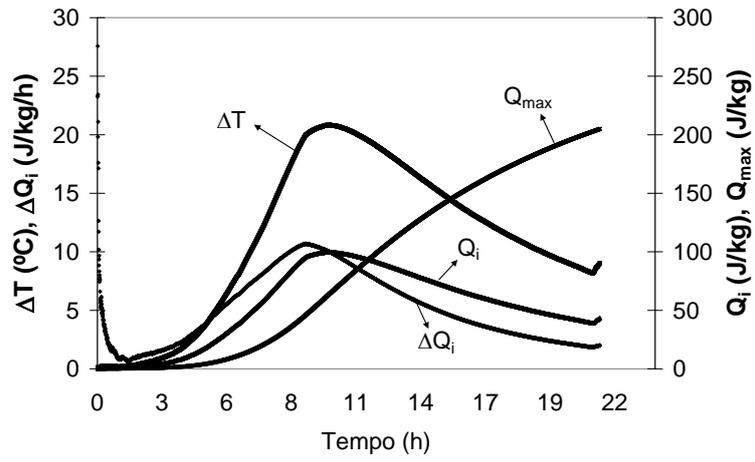
M250 CZP – Série 1



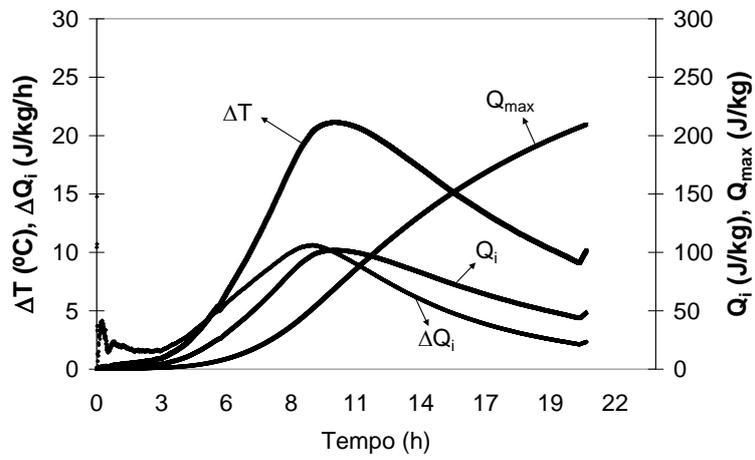
M200 CZP – Série 1



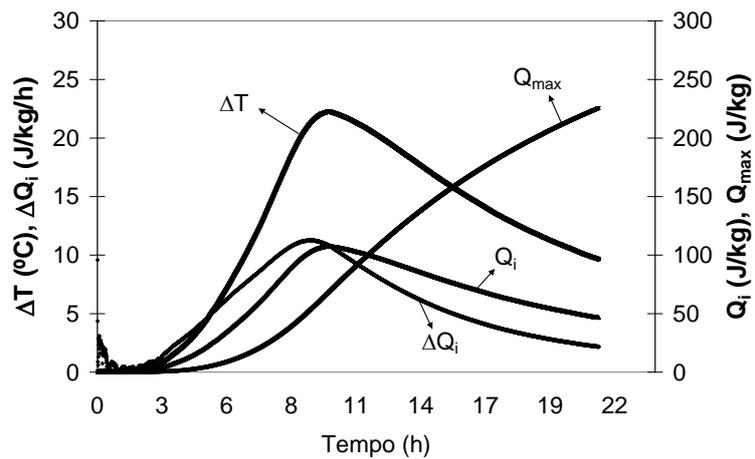
M150 CZP – Série 1



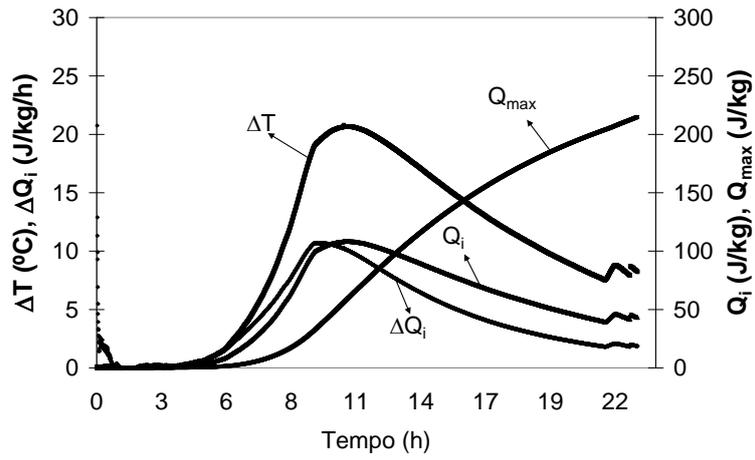
M100 CZP – Série 1



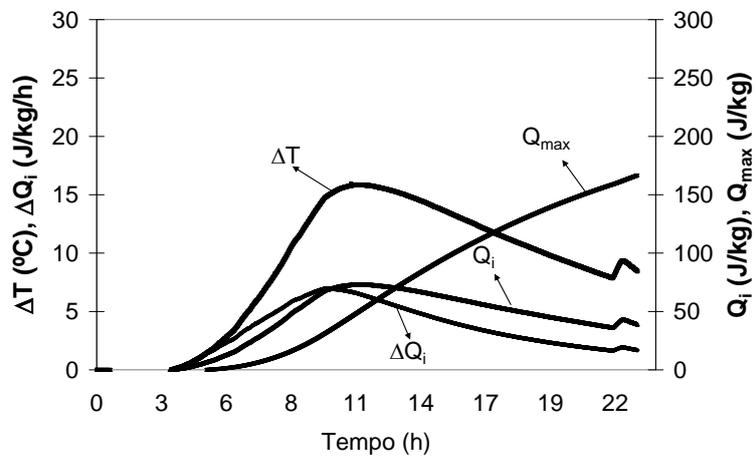
M50 CZP – Série 1



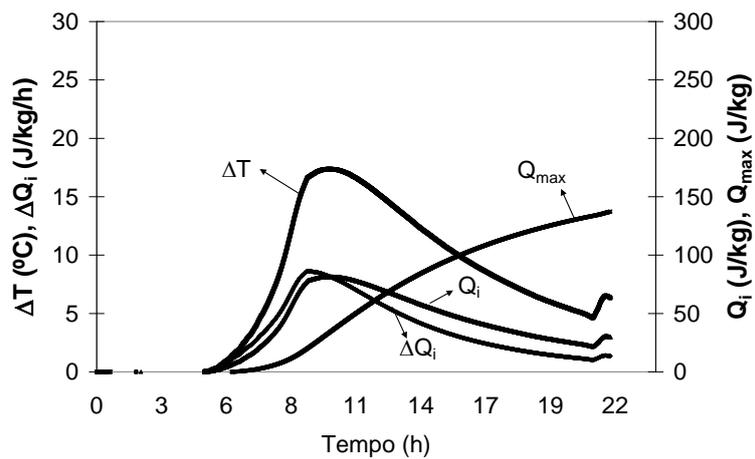
M0 CZP – Série 1



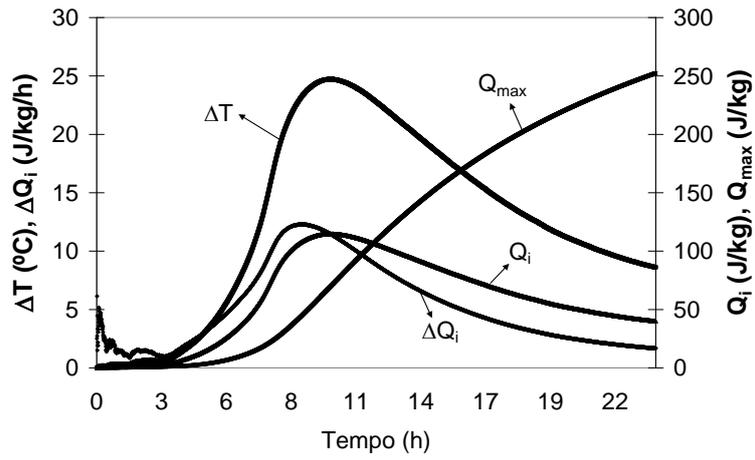
M500 a/c=0,45 – Série 2



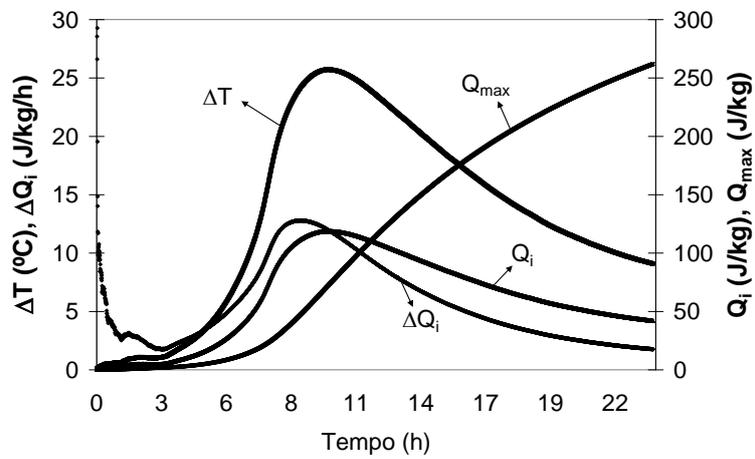
M500 a/c=0,60 – Série 2



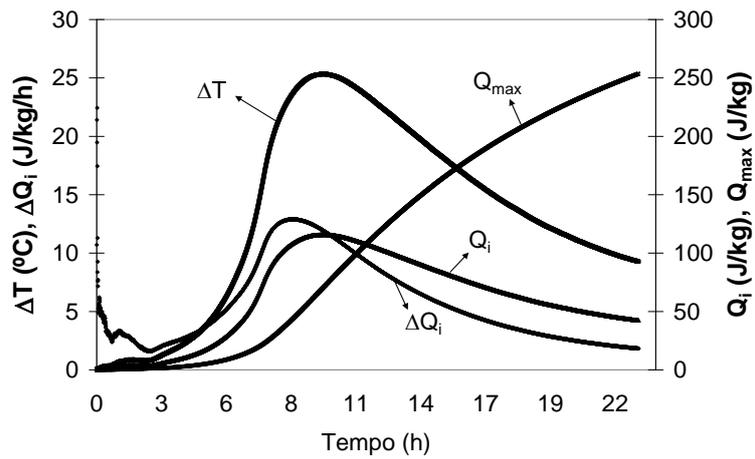
M450 RCD – Série 2



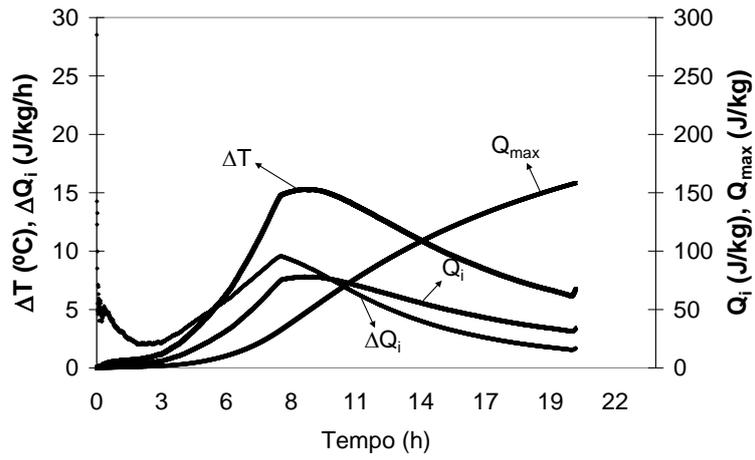
M400 RCD – Série 2



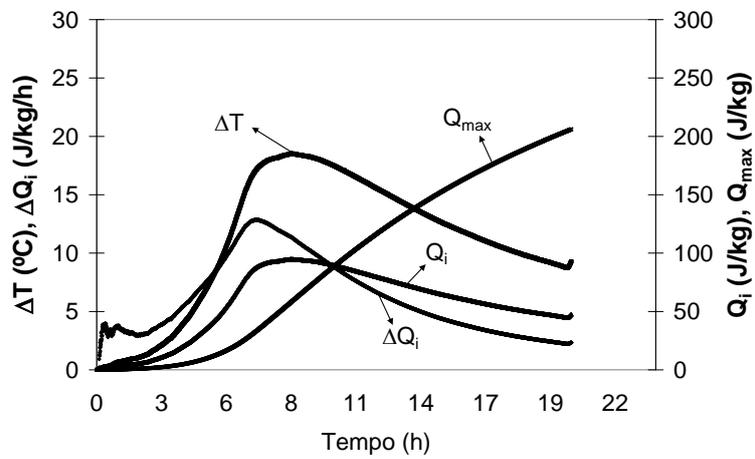
M350 RCD – Série 2



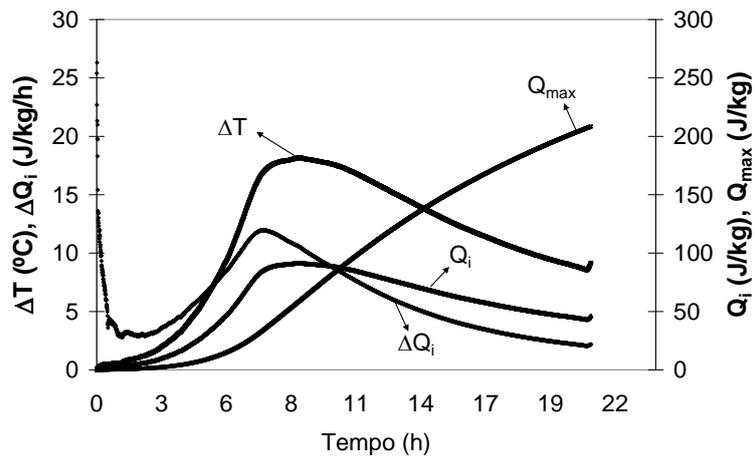
M300 RCD – Série 2



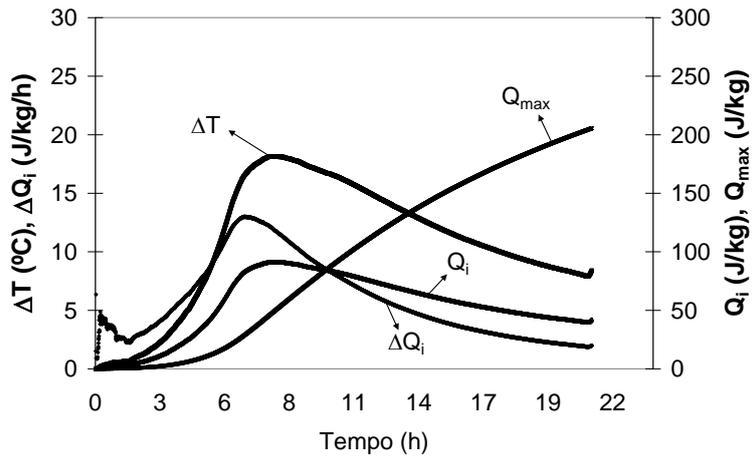
M250 RCD – Série 2



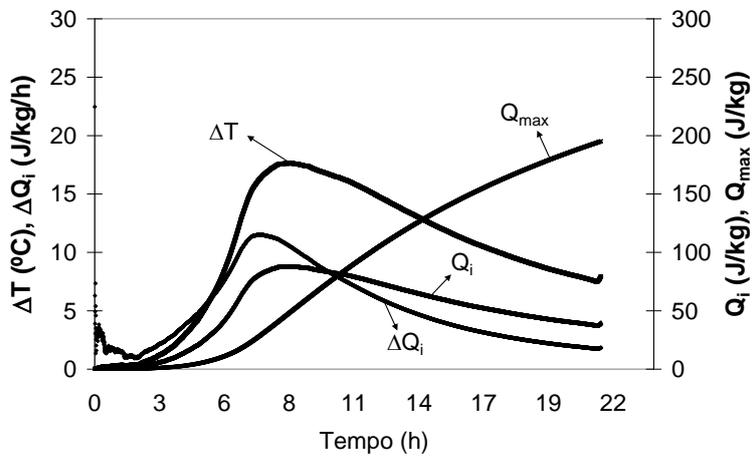
M200 RCD – Série 2



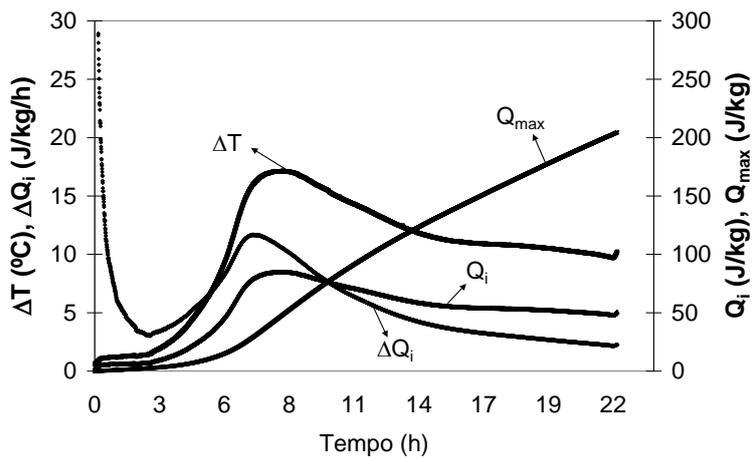
M150 RCD – Série 2



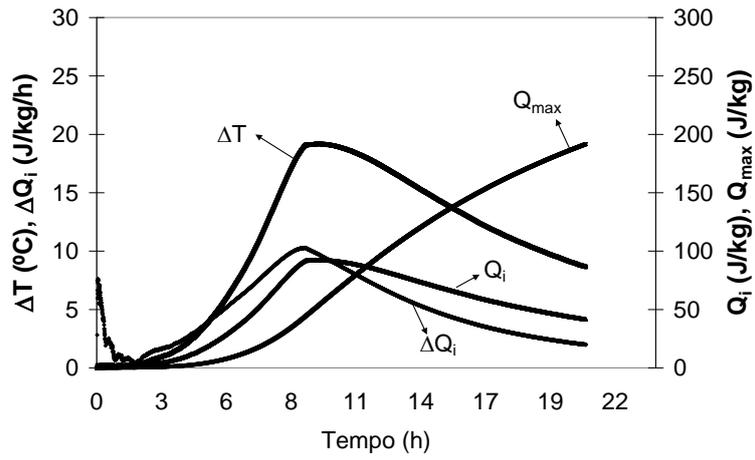
M100 RCD – Série 2



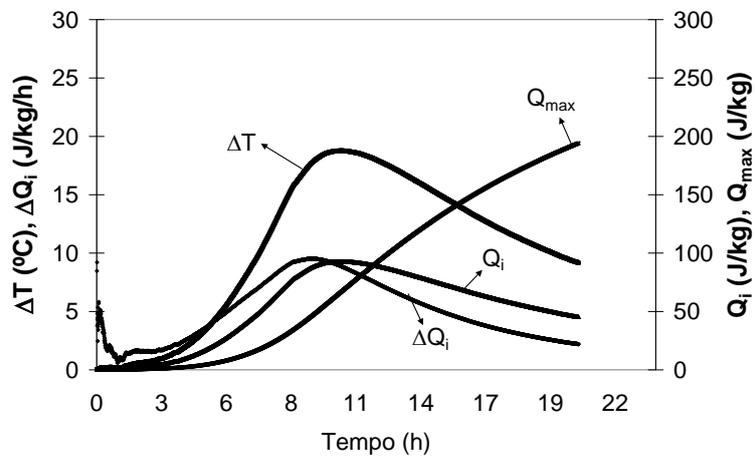
M50 RCD – Série 2



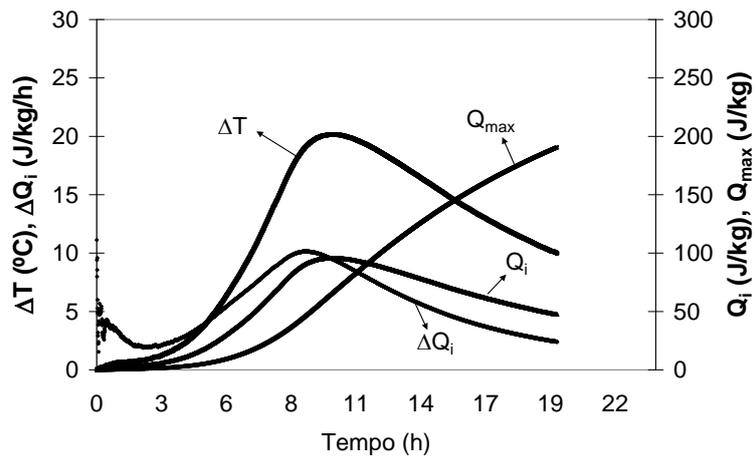
M0 RCD – Série 2



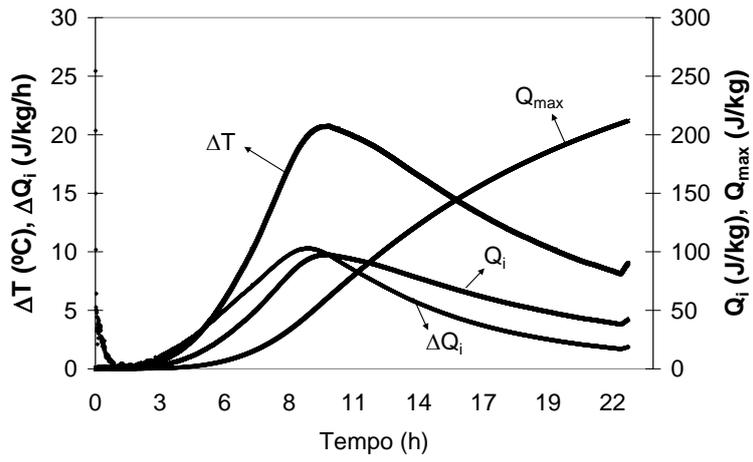
M450 CZP – Série 2



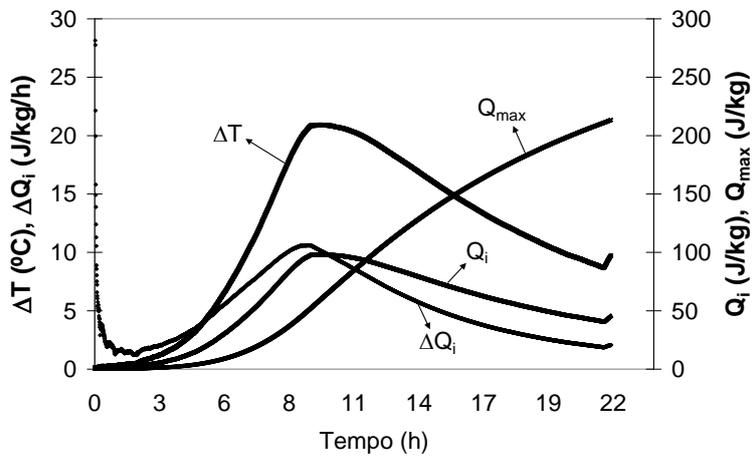
M400 CZP – Série 2



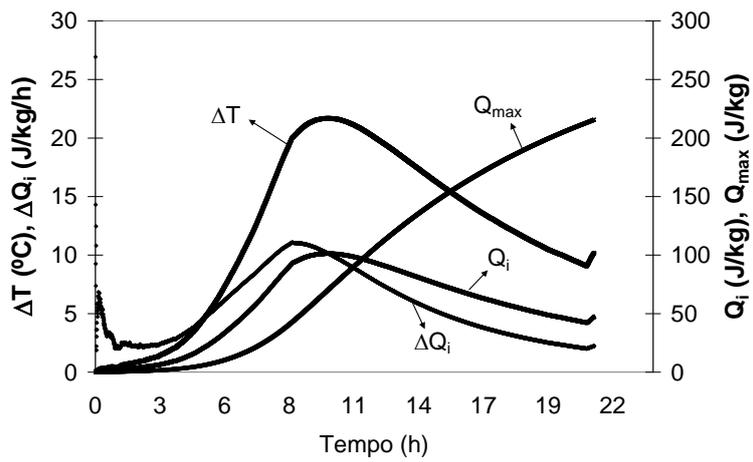
M350 CZP – Série 2



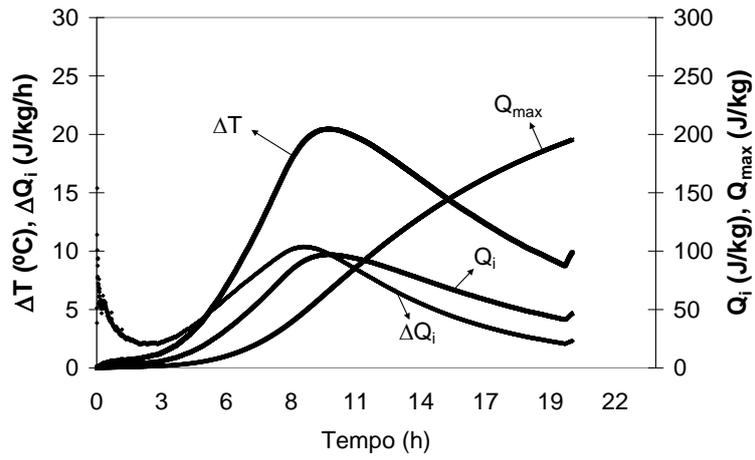
M300 CZP – Série 2



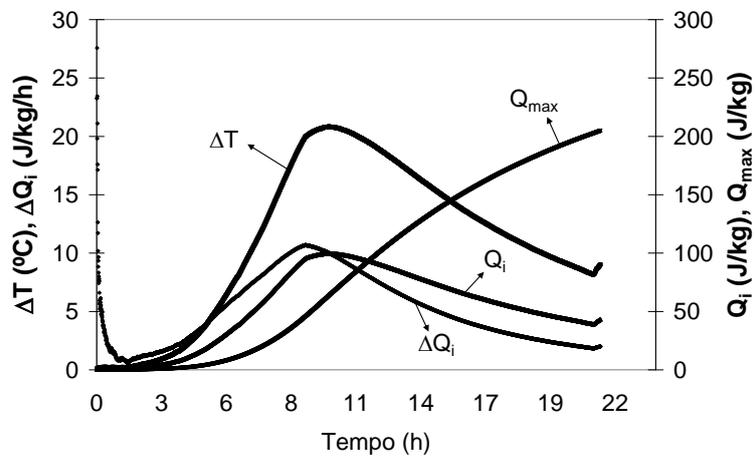
M250 CZP – Série 2



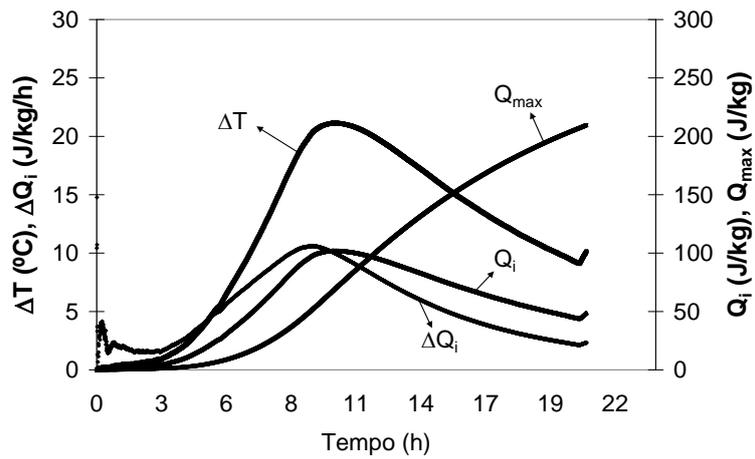
M200 CZP – Série 2



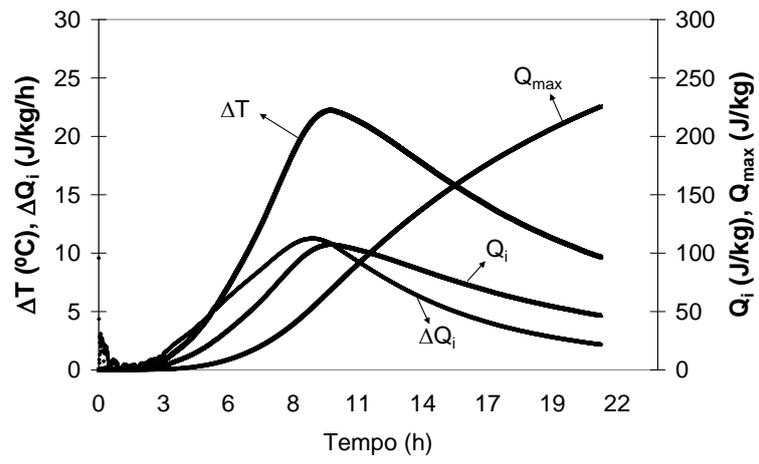
M150 CZP – Série 2



M100 CZP – Série 2



M50 CZP – Série 2



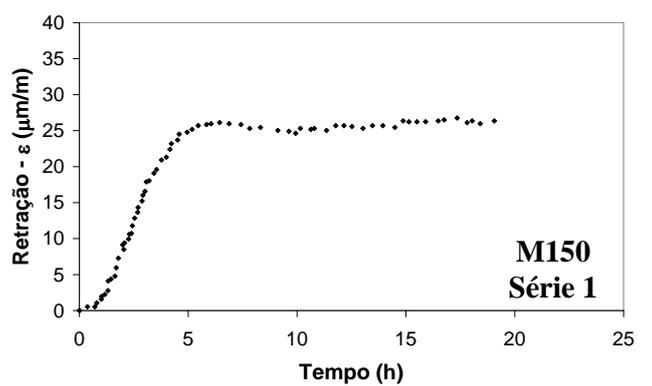
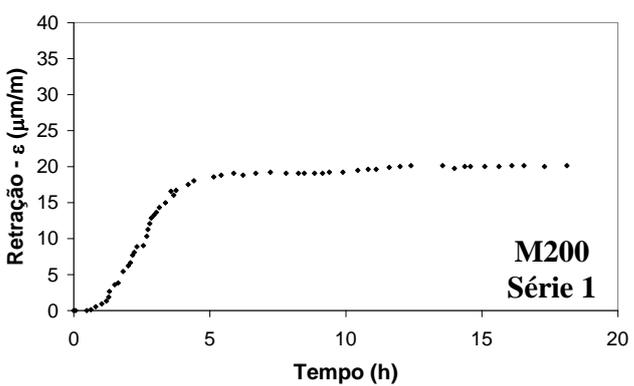
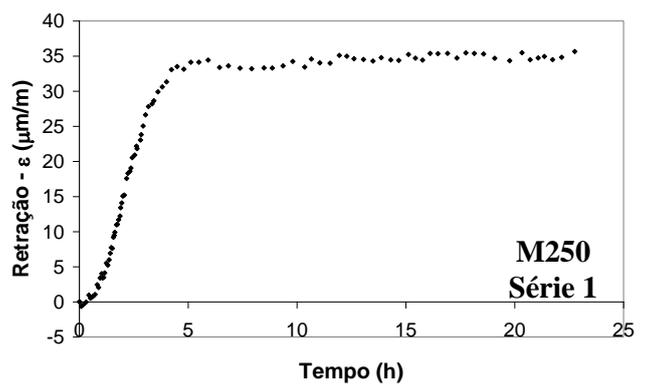
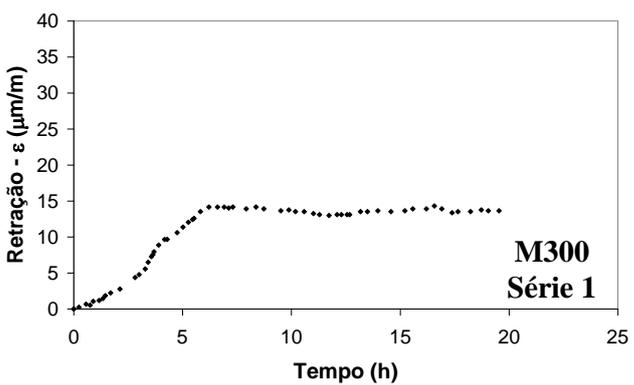
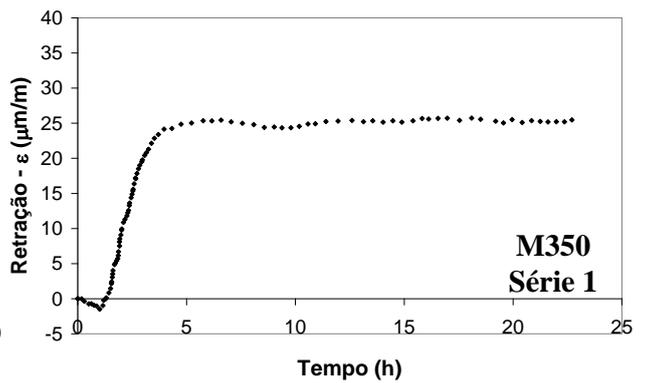
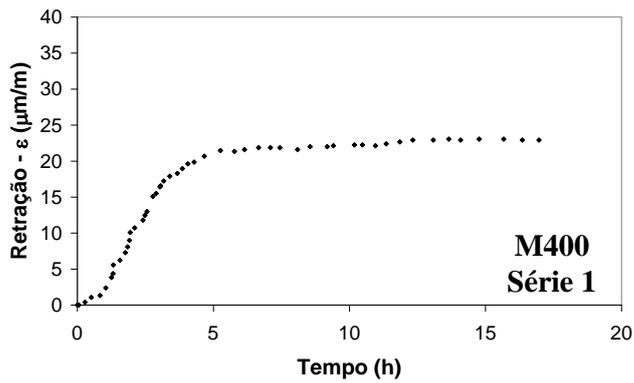
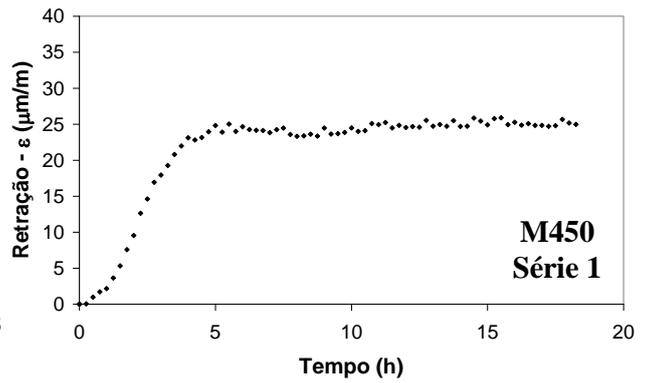
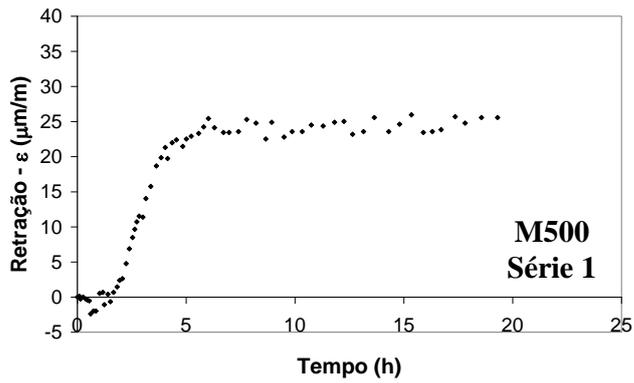
M0 CZP – Série 2

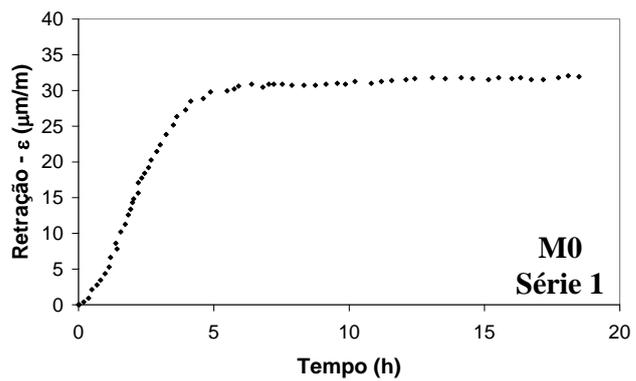
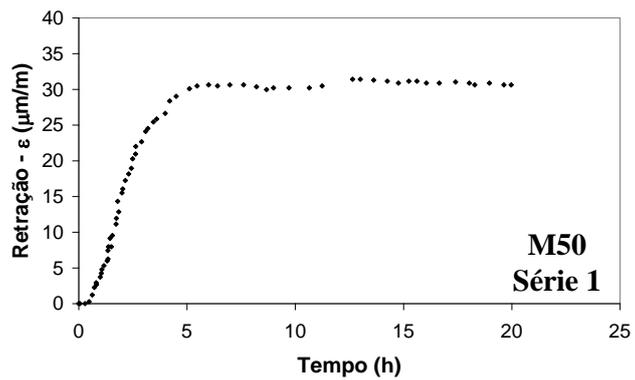
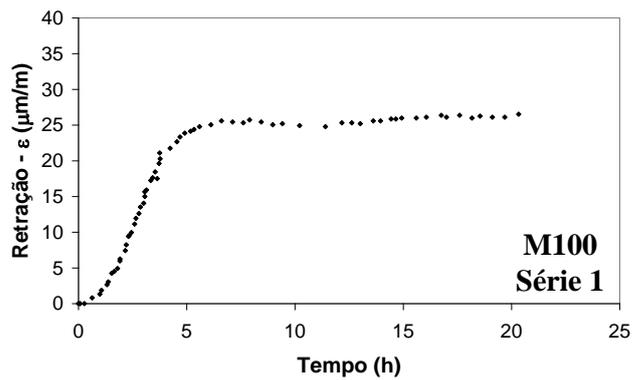
---

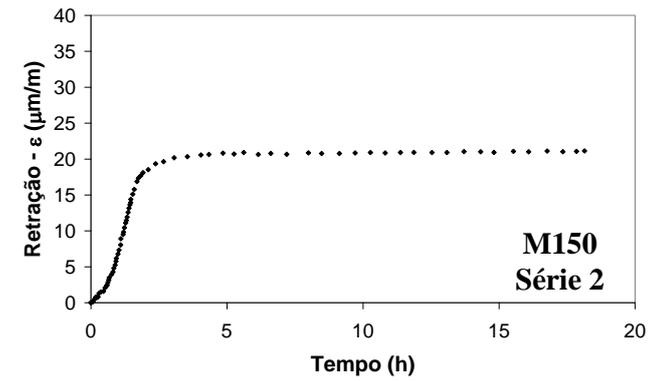
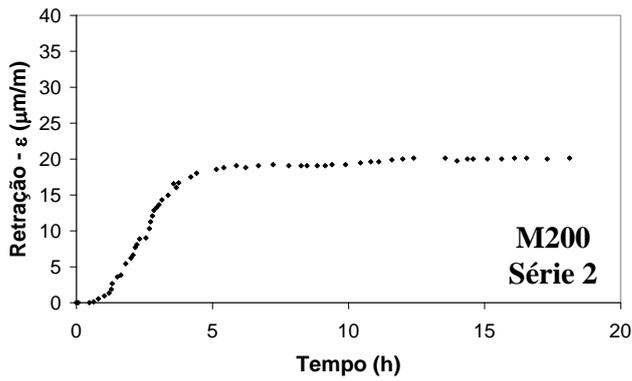
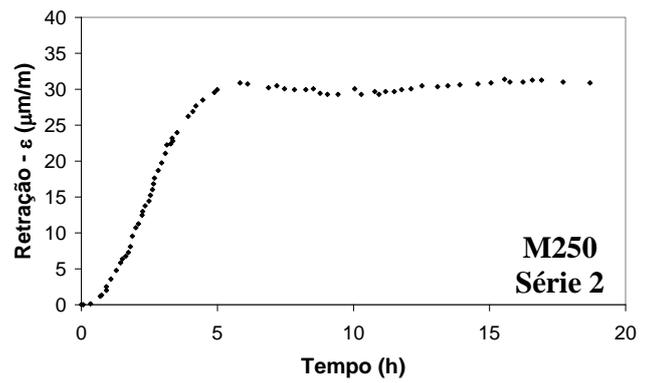
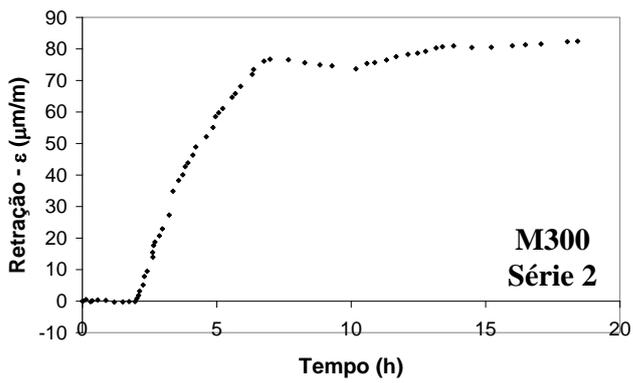
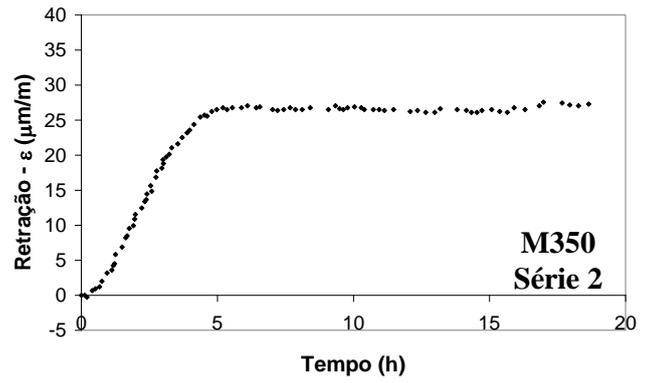
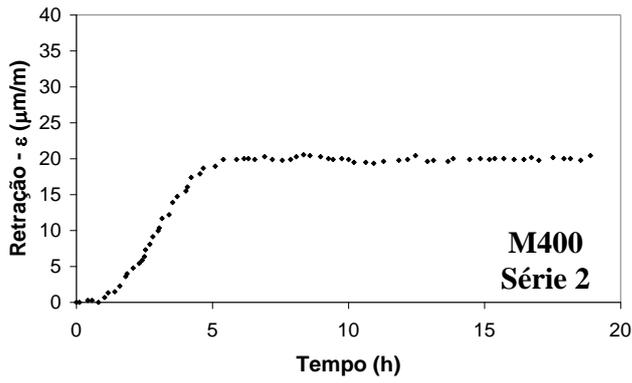
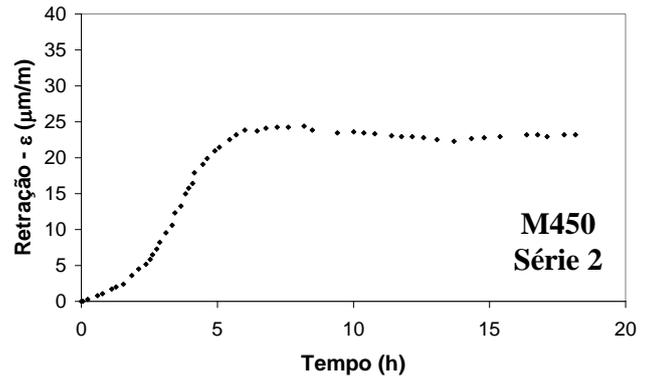
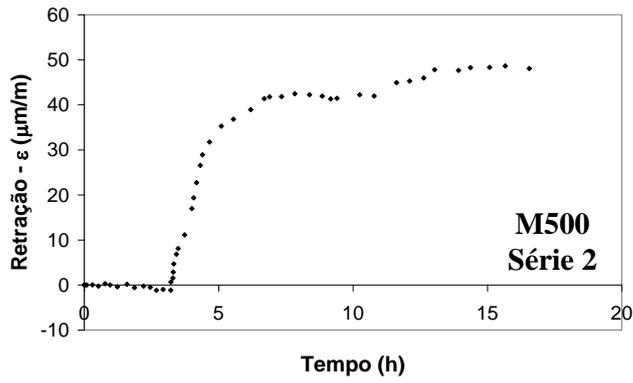
## **ANEXO 6 – Deformação por retração plástica dos concretos**

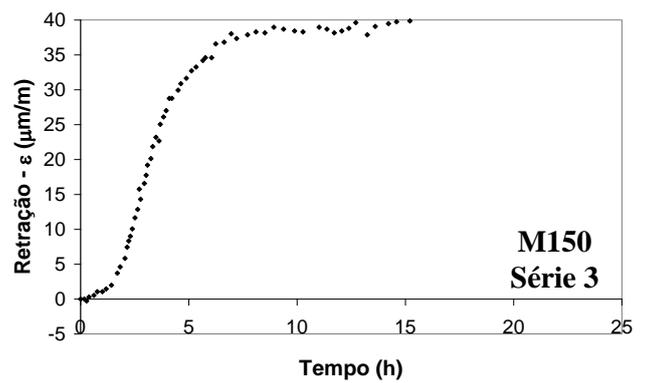
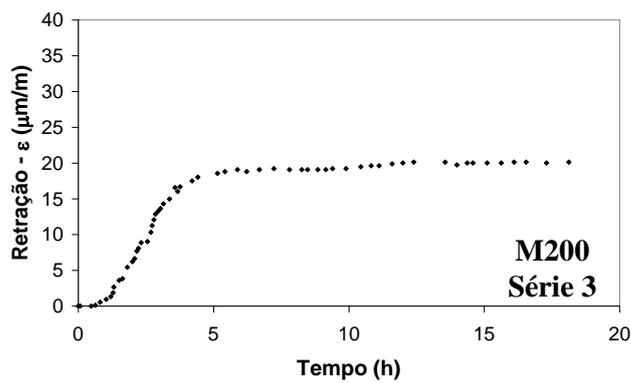
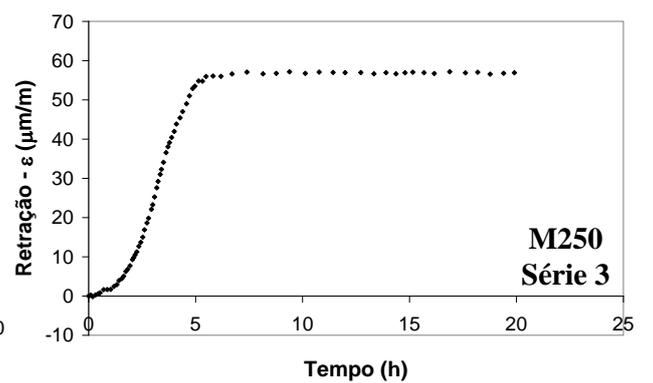
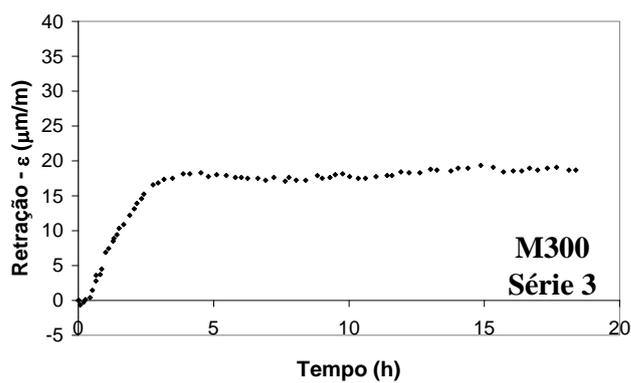
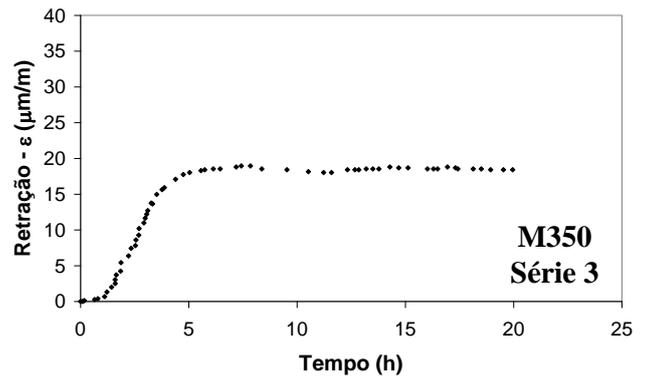
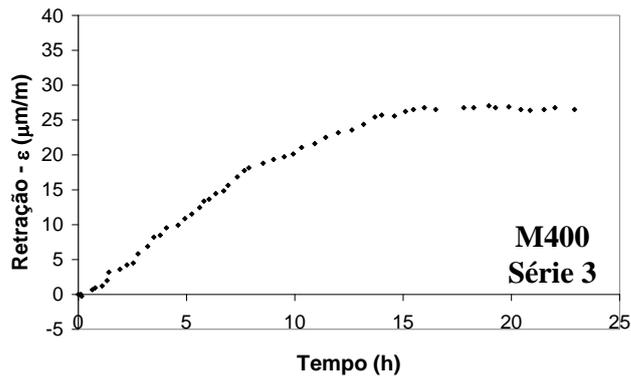
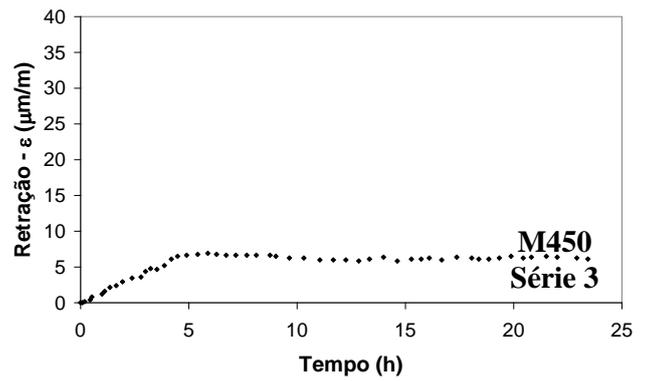
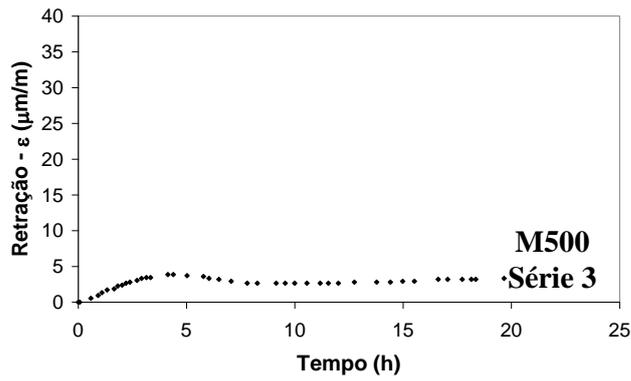
---

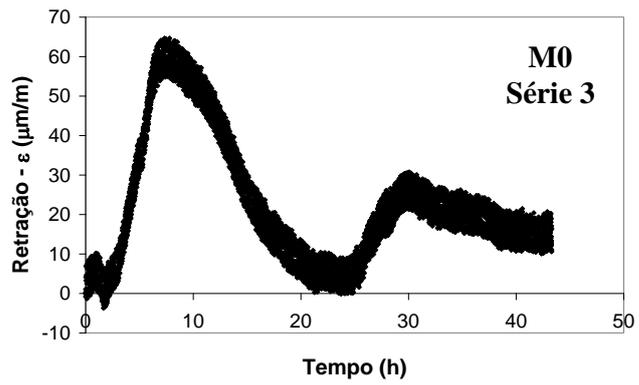
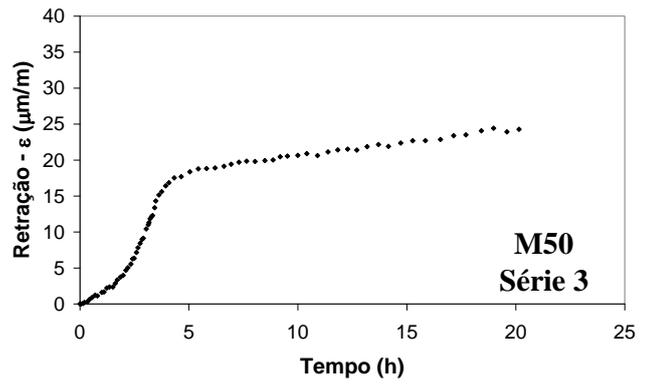
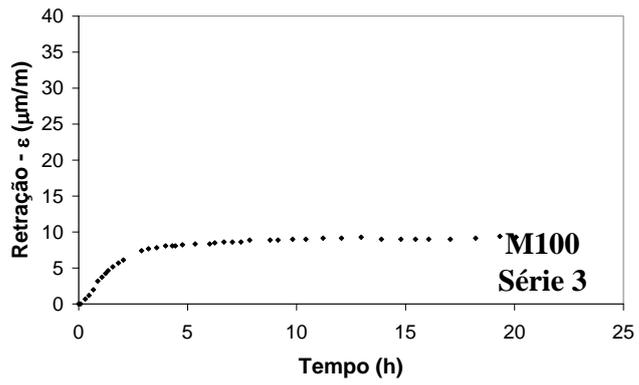
As figuras abaixo referem-se a deformação por retração plástica dos concretos das séries 1, 2 e 3. O eixo das abscissas refere-se ao tempo, em h, a partir do início da pega.









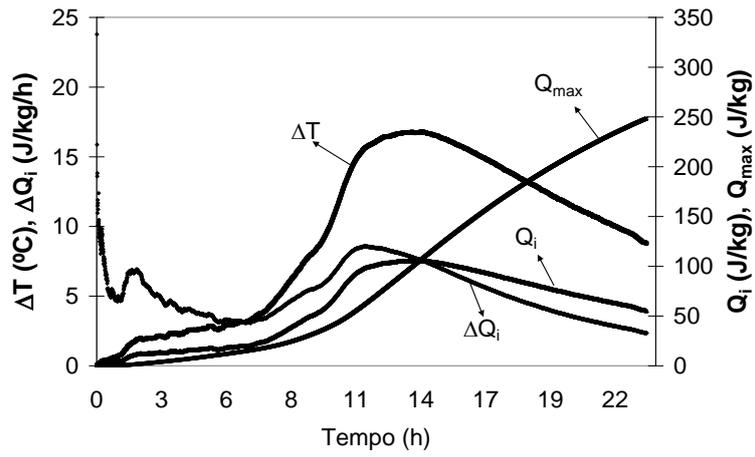


---

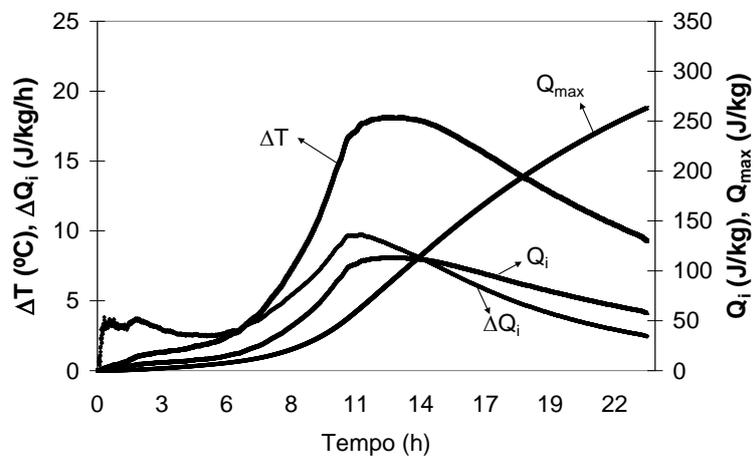
## **ANEXO 7 – Parâmetros do ensaio de calorimetria dos concretos**

---

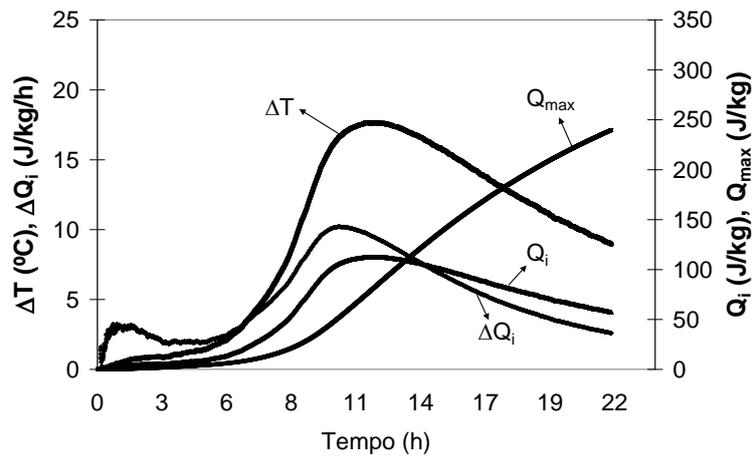
As figuras abaixo se referem aos parâmetros obtidos do ensaio de calorimetria semi-adiabática dos concretos das séries 1, 2 e 3.



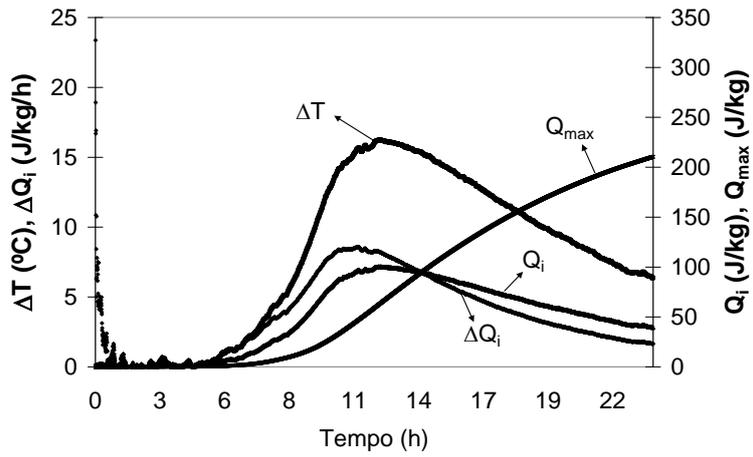
M500 – Série 1



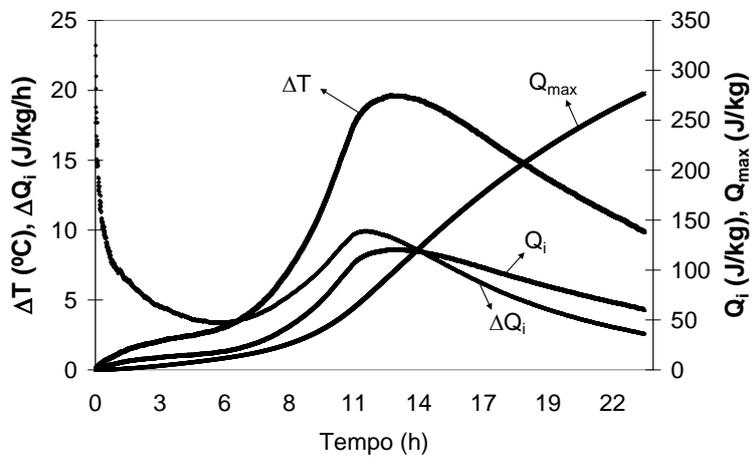
M450 – Série 1



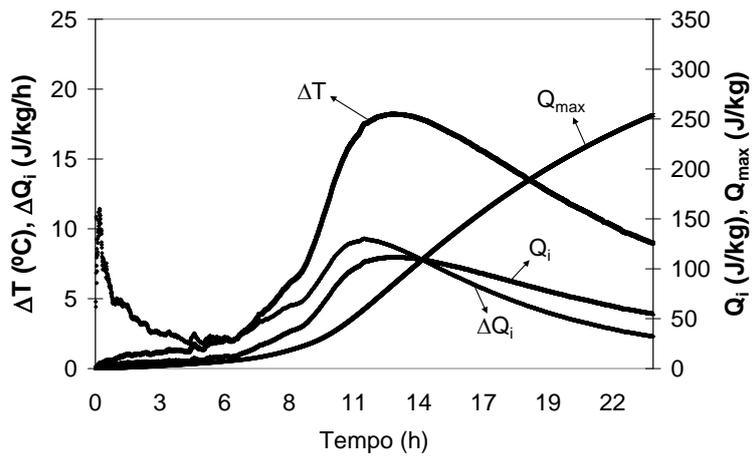
M400 – Série 1



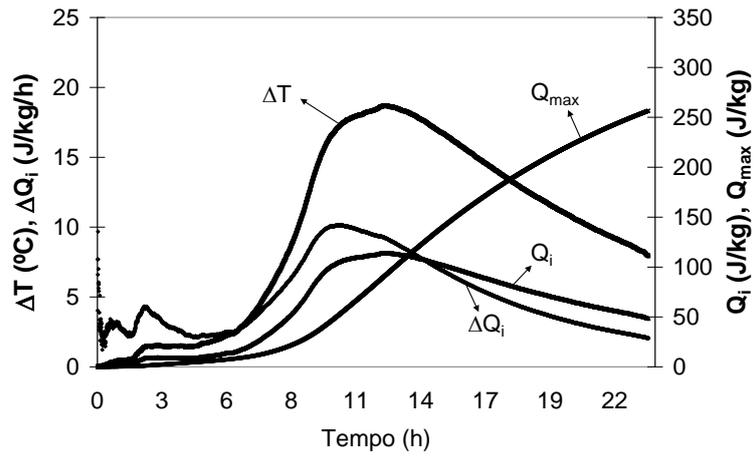
M350 – Série 1



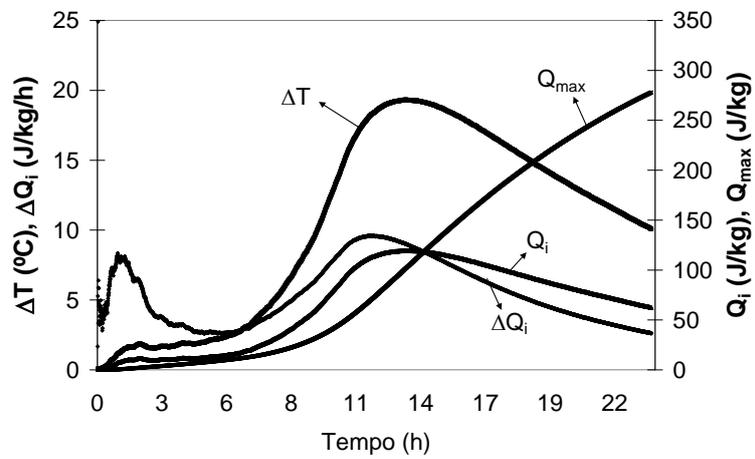
M300 – Série 1



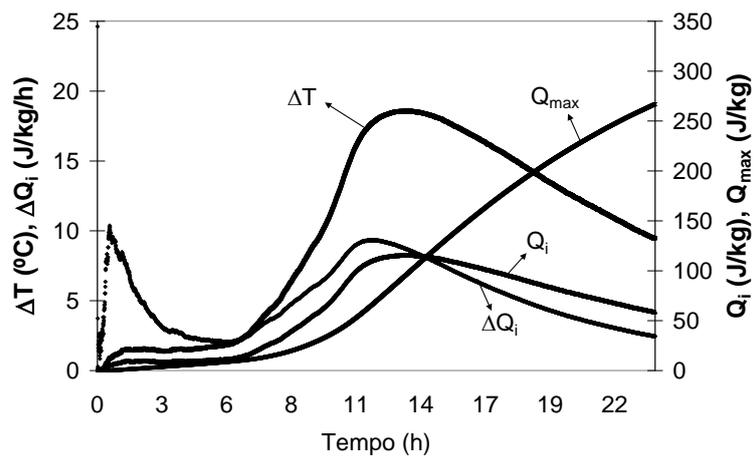
M250 – Série 1



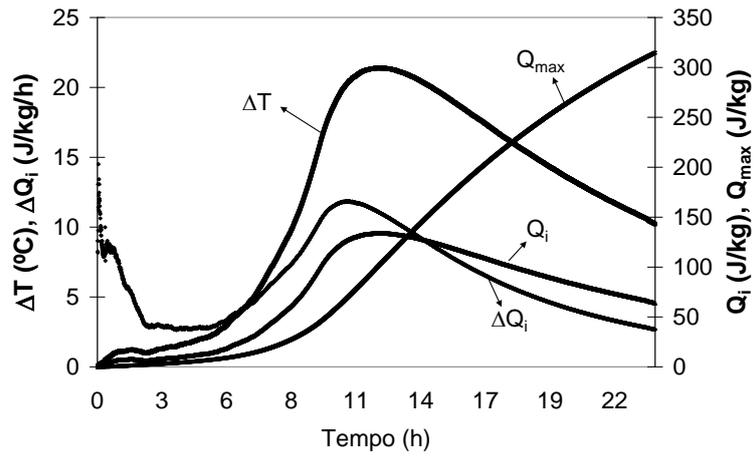
M200 – Série 1



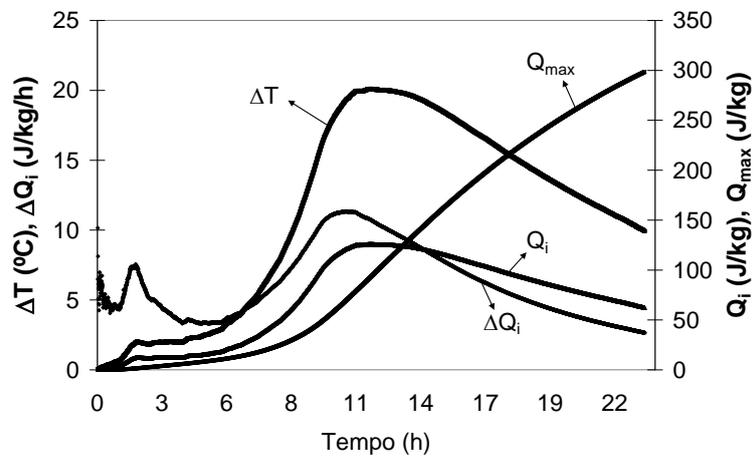
M150 – Série 1



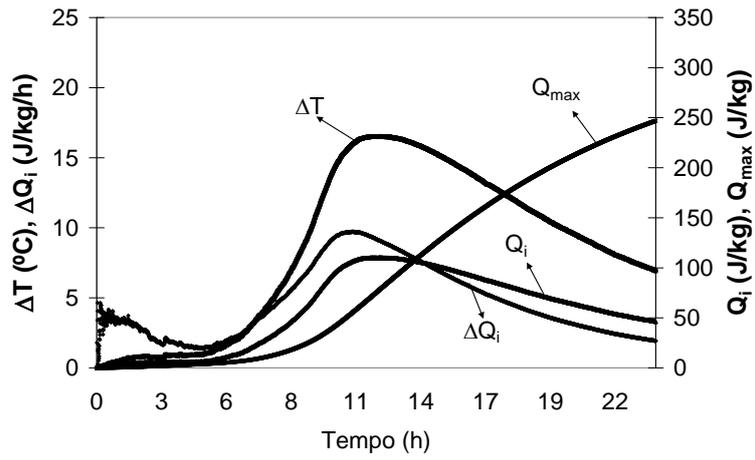
M100 – Série 1



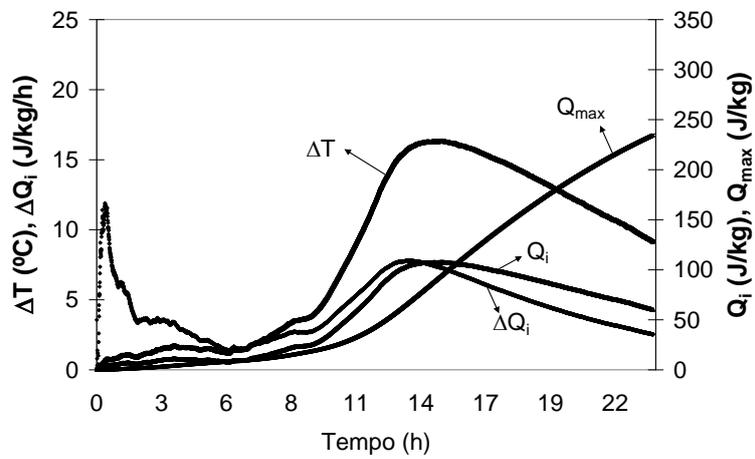
M50 – Série 1



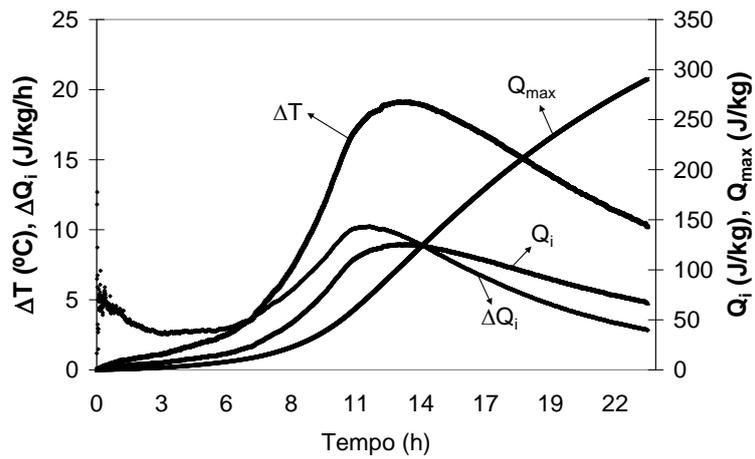
M0 – Série 1



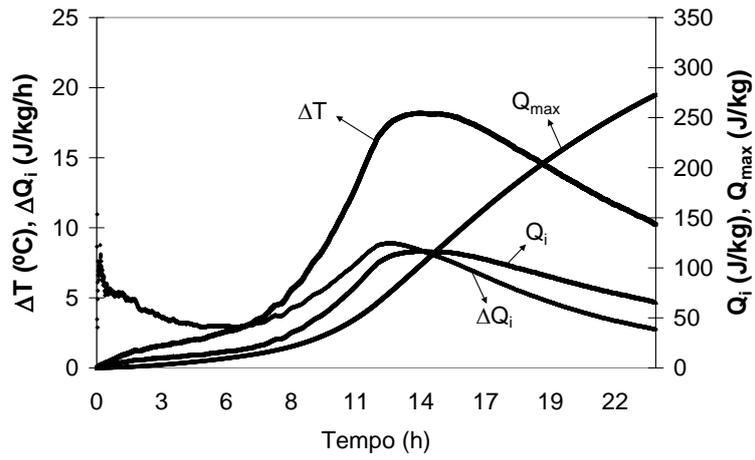
M500 – Série 2



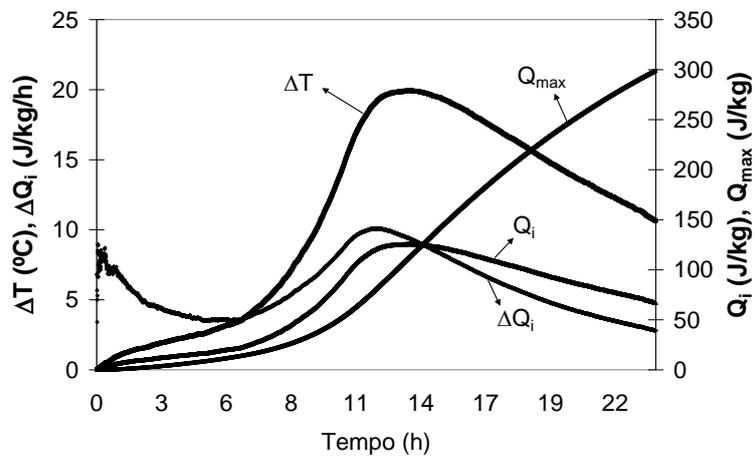
M450 – Série 2



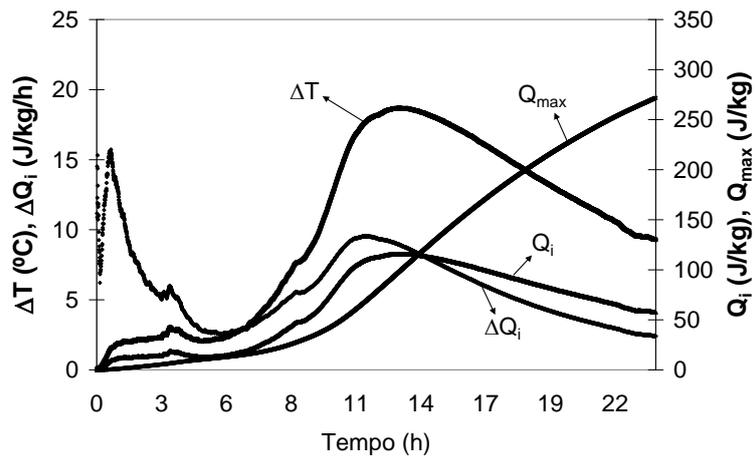
M400 – Série 2



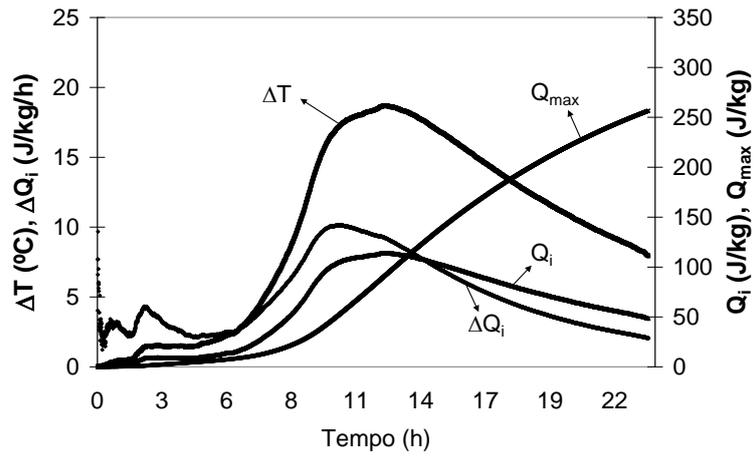
M350 – Série 2



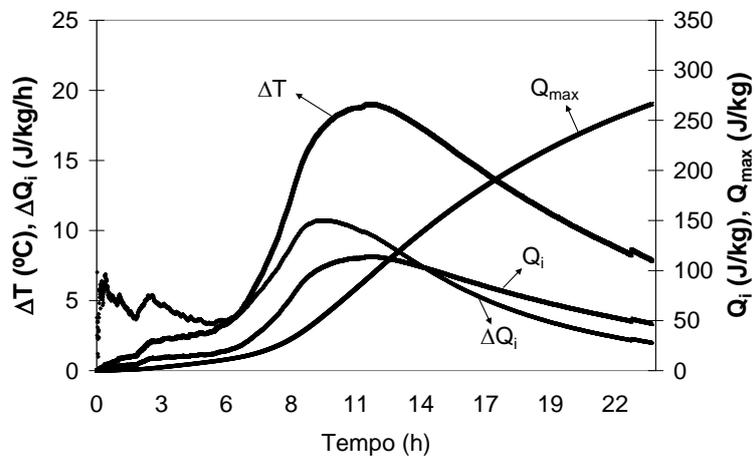
M300 – Série 2



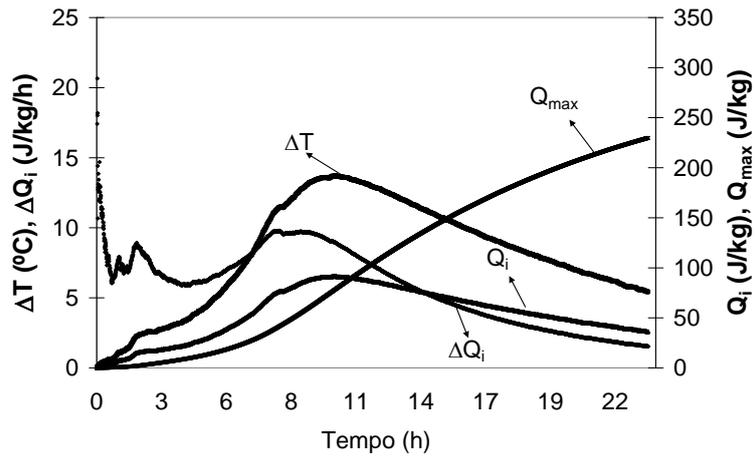
M250 – Série 2



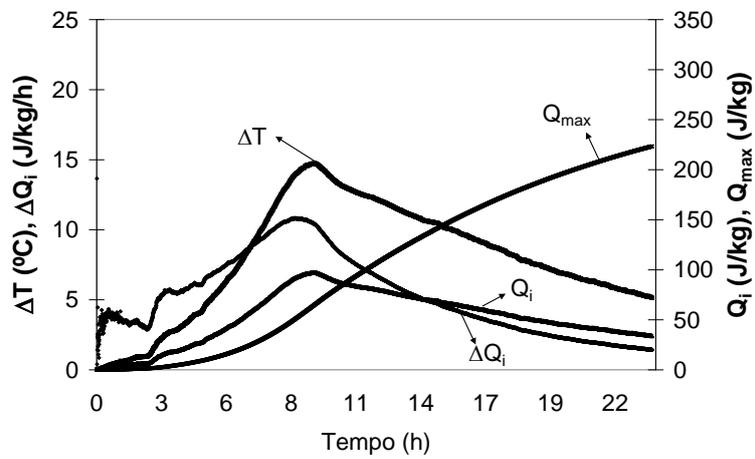
M200 – Série 2



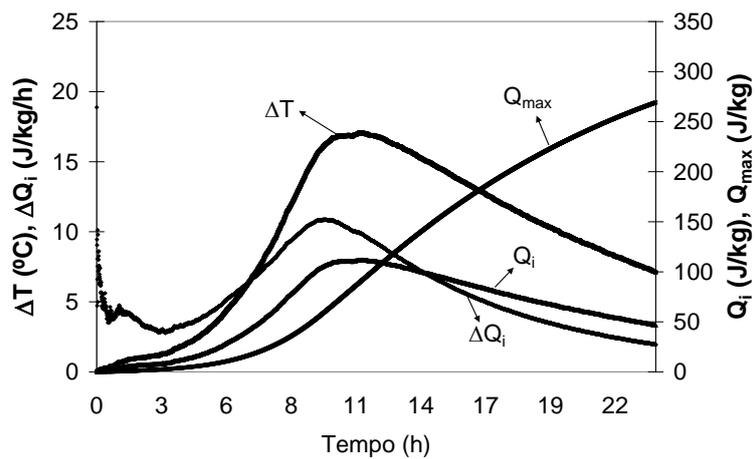
M150 – Série 2



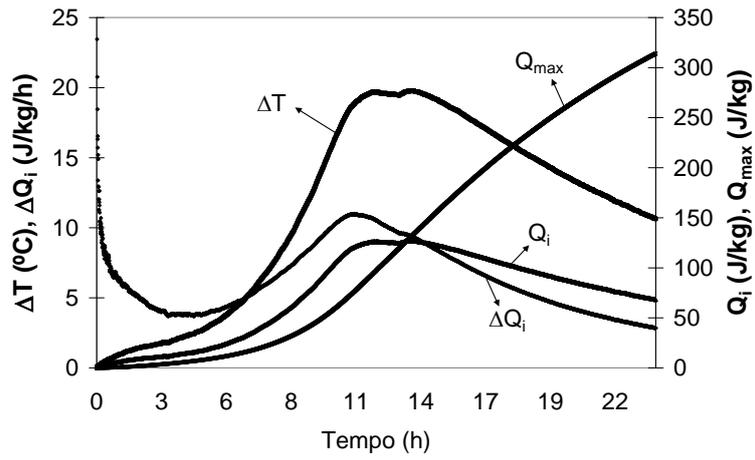
M500 – Série 3



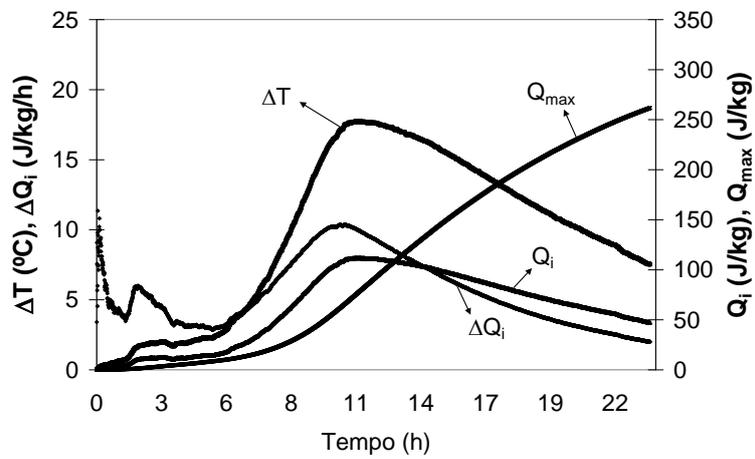
M450 – Série 3



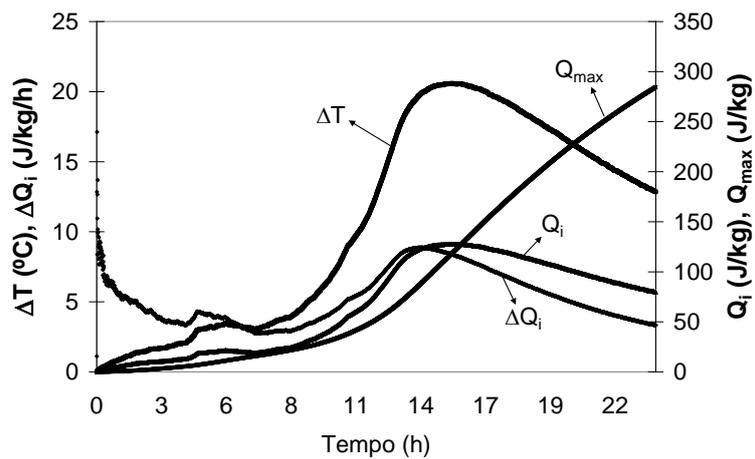
M400 – Série 3



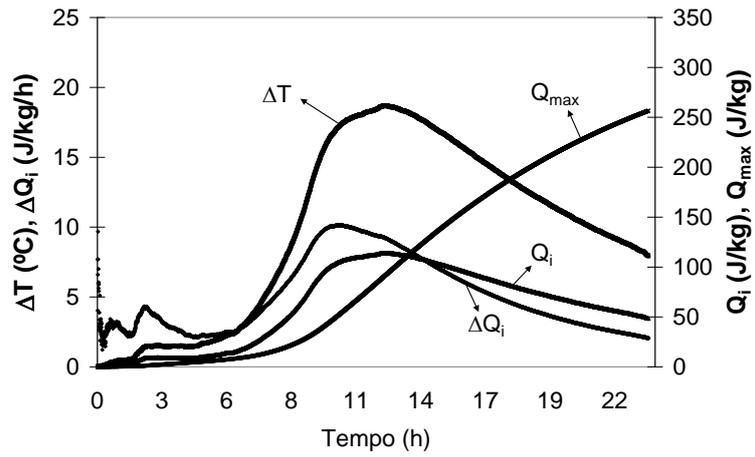
M350 – Série 3



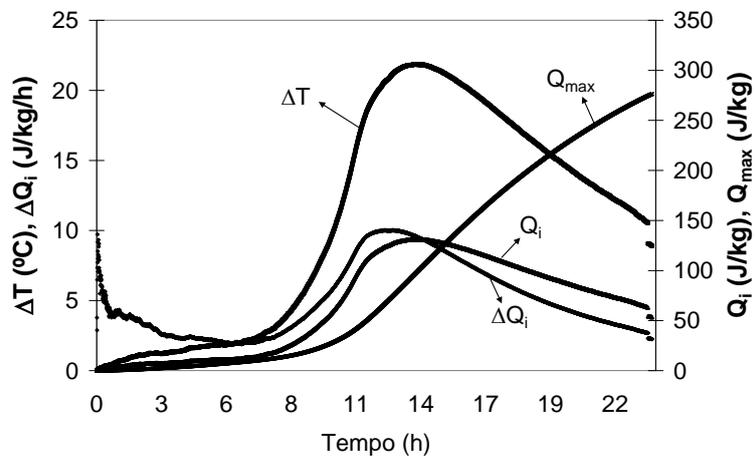
M300 – Série 3



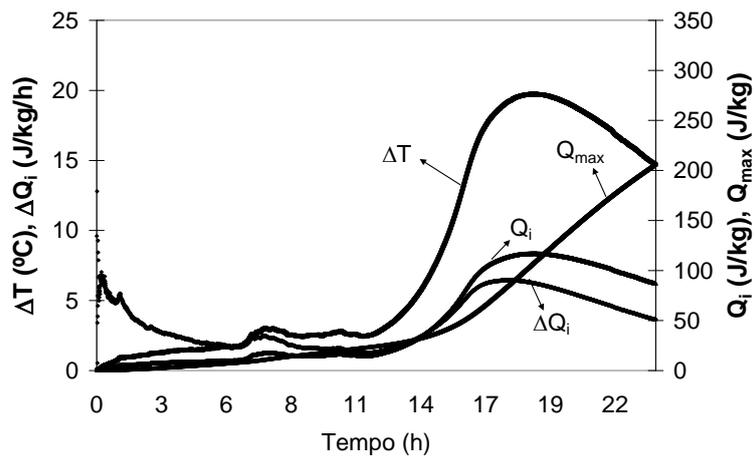
M250 – Série 3



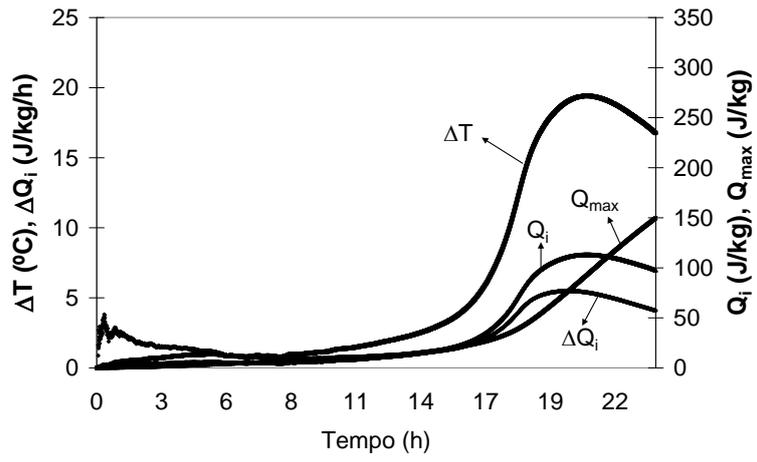
M200 – Série 3



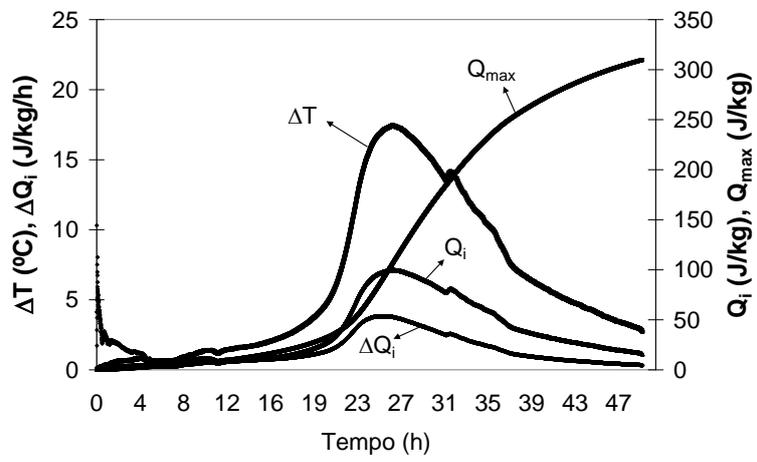
M150 – Série 3



M100 – Série 3



M50 – Série 3



M0 – Série 3

---

## **ANEXO 8 – Perda de água por evaporação dos concretos**

---

As figuras abaixo se referem à perda de água por evaporação dos concretos ao longo do tempo de exposição das séries 1, 2 e 3.

