

**Dissertação**

**Aline Ferreira de Souza**

**2007**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE ADITIVO ESTABILIZADOR DE  
HIDRATAÇÃO DO CIMENTO EM ÁGUA DE LAVAGEM DOS  
CAMINHÕES-BETONEIRA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Dissertação 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 MESTRE em Engenharia Civil.

**Aline Ferreira de Souza**

Florianópolis, setembro de 2007.

**“OTIMIZAÇÃO DO USO DE ADITIVO ESTABILIZADOR DE  
HIDRATAÇÃO DO CIMENTO EM ÁGUA DE LAVAGEM DOS  
CAMINHÕES-BETONEIRA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO”**

**ALINE FERREIRA DE SOUZA**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

---

Prof. Dr. Glicério Trichês - Coordenador do PPGEC

---

Prof. Dr. Wellington Longuini Repette – Orientador/Moderador

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo – USP/SP

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. – ECV/UFSC

---

Prof. Dr. Saulo Güths – EMC/UFSC

*No decorrer desta longa trajetória são muitos os sentimentos que convivem conosco. Primeiro é o desconhecido, tudo é novo, o ambiente, as pessoas, a alimentação, os hábitos, as roupas, o lar, a família... Depois vem a determinação e a luta para conseguir se manter no lugar em que desejamos... Há também a longa distância de casa, família e namorado; com isso surgem sentimentos de nostalgia, saudade e insegurança. Mas para amenizar isso, surge a doce presença de amigos que nada mais são do que a nossa família em uma cidade em que tudo é desconhecido e, que um simples almoço é um acontecimento para afastar e amenizar a saudade da família e da terra natal. Essas pessoas cruzam nossos caminhos para nos fazer nada mais do que o bem, e conseguem. Então vem o cotidiano no laboratório, muitas vezes nada fácil, dando-nos por isso a certeza de que é do que realmente gostamos e queremos fazer na vida. Por simplesmente tudo isso, agradeço e dedico este trabalho com muito amor à pessoa responsável por esta realização na minha vida. Nunca conseguirei retribuir tanto carinho e dedicação. Esteve realmente todos os dias desta longa jornada ao meu lado, mesmo estando há milhares de quilômetros de distância: minha mãe.*

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Lucíola, ser humano admirável. Exala sabedoria e bondade. Pessoa que tento seguir, mas não consigo chegar aos pés. Meu porto seguro, conselheira e maior incentivadora. Sou abençoada por ser sua filha.

Aos meus avós Salvador e Margarida, por não terem poupado amor durante grande parte da minha criação, pela dedicação e pelas sagradas ligações aos domingos. Aos meus irmãos Breno e Liane, que vibram com minhas vitórias e apesar de crescidos sempre serão, para mim, pequeninos. Ao meu noivo Laurence, por ter resistido ao tempo e à distância, permanecendo ao meu lado nos momentos fáceis e difíceis. Ao meu “PAIdrasto” Lindolfo, pelo carinho e consideração que sempre teve por mim.

Ao professor Wellington Repette, pela receptividade com que me recebeu quando cheguei em Florianópolis. Obrigada pelas conversas, cafés e almoços, o que contribuiu para um relacionamento mais próximo e uma amizade profunda. Obrigada pela orientação e conhecimentos compartilhados.

Ao professor Saulo Güths, exemplo de dedicação profissional, sempre à disposição e de bom humor. Obrigada pela fundamental contribuição nesta pesquisa, através dos conhecimentos compartilhados, do tempo dedicado aos esclarecimentos das minhas dúvidas, do solucionamento de vários problemas, pelo espaço concedido para o desenvolvimento de parte dos experimentos e pelo interesse no meu trabalho.

Ao professor Luiz Roberto Prudêncio, pelos ensinamentos, interesse e contribuição nesta pesquisa. Sua colaboração, idéias e comentários foram indispensáveis para o engrandecimento deste trabalho.

Ao professor Paulo Sérgio, pelo incentivo para que eu ingressasse no mestrado. Obrigada pela força, confiança e amizade. Seu apoio foi um divisor de águas na minha vida.

À Gabriela Gonçalves de Sousa, exemplo de pessoa, obrigada pela preciosa amizade iniciada desde o início do mestrado, pelos desabafos e pelas conversas intermináveis. Serei eternamente grata pela fundamental ajuda no laboratório, ensinamentos, disponibilidade em todos os momentos, boa vontade e interesse neste trabalho.

Aos bolsistas Tarcísio e Wilson, pela preciosa ajuda nas concretagens, interesse nos resultados dos ensaios, pela força, pelas palavras de estímulo e pela amizade que se desenvolveu ao longo dos experimentos. Desejo um futuro profissional brilhante a vocês, o que não vai ser difícil diante do grande potencial que possuem.

À Ana Luisa, por amenizar a saudade que eu sentia de casa e ter sido minha família em Florianópolis. Obrigada pela companhia, bom humor, cuidado, atenção, interesse no meu trabalho e principalmente pelo carinho que sempre tiveste comigo. Estarás sempre presente nas doces lembranças.

Ao Nelson, amigo que iniciou esta pesquisa ao meu lado, etapa repleta de incertezas e descobertas. Compartilhamos muitas dúvidas e progredimos juntos. A experiência inicial ao teu lado foi muito importante para o meu amadurecimento.

Ao tio Thales, tia Gabriela, Luana, Rafael, Daniel e Vinícius. Família que me acolheu em Florianópolis. Apesar do curto período de tempo, foi o suficiente para ser inesquecível o carinho, a acolhida e a generosidade.

À Adelana, grande amiga, mesmo distante fisicamente sempre que possível amenizava a saudade com ligações, estando sempre presente na minha vida. À Mary, Shirley, Carol, Ingrid e Geisia velhas e eternas amigas. À Vanessa, Talita, Zaira, Jog e Cissa amigas que vou levar comigo na memória para onde quer que eu vá.

Às empresas que doaram os materiais para a realização desta pesquisa. À Engemix, através do Eng. Joélcio Sousa, que cedeu gentilmente os agregados empregados na produção dos concretos, sempre disposto para atender qualquer pedido. À Votorantim Cimentos, na pessoa do Eng. Daniel Baldissera, pelo fornecimento do cimento. À Grace Brasil Ltda., em especial do Eng. Humberto Benini, pela doação dos aditivos. Sem a colaboração de vocês tudo seria muito mais difícil. Muito obrigada.

Aos funcionários Luiz Henrique, Roque e Renato do LMCC. Obrigada pelo suporte e contribuição para a realização dos ensaios desta pesquisa.

Ao LMPT, pelo espaço gentilmente cedido para que eu realizasse parte dos ensaios desta pesquisa.

Ao GTec, pelo espaço disponível para realização da pesquisa e pelos equipamentos cedidos para a execução da parte experimental. Agradeço também a colaboração direta e indireta de todos: Alexandre, Daniel, Denis, Fábio, Gabriela, Giovanna, João, Juliana, Nelson, Luis Antônio, Regina, Silvia, Talita, Tarcísio, Tiago, Washington, Wilson e Zaira.

Ao professor Narbal, sempre disposto a ajudar, através do empréstimo de equipamentos ou disponibilizando as instalações do LEE. Obrigada pela boa vontade em todos os momentos que precisei e pela sempre valiosa ajuda. Também ao Fernando e Davis do LABEEE, pelo empréstimo de equipamentos, disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas e sugestões. Agradeço também ao GIEM, especialmente ao Gustavo sempre disposto a ajudar.

Obrigada a Florianópolis, cidade que me acolheu por 2 anos, onde pude conhecer um pouco de sua cultura e belezas naturais, experiência muito enriquecedora. E à minha, mais do que nunca, amada cidade Belém, meu doce lar, em que a composição de Edyr Proença e Adalcinda Camarão consegue descrever o meu sentimento por ela: “Belém minha terra, minha casa, meu chão/ Meu sol de janeiro a janeiro a luar/ Me beija, me abraça que quero matar/ A doída saudade que quer me acabar/ Sem círio da virgem, sem cheiro cheiroso/ Sem a "chuva das duas" que não pode faltar/ Cochilo saudades na noite abanando/ Teu leque de estrelas, Belém do Pará!”.

Acima de tudo e de todos agradeço a Deus, que em sua onipresença regeu minha vida, dando-me amparo e equilíbrio nos momentos, que não foram poucos, em que mais precisei. Minha eterna gratidão.

*“São fúteis e cheias de erros  
as ciências que não nasceram da experimentação,  
mãe de todo conhecimento.”*

*Leonardo da Vinci*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xviii
RESUMO.....	xix
ABSTRACT .....	xx
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Importância .....	1
1.2 Justificativa .....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Estrutura da dissertação .....	7
<b>2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....</b>	<b>8</b>
2.1 Mecanismos de hidratação do cimento Portland.....	10
2.2 Fatores determinantes na cinética da hidratação .....	18
2.3 Aspecto físico da hidratação: pega .....	19
2.3.1 Descrição do fenômeno.....	19
2.3.2 Medição dos tempos de pega.....	24
<b>3 ASPECTOS GERAIS DOS ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA E ESTABILIZADORES DE HIDRATAÇÃO.....</b>	<b>27</b>
3.1 Aditivos redutores de água .....	27
3.1.1 Composição química .....	27
3.1.2 Aplicações.....	29
3.1.3 Mecanismo da ação defloculante .....	30
3.1.4 Efeitos .....	31
3.2 Aditivos estabilizadores de hidratação .....	33
3.2.1 Mecanismos de ação retardante .....	33
3.2.2 Efeitos .....	34
3.2.2.1 Águas de lavagem com AEH.....	34
3.2.2.2 Águas de lavagem sem AEH .....	35
3.2.3 Aplicações.....	36
3.2.3.1 Concreto compactado com rolo .....	36

3.2.3.2	Concreto projetado via úmida.....	36
3.2.3.3	Estabilização de concretos retornados .....	37
3.2.3.4	Concretagens a longas distâncias.....	37
<b>4</b>	<b>MÉTODOS CALORIMÉTRICOS .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Calorimetria semi-adiabática .....</b>	<b>38</b>
4.1.1	<i>Cálculo da quantidade de calor .....</i>	<i>39</i>
4.1.2	<i>Calibração.....</i>	<i>39</i>
4.1.3	<i>Possível fonte de erro .....</i>	<i>41</i>
<b>4.2</b>	<b>Calorimetria isotérmica .....</b>	<b>41</b>
4.2.1	<i>Calibração.....</i>	<i>43</i>
4.2.2	<i>Possíveis fontes de erro .....</i>	<i>43</i>
<b>4.3</b>	<b>Vantagens e desvantagens dos métodos .....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>Parâmetros fixos .....</b>	<b>45</b>
5.1.1	<i>Proporcionamento das misturas.....</i>	<i>45</i>
5.1.1.1	<i>Água de lavagem .....</i>	<i>45</i>
5.1.1.2	<i>Concreto.....</i>	<i>46</i>
5.1.2	<i>Porcentagem da água de lavagem .....</i>	<i>46</i>
5.1.3	<i>Intervalo de adição do AEH.....</i>	<i>47</i>
5.1.4	<i>Tipo de cimento .....</i>	<i>47</i>
5.1.5	<i>Período de estabilização .....</i>	<i>47</i>
<b>5.2</b>	<b>Variável independente.....</b>	<b>47</b>
5.2.1	<i>Teor de AEH.....</i>	<i>47</i>
<b>5.3</b>	<b>Características dos materiais utilizados .....</b>	<b>48</b>
5.3.1	<i>Cimento.....</i>	<i>48</i>
5.3.2	<i>Agregados .....</i>	<i>50</i>
5.3.3	<i>Aditivos .....</i>	<i>52</i>
<b>5.4</b>	<b>Estudo em água de lavagem.....</b>	<b>53</b>
5.4.1	<i>Calorimetria semi-adiabática.....</i>	<i>53</i>
5.4.1.1	<i>Medição da evolução de temperatura .....</i>	<i>53</i>
5.4.1.2	<i>Calibração do calorímetro semi-adiabático .....</i>	<i>55</i>
5.4.2	<i>Calorimetria isotérmica.....</i>	<i>55</i>
5.4.2.1	<i>Medição da taxa de energia .....</i>	<i>56</i>

5.4.2.2	Calibração do calorímetro isotérmico e tratamento dos dados .....	57
<b>5.4.3</b>	<b><i>Produção das águas de lavagem</i></b> .....	<b>59</b>
<b>5.4.4</b>	<b><i>Verificações dos ensaios calorimétricos</i></b> .....	<b>60</b>
<b>5.5</b>	<b>Estudo em concreto</b> .....	<b>61</b>
<b>5.5.1</b>	<b><i>Produção dos concretos</i></b> .....	<b>61</b>
<b>5.5.2</b>	<b><i>Ensaios</i></b> .....	<b>64</b>
5.5.2.1	Abatimento .....	64
5.5.2.2	Perda de Abatimento .....	64
5.5.2.3	Teor de ar incorporado .....	65
5.5.2.4	Pega .....	65
5.5.2.5	Resistência à compressão .....	68
5.5.2.6	Resumo dos ensaios em concreto .....	70
<b>6</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>71</b>
<b>6.1</b>	<b>Ensaio em águas de lavagem</b> .....	<b>71</b>
<b>6.1.1</b>	<b><i>Calorimetria semi-adiabática</i></b> .....	<b>71</b>
6.1.1.1	Verificações preliminares .....	71
6.1.1.2	Verificação da variabilidade do ensaio semi-adiabático .....	78
6.1.1.3	Determinação dos tempos de estabilização .....	79
<b>6.1.2</b>	<b><i>Calorimetria isotérmica</i></b> .....	<b>82</b>
6.1.2.1	Verificações da variabilidade do ensaio isotérmico .....	84
6.1.2.2	Determinação dos tempos de estabilização .....	85
<b>6.1.3</b>	<b><i>Comparação entre calorimetria isotérmica e semi-adiabática</i></b> .....	<b>88</b>
<b>6.2</b>	<b>Ensaio em concreto</b> .....	<b>91</b>
<b>6.2.1</b>	<b><i>Análise técnica</i></b> .....	<b>91</b>
6.2.1.1	Abatimento .....	91
6.2.1.2	Perda de abatimento .....	94
6.2.1.3	Pega .....	99
6.2.1.4	Teor de ar incorporado .....	110
6.2.1.5	Resistência à compressão .....	112
<b>6.2.2</b>	<b><i>Análise econômica</i></b> .....	<b>116</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>118</b>
<b>7.1</b>	<b>Águas de Lavagem</b> .....	<b>118</b>
<b>7.2</b>	<b>Concretos</b> .....	<b>121</b>

<b>7.3 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>125</b>
<b>7.4 Comentários finais .....</b>	<b>126</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>128</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE 2 .....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE 3 .....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE 4 .....</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE 5 .....</b>	<b>141</b>
<b>APÊNDICE 6 .....</b>	<b>142</b>
<b>APÊNDICE 7 .....</b>	<b>150</b>
<b>APÊNDICE 8 .....</b>	<b>160</b>
<b>APÊNDICE 9 .....</b>	<b>161</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Decantador com resíduo proveniente da lavagem dos caminhões-betoneira em central de concreto. (b) Armazenamento do resíduo removido do decantador na caixa de lastro, para a posterior destinação final do rejeito.....	3
Figura 2 – Representação do grão de cimento seccionado (BISHOP et al., 2003). .....	9
Figura 3 – (a) Desenvolvimento da microestrutura do cimento Portland, adaptado por SCRIVENER (BISHOP et al., 2003). (b) Representação da curva da taxa de liberação de calor do cimento Portland, dividida em 5 etapas (adaptado de ZAMPIERI, 1989).....	11
Figura 4 – Representação das camadas de hidratação em função do tempo, para os diferentes tamanhos de grãos (SCRIVENER, 2004). .....	16
Figura 5 – Etringita secundária localizada no poro de uma pasta de cimento Portland ( <a href="http://www.ctu.edu.vn/colleges/tech/bomon/ktdx">http://www.ctu.edu.vn/colleges/tech/bomon/ktdx</a> ) .....	17
Figura 6 – Detalhe do C-S-H interno na microestrutura de uma pasta de cimento hidratada, relação a/c=0,3 e 100 dias de idade (DIAMOND, 2004). .....	18
Figura 7 – Estrutura floculada das partículas da pasta de cimento (AÏTCIN, 2000). .....	20
Figura 8 – Comparação dos tempos de início de pega entre pastas de relação a/c=0,4 e a/c=0,6.23	
Figura 9 – Influência da temperatura nos tempos de pega de concretos (ASTM C 403).....	24
Figura 10 – Aparelho de Vicat. ....	25
Figura 11 – Ensaio de resistência à penetração em argamassa. (a) Detalhe do anel dinanométrico do penetrômetro. (b) Detalhe da agulha de seção circular do penetrômetro imersa na argamassa. ....	26
Figura 12 – Localização dos tempos de pega na curva de evolução de calor. ....	26
Figura 13 – Unidade estrutural de uma molécula de lignosulfonato. ....	28
Figura 14 – Unidade de microgel do lignosulfonato. ....	29
Figura 15 – Ação do aditivo redutor de água sobre a floculação e defloculação das partículas de cimento (Adaptado de NUNES, 2001). .....	30
Figura 16 – Transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial (GÜTHS, 2006). .....	41
Figura 17 – Esquema do calorímetro isotérmico. (a) Cubos vazados de poliestireno expandido (EPS) onde são acomodadas as amostras e, transdutores não fixados sobre o trocador de calor. (b) Transdutor fixado sobre o trocador de calor, dentro do calorímetro isotérmico. (c) Dois cubos vazados de EPS sobre o trocador de calor, acomodados no interior do calorímetro isotérmico aberto. ....	42

Figura 18 – Dispositivo de calibração “a transdutor auxiliar” (GÜTHS et al, 1998).....	43
Figura 19 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos e graúdo. ....	52
Figura 20 – (a) Dimensões externas do calorímetro em fase de execução. (b) Dimensões internas do calorímetro concluído. ....	54
Figura 21 – Tampa do calorímetro semi-adiabático. (a) Dimensões externas. (b) Dimensões internas. ....	54
Figura 22 – (a) Representação do sistema de isolamento térmico para medição do aumento de temperatura. (b) Sistema de aquisição de dados. ....	55
Figura 23 – Vista frontal do aparato experimental. (a) Calorímetro isotérmico aberto com dois cubos vazados de EPS em seu interior e banho termostático à direita. (b) Calorímetro isotérmico fechado e banho termostático à direita. ....	56
Figura 24 – (a) Dimensões externas do cubo vazado de EPS. (b) Dimensões internas do cubo vazado de EPS. ....	57
Figura 25 – Detalhe interior do calorímetro isotérmico. (a) Posicionamento do transdutor sobre o trocador de calor aderido por uma fina camada de gel. (b) Preparo da amostra sobre o transdutor, envolvidos pelo cubo vazado de EPS, com aquisição de dados instantânea. ....	57
Figura 26 – Taxa de calor liberado. (a) Água de lavagem ( $a/c=10$ ). (b) Pasta ( $a/c=0,6$ ). ....	58
Figura 27 – Representação do número de concretos convencionais produzidos. ....	61
Figura 28 – Representação do número de concretos de maior resistência produzidos. ....	61
Figura 29 – (a) Recipiente plástico fechado, onde foram produzidas as águas de lavagem estabilizadas. (b) Recipiente aberto, com água de lavagem estabilizada em seu interior. ....	62
Figura 30 – Concreto em fase de produção na betoneira de eixo inclinado. ....	63
Figura 31 – (a) Peneira com abertura de malha 4,8mm sobre mesa vibratória. (b) Peneiramento do concreto, para a obtenção da argamassa. ....	66
Figura 32 – (a) Moldagem da argamassa no molde. (b) Penetrômetro com anel dinamométrico e agulha de seção circular imersa em argamassa. (c) Corpos-de-prova em câmara úmida, durante o ensaio de resistência à penetração. ....	66
Figura 33 – Argamassa acomodada em recipiente cilíndrico, com termopar imerso na amostra. (b) Dimensões do recipiente cilíndrico. ....	67
Figura 34 – (a) Acomodação dentro do calorímetro do recipiente cilíndrico com argamassa. (b) Dimensões externas do calorímetro semi-adiabático. ....	67
Figura 35 – (a) Moldagem dos corpos-de-prova. (b) Acomodação dos corpos-de-prova em câmara úmida. (c) Acabamento do topo com colher de pedreiro e proteção superficial dos topos com saco plástico e elástico. ....	68

Figura 36 – (a) Fresagem dos topos dos corpos-de-prova. (b) Detalhe do topo do corpo-de-prova fresado. ....	69
Figura 37 – (a) Ensaio de resistência à compressão em prensa Shimadzu. (b) Aspecto do corpo-de-prova rompido à compressão. ....	69
Figura 38 – Evolução de temperatura da água de lavagem e da pasta. ....	72
Figura 39 – Representação de uma amostra de água de lavagem decantada e outra recém-misturada. ....	72
Figura 40 – Evolução de temperatura da água íntegra e succionada. ....	74
Figura 41 – Evolução de temperatura das águas de lavagem em função do tempo de adição do AEH. ....	75
Figura 42 – Verificação da influência do aditivo redutor de água. ....	76
Figura 43 – Verificação da influência da relação a/c no desempenho do AEH. ....	77
Figura 44 – Evolução de temperatura das águas de lavagem estabilizadas, expressas através da temperatura em função do tempo. ....	79
Figura 45 – Evolução de temperatura em função do tempo das águas de lavagem estabilizadas, para os teores de 0% a 0,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c. ....	80
Figura 46 – Evolução de temperatura em função do tempo das águas de lavagem estabilizadas, para os teores de 0,8% a 1,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c. ....	80
Figura 47 – Evolução de temperatura em função do tempo das águas de lavagem estabilizadas, para os teores de 1,8% a 2,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c. ....	81
Figura 48 – Relação entre os tempos de estabilização e os teores de AEH. ....	81
Figura 49 – Taxa de calor em função do tempo da água de lavagem estabilizada com 0% m.c. de AEH. ....	82
Figura 50 – Localização do tempo correspondente ao término de estabilização das reações nas curvas calorimétricas da água de lavagem estabilizada (AEH=0,4% m.c.). ....	83
Figura 51 – Relação entre teor de AEH e taxa máxima de calor com perdas de calor. ....	84
Figura 52 – Curvas calorimétricas das águas de lavagem estabilizadas, expressas através da taxa de calor em função do tempo. ....	85
Figura 53 – Relação entre os tempos de estabilização e os teores de AEH. ....	86
Figura 54 – Tempos de estabilização em função dos teores de AEH entre 0,4% e 1,2% m.c. ....	87
Figura 55 – Tempos de estabilização em função dos teores de AEH entre 1% e 2,2% m.c. ....	88

Figura 56 – Relação entre o teor de AEH e o tempo de estabilização, nos dois métodos calorimétricos. ....	89
Figura 57 – Abatimento inicial dos concretos convencionais. ....	93
Figura 58 – Abatimento inicial dos concretos de maior resistência. ....	94
Figura 59 – Perda de abatimento dos concretos convencionais para uma noite de estabilização. ....	95
Figura 60 - Perda de abatimento dos concretos convencionais para um fim de semana de estabilização. ....	96
Figura 61 – Perda de abatimento dos concretos de maior resistência para uma noite e um fim de semana de estabilização. ....	97
Figura 62 – Tempo de início de pega das argamassas convencionais. ....	100
Figura 63 – Tempo de fim de pega das argamassas convencionais. ....	101
Figura 64 – Tempos de início e fim de pega das argamassas de maior resistência. ....	102
Figura 65 – Intervalo entre o início e fim de pega, localizado na curva de evolução de temperatura das argamassas convencionais com os diferentes teores de AEH, para uma noite de estabilização, em relação à referência. Os tempos de pega apresentados nos gráficos foram medidos através de método de resistência à penetração. ....	106
Figura 66 – Intervalo entre o início e fim de pega, localizado na curva de evolução de temperatura das argamassas convencionais com os diferentes teores de AEH, para um fim de semana de estabilização, em relação à referência. Os tempos de pega apresentados nos gráficos foram medidos através de método de resistência à penetração. ....	107
Figura 67 – Intervalo entre o início e fim de pega, localizado na curva de evolução de temperatura das argamassas de maior resistência com diferentes teores de AEH, em relação à referência. Os tempos de pega apresentados nos gráficos foram medidos através de método de resistência à penetração. ....	108
Figura 68 – Teor de ar incorporado dos concretos convencionais. ....	110
Figura 69 – Teor de ar incorporado dos concretos de maior resistência. ....	111
Figura 70 – Resistência à compressão dos concretos convencionais para uma noite de estabilização. ....	112
Figura 71 – Resistência à compressão dos concretos convencionais para um fim de semana de estabilização. ....	113
Figura 72 – Resistência à compressão dos concretos de alta resistência para uma noite e um fim de semana de estabilização. ....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os requisitos de desempenho dos aditivos redutores de água de acordo com as normas americana e brasileira. ....	27
Tabela 2 – Caracterização física do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante). ....	48
Tabela 3 – Caracterização química do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante). ....	49
Tabela 4 – Caracterização física do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante). ....	49
Tabela 5 – Caracterização química do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante). ....	50
Tabela 6 – Caracterização física dos agregados miúdos. ....	51
Tabela 7 – Caracterização física do agregado graúdo. ....	51
Tabela 8 – Caracterização dos aditivos químicos (Dados fornecidos pelo fabricante). ....	52
Tabela 9 – Verificações realizadas nos ensaios calorimétricos. ....	60
Tabela 10 – Resumos dos ensaios realizados em concreto. ....	70
Tabela 11 – Comparação entre os teores mínimo e de segurança determinados em água de lavagem de $a/c=10$ , para uma noite de estabilização, obtidos através da calorimetria isotérmica e semi-adiabática. ....	90
Tabela 12 – Perda de abatimento em relação ao concreto de referência em uma hora. ....	98
Tabela 13 – Tempos de pega determinados através da resistência à penetração. ....	104
Tabela 14 – Temperaturas medidas no ensaio de evolução de temperatura, correspondentes aos tempos de início e fim de pega. ....	109
Tabela 15 – Resistência à compressão relativa dos diferentes tipos de concreto. ....	115
Tabela 16 – Custo dos concretos. ....	117

## LISTA DE SÍMBOLOS

C = CaO – Cal

S = SiO<sub>2</sub> – Sílica

A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Alumina

F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de ferro

H = H<sub>2</sub>O – Água

M = MgO – Magnésia

$\bar{S}$  = SO<sub>3</sub> – Trióxido de Enxofre

C<sub>3</sub>S = 3CaO.SiO<sub>2</sub> – Silicato tricálcico

C<sub>2</sub>S = 2CaO.SiO<sub>2</sub> – Silicato dicálcico

C<sub>3</sub>A = 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Aluminato tricálcico

C<sub>4</sub>AF = 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Ferro aluminato tetracálcico

CaSO<sub>4</sub> – Anidrita

Ca.SO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O – Sulfato de cálcio di-hidratado ou gesso

Ca.SO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O – Sulfato de cálcio hemi-hidratado

C<sub>6</sub>A $\bar{S}$ <sub>3</sub>H<sub>32</sub> = AFt – Etringita, trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou alto sulfato

C<sub>4</sub>A $\bar{S}$ H<sub>12</sub> = AFm – Monosulfato

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CH = Ca(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido de cálcio

## RESUMO

SOUZA, Aline Ferreira. **Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões-betoneira para produção de concreto.** Florianópolis, 2007. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

A utilização dos serviços de concretagem representa um progresso no setor da construção civil, já que o controle sobre a dosagem e o preparo do concreto é geralmente maior. Contudo, a produção de concreto gera poluentes que podem comprometer o meio ambiente. Uma das principais fontes geradoras de resíduos nas centrais é a lavagem interna do balão dos caminhões-betoneira, operação que desperta a atenção para duas preocupações principais: o alto consumo de água e a agressividade do resíduo gerado. Neste sentido, os aditivos estabilizadores de hidratação do cimento (AEH) destacam-se como um material promissor para a reutilização da água de lavagem, tornando a produção do concreto mais sustentável. O período de estabilização em que o resíduo ficará submetido é função do teor de aditivo dosado, de forma que, ao término do tempo de estabilização desejado, o concreto novo é produzido diretamente no interior do balão, evitando-se o lançamento do material no meio ambiente. O objetivo desta pesquisa é racionalizar o uso do AEH, visando à diminuição do consumo de água e o reaproveitamento do material residual proveniente dos balões dos caminhões-betoneira para a produção de concreto. Assim, foram realizados estudos em águas de lavagem, por meio das técnicas de calorimetria isotérmica e semi-adiabática, para a determinação de teores de AEH que estabilizem a hidratação do cimento por uma noite e um final de semana. Posteriormente, foram investigadas as propriedades de concretos produzidos com águas de lavagem com teores de AEH racionalizados e usuais e, comparados a uma mistura de referência. Os teores de AEH obtidos para a estabilização das águas de lavagem foram consideravelmente menores que a dosagem recomendada pelo fabricante. Em geral, quando o AEH foi empregado em alta dosagem, os concretos apresentaram incremento no abatimento inicial, pequena perda de abatimento e um ligeiro atraso nos tempos de pega. Em geral, a presença das águas de lavagem estabilizadas não prejudicou a resistência à compressão dos concretos.

**Palavras-chave:** Aditivo estabilizador de hidratação; Água de lavagem; Concreto.

## ABSTRACT

SOUZA, Aline Ferreira. **Optimization of the hydration control admixtures use in wash water from ready-mixed concrete truck for concrete production.** Florianópolis, 2007. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

The use of ready-mix concrete represents a progress for the construction sector, normally associated with higher production control and productivity. Nevertheless, the production of concrete generates residues that can compromise the environment. One of the major sources of residues is the wash water produced during cleaning of the concrete truck's drum. Two aspects are of special concern: the high water consumption and aggressiveness of the wash water produced during this operation. In this regard, the use of cement hydration control admixtures (HCA) is a promising alternative for the elimination of the washing water residue. The objective of this research is to make the use of HCA more efficient. Studies have been conducted in wash water using isothermal calorimetry and semi-adiabatic calorimetry, to determine the content of HCA that stabilizes the cement hydration during one night and one weekend (16 hours and 64 hours, respectively). Afterwards, there has been investigation of the concrete properties produced with stabilized wash waters in order to rationalize the HCA usage. The contents of HCA obtained for the water stabilization were considerably smaller than the dosage recommended by the manufacturer. In general, when the HCA has been used in higher dosages, the concretes experienced increments of the initial slump and a small slump loss, while showing a small retardation of setting times. For most cases, the compressive strength of the concretes mixed with stabilized wash water were higher than reference concrete, prepared with tap water.

**Keywords:** Hydration Control Admixture, Wash water, Concrete.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Importância

O Brasil atravessa uma fase de substituição dos processos do concreto preparado em obra, pelo dosado em central, o que representa um progresso para a construção civil, visto que, os serviços oferecidos pelas centrais dosadoras podem proporcionar vantagens como: aumento da velocidade das obras, diminuição das perdas dos materiais constituintes do concreto, qualidade e durabilidade as obras. Contudo, a produção do concreto, em geral, afeta o meio ambiente, pois demanda grande quantidade de recursos naturais, produz poluição sonora, contamina o ar através da emissão de partículas e gera quantidades consideráveis de resíduos.

Para Sealey et al. (2001), Paolini e Khurana (1998) e Chini e Mbwambo (1996), são três as principais fontes geradoras de produtos residuais na central: a lavagem interna do balão do caminhão-betoneira, a lavagem do pátio da central dosadora e a devolução do concreto fresco não utilizado na obra. Através de uma estimativa realizada por Repette (2005), mesmo após o descarregamento, um caminhão com capacidade de 8 m<sup>3</sup> retorna à central com cerca de 100 litros de concreto aderido às paredes e lâminas do misturador, sob o risco de endurecer, implicando em danos ao equipamento. Por isso, é prática comum, pelo menos uma vez ao dia, a lavagem interna do caminhão-betoneira para a remoção do material, operação que demanda de 500 a 900 litros de água por lavagem. Isto desperta a atenção para duas preocupações principais: o alto consumo de água e a destinação do resíduo da lavagem.

Para uma frota estimada em 60 caminhões-betoneira na grande Florianópolis, o emprego do aditivo estabilizador de hidratação do cimento (AEH) pode possibilitar o reaproveitamento de aproximadamente 1 milhão de litros de água de lavagem dos balões na produção mensal de concreto, implicando em ganhos no âmbito econômico, social e ambiental. No entanto, para que a água de lavagem possa ser utilizada como água de mistura para a produção de concretos, deve atender alguns requisitos químicos estabelecidos pela ASTM C 94 (2004), dentre os quais se destaca a concentração de sólidos totais que deve ser de no máximo 50.000 ppm; além disso, os concretos preparados com águas de lavagem devem atender aos limites de tolerância quanto à pega e resistência à compressão, em relação a uma mistura de referência, a qual contém a mesma proporção de materiais e mesmo volume de água potável ou destilada.

Preocupada com o risco de escassez de água doce no mundo, desde 2002 a Organização das Nações Unidas (ONU) alerta os países para este grave problema. Por isso, anunciou o ano de 2003 como o Ano Internacional da Água Doce, quando foram realizados diversos debates em vários países do mundo sobre o assunto. Este quadro de escassez tende a ser agravado se o nível de poluição continuar progredindo no ritmo atual. Esta preocupação é compreensível, visto que, apesar da grande quantidade de água no planeta, menos de 3% é água potável, dos quais mais de 90% estão congeladas.

Trazendo esta realidade para a presente pesquisa, constatou-se que os resíduos gerados na limpeza interna do caminhão-betoneira são considerados pela FATMA – Fundação de Amparo ao Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina, baseada na NBR 10004 (2004), como resíduo sólido<sup>1</sup> classe I – perigoso e corrosivo, em virtude do risco ao meio ambiente, caso seu lançamento seja efetuado sem tratamento prévio, devido a sua natureza altamente alcalina (com valor de pH acima de 11).

Cabe ressaltar que as práticas de eliminação do resíduo da produção de concreto são invariavelmente dispendiosas. Uma delas envolve o descarte do material sólido em um local designado por “bota-fora”, onde prevalentemente não há reaproveitamento do resíduo do concreto. Nessas áreas, os resíduos sólidos são lançados sem nenhum tipo de aproveitamento por empresas especializadas em descarte de entulho. Em poucos casos, são reaproveitados na produção de peças pré-moldadas para serem usadas como barreiras de auto-estrada.

Outro método de disposição consiste no descarregamento do concreto fresco diretamente no solo a céu aberto, sendo adicionado areia, água e aditivo incorporador de ar ao concreto, para facilitar a posterior ruptura do material. É uma operação bastante dispendiosa, pois engloba o custo da mão-de-obra, combustível, quilometragem do caminhão e energia requerida no processo de trituração do material.

Segundo Chini et al. (2001) as usinas de concretagem, nos Estados Unidos, têm desenvolvido alternativas para a eliminação de resíduos, visto à redução da disponibilidade de locais destinados ao lançamento de rejeitos. No Reino Unido, em virtude do aumento das exigências ambientais exercidas pelos órgãos competentes, constata-se uma evolução na conscientização dos produtores de concreto com relação à sua responsabilidade ambiental, o que pode ser

---

<sup>1</sup> Segundo a NBR 10004 (2004) são determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

comprovada através do surgimento de novas alternativas, as quais visam à reciclagem da água de lavagem do caminhão-betoneira. Contudo, existe uma parcela significativa de profissionais que não classificam o resíduo corretamente e descarregam o material agressivo no meio ambiente (SEALEY et al., 2001).

A nível nacional são realizadas poucas ações referentes à disposição do resíduo líquido, pelas centrais dosadoras, dentre as quais se destacam as técnicas de correção de pH por meio de agentes químicos e o emprego de tanques de sedimentação. O sistema, composto por tanques de sedimentação em série, visa garantir a sedimentação das partículas finas da água de lavagem; o primeiro tanque recebe o excesso de concreto e água proveniente do balão do caminhão; subsequentemente o resíduo da lavagem, composto por pequenas partículas, é transferido para o próximo decantador, de maneira que a água separada no fim da série de decantações possa ser reutilizada na produção de novos concretos. Este método de eliminação não evita a formação de resíduos sólidos (lama), uma vez que apenas a água é aproveitada para a produção de novas misturas, em detrimento dos componentes do concreto decantados. Esses resíduos posteriormente são removidos e despejados em caixas de lastro, até que seja dada uma destinação final ao rejeito (Figura 1). A lama de água com cimento pode ser parcialmente reaproveitada, através da separação mecânica dos agregados, sendo que uma das alternativas é baseada na lavagem do resíduo com água e separação por peneiras. Diante disso, atualmente, a utilização do AEH proporciona benefícios de grande relevância no contexto ambiental. Contudo, o desconhecimento das empresas sobre o comportamento desses aditivos, resulta em insegurança quanto à sua utilização de maneira previsível e racional.



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Decantador com resíduo proveniente da lavagem dos caminhões-betoneira em central de concreto. (b) Armazenamento do resíduo removido do decantador na caixa de lastro, para a posterior destinação final do rejeito.

Os AEH destacam-se atualmente como um material promissor para estabilização da água de lavagem e posterior reutilização na produção de novos concretos. O método consiste em adicionar uma determinada quantidade do produto no resíduo da lavagem do caminhão, ocorrendo desta forma a estabilização da hidratação do cimento na mistura por uma noite ou um final de semana, visto que o período de estabilização desejado é obtido de acordo com a dosagem do AEH. Ao término da estabilização o concreto novo é misturado diretamente no interior do balão do caminhão-betoneira, sendo efetuadas correções prévias no teor de água da nova mistura em função da quantidade de água com cimento estabilizado presente no balão.

De acordo com Paoline e Khurana (1998), o AEH foi desenvolvido originalmente para a estabilização de concretos retornados durante uma noite ou um fim de semana; no entanto, a estabilização de águas de lavagem provenientes de caminhões-betoneira também é uma prática usual. Os pesquisadores relatam também a possibilidade de aperfeiçoamento da execução de concretos compactados com rolo e concretos projetados (descritos no item 3.2.3). Apesar do uso do AEH ser uma prática relativamente nova, está conquistando uma considerável aceitação entre as centrais dosadoras. Isto converge para o progresso do conhecimento do material e para o surgimento de diversas aplicações, dentre as quais Borger et al. (1994) destacam: aplicações à longa distância, reutilização de concreto proveniente da linha de bomba e controle da temperatura do concreto.

Dispondo-se do AEH, é possível obter economia na quantidade de água requerida na lavagem, alterando o consumo médio de 900 litros de água do processo de lavagem usual (para um caminhão com capacidade de 8 m<sup>3</sup>, em que é removido todo o material aderido), para 200 litros de água, com o propósito apenas de homogeneizar a sobra de concreto com o AEH. Chini e Mbwambo (1996) acrescentam que através deste método, outras técnicas de eliminação de resíduo tornam-se desnecessárias. Desta maneira, é possível obter economias de mão-de-obra, equipamento e transporte. Somando-se aos benefícios mencionados, destaca-se a reutilização de todo o resíduo do concreto, contribuindo, em muito, para a conservação ambiental.

Borger et al. (1994) e Paolini e Khurana (1998) demonstraram a possibilidade de utilização do AEH na estabilização de concretos, já que seus resultados indicaram que as propriedades estudadas das misturas estabilizadas foram melhores ou comparáveis às das misturas de referência. Contudo, é necessário estudar a influência do AEH em teores altamente diluídos, para abranger a avaliação do reaproveitamento de águas de lavagem estabilizadas e verificar os efeitos da alta dosagem do aditivo sobre as propriedades funcionais do concreto. Embora

Borger et al. (1994) afirmem que o custo deste aditivo seja elevado<sup>2</sup>, ressaltam que estes compostos podem promover economias referentes à recuperação do material retornado e, também, quando é utilizado em países onde qualquer método de lançamento de resíduo seja muito dispendioso.

De acordo com as recomendações do fabricante, há duas possibilidades de dosagem do aditivo estabilizador de hidratação: uma delas é para a estabilização do concreto retornado, onde os teores variam de acordo com o peso do cimento, o qual não é objeto do estudo; a outra finalidade é sua utilização em águas de lavagem, onde o teor recomendado varia entre 1 a 2 litros por caminhão, dependendo do período de estabilização desejado. No entanto, resultados preliminares, obtidos por Peneirol (2006), indicam que há uma superdosagem de aditivo nos teores recomendados pelo fabricante.

Assim, dada a importância do tema, este trabalho integra uma já existente linha de pesquisa, coordenada pelo professor Dr. Wellington Longuini Repette, em andamento desde 2005 na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com financiamentos da Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq). Dentre os trabalhos já realizados estão os de Caliço (2005) e Peneirol (2006).

## **1.2 Justificativa**

O desconhecimento de um procedimento para a definição do teor de AEH racionalizado, em águas de lavagem de caminhões-betoneira, bem como a necessidade de avaliação do seu efeito nas propriedades do concreto, impulsionaram a realização deste trabalho.

A economia na quantidade de AEH utilizada para a estabilização do resíduo, incentiva o seu emprego e proporciona benefícios financeiros aos produtores de concreto. Além disso, o desenvolvimento de pesquisas nesta área elucida questionamentos e aumenta a confiança técnica para a utilização do AEH, minimizando o receio das concreteiras em empregar a água de lavagem na produção do concreto, visto que as investigações referentes ao assunto são limitadas. Esta pesquisa fortalece a atenção dos produtores de concreto para uma nova diretriz: a

---

<sup>2</sup> Valor médio notificado no Brasil: AEH - R\$ 2,56/litro + 10% IPI e aditivo redutor de água de base lignosulfonato de sódio - R\$1,23/litro + 10% IPI

preocupação com a conservação ambiental, o que vai refletir significativamente no bem estar da população.

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é obter informações quanto ao uso do AEH e definir métodos de avaliação para o controle e a dosagem do seu emprego em águas de lavagem de caminhões-betoneira. Para a estabilização do cimento presente em águas de lavagem, foram determinados teores racionalizados e comparados a teores usuais de AEH. Desta forma, objetiva-se estudar seus efeitos nas propriedades do concreto, no estado fresco e endurecido, bem como conhecer o comportamento do AEH nesta aplicação. Diante disso, pretende-se estabelecer uma metodologia para a avaliação do seu emprego, visando à otimização do uso do AEH na estabilização do cimento presente na água de lavagem e sua reutilização na produção de concreto.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Contribuir para o estabelecimento de um procedimento racional para a avaliação e otimização do uso de AEH;
- Avaliar os efeitos do AEH em água de lavagem;
- Relacionar o teor de AEH com o tempo de estabilização das reações de hidratação do cimento;
- Comparar os resultados obtidos entre os métodos de calorimetria isotérmica e semi-adiabática, visando verificar se é possível associar a evolução de temperatura com a taxa de liberação de calor das reações de hidratação;
- Avaliar o efeito das águas de cimento estabilizado nas propriedades funcionais de dois tipos de concreto: convencional e de maior resistência<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> O concreto denominado por maior resistência apresenta resistência à compressão superior ao concreto convencional, conforme descrito no item 5.1.1.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1 está fundamentada a importância do trabalho, indicando a forma de utilização do AEH, bem como as vantagens de sua aplicação na estabilização de águas de lavagem de caminhões-betoneira. Nesse Capítulo, está apresentada também a justificativa da realização desta pesquisa direcionada ao uso e efeitos do AEH nas propriedades de concreto, bem como estão descritos os objetivos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 dedica-se a uma revisão de literatura sobre a hidratação do cimento Portland, com enfoque nos mecanismos, cinética e aspectos físicos do processo de hidratação.

O Capítulo 3 trata sobre alguns aspectos gerais dos aditivos redutores de água e estabilizadores de hidratação, como: os mecanismos de ação, seus efeitos nas propriedades de concretos e argamassa e algumas aplicações.

O Capítulo 4 faz uma abordagem das particularidades dos métodos calorimétricos isotérmico e semi-adiabático, relatando os cuidados que se deve ter na execução dos ensaios, o procedimento de calibração dos equipamentos, bem como as vantagens e desvantagens que as técnicas apresentam.

No Capítulo 5 é descrito o planejamento experimental desta pesquisa, dividido em duas etapas: estudo em águas de lavagem e concretos. Além disso, nesse Capítulo está apresentada a caracterização dos materiais empregados; o proporcionamento das misturas produzidas, sua forma de preparo e os ensaios a que foram submetidas. No último subitem estão apresentados os critérios adotados na análise dos resultados.

No Capítulo 6 são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados em águas de lavagem e concreto.

Para melhor entendimento, as considerações finais sobre o comportamento das águas de lavagem e dos concretos são tecidas em subitens diferentes do Capítulo 7. Neste, tem-se ainda algumas sugestões para trabalhos futuros, e são apresentados comentários sobre a execução da pesquisa e alguns aspectos para tornar viável a implantação de um sistema de reciclagem.

Por fim, constam nos Apêndices alguns dados brutos dos ensaios, gráficos plotados a partir da obtenção dos resultados e procedimentos de cálculo.

## 2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A complexidade do processo de hidratação do cimento Portland, iniciado a partir do contato dos grãos anidros do cimento Portland com a água, é atribuída à heterogeneidade do material, que faz com que as reações químicas entre os minerais do clínquer, as várias formas de sulfato de cálcio<sup>4</sup>, a cal livre, os álcalis e a água se processem em taxas diferentes. Estes elementos exercem influência uns sobre os outros, formando hidratos, os quais provocam mudanças físico-mecânicas do sistema, como a pega e o endurecimento. Os principais produtos da hidratação do cimento são o gel de C-S-H e o hidróxido de cálcio, originados dos silicatos, acompanhados de etringita e monossulfato, em menores quantidades, provenientes dos aluminatos. Segundo Ramachandran (1984), a taxa de hidratação dos principais compostos do cimento, nos primeiros dias, é:  $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$ . Estes compostos são formados a partir da calcinação do calcário e argila, fontes de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, convenientemente dosados e homogeneizados, resultando no clínquer. O sulfato de cálcio é adicionado ao moinho em pequena quantidade, com a finalidade de regularizar o tempo de início das reações do aglomerante com a água.

Na Figura 2 está representado o grão de cimento Portland, indicando a maior quantidade de silicatos (>80%), em comparação aos aluminatos. O C<sub>3</sub>S é o composto mais importante do cimento Portland para o desenvolvimento da resistência durante o primeiro mês, enquanto o C<sub>2</sub>S reage mais lentamente e contribui com a resistência à longo prazo (BISHOP et al., 2003). De acordo com as equações apresentadas abaixo, é constatado que o C<sub>3</sub>S libera uma quantidade maior de portlandita em comparação ao βC<sub>2</sub>S<sup>5</sup>.




---

<sup>4</sup> Os tipos de sulfatos que compõe o cimento são: Anidrita (CaSO<sub>4</sub>); Sulfato de cálcio di-hidratado ou gesso – forma de sulfato predominante nos cimentos (Ca.SO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O); sulfato de cálcio hemi-hidratado (Ca.SO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O).

<sup>5</sup> Modificação metaestável para todas as temperaturas.

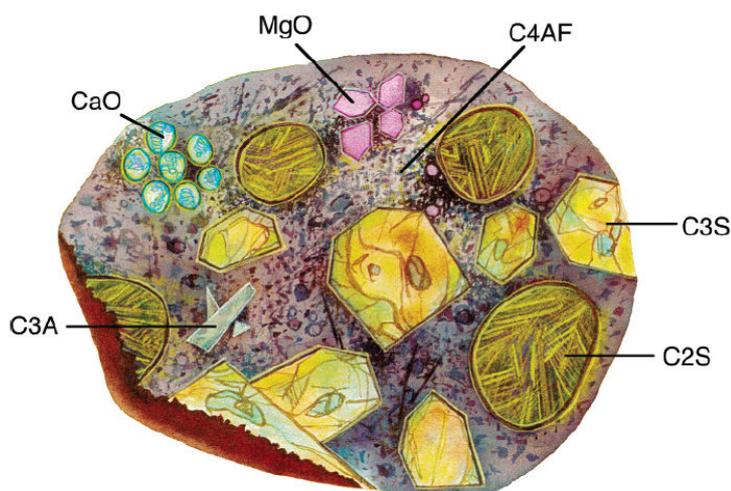
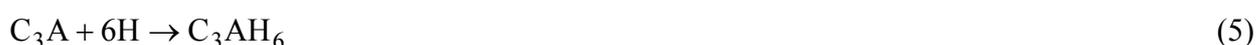


Figura 2 – Representação do grão de cimento seccionado (BISHOP et al., 2003).

Embora os aluminatos estejam presentes em menor quantidade nos grãos de cimento, suas reações são muito importantes e afetam significativamente a hidratação dos silicatos. Além disso, a velocidade das reações do  $C_3A$  é consideravelmente superior à do  $C_3S$ . Ramachandran (1984) menciona que a reação direta entre o aluminato com a água, produz dois cristais hexagonais intermediários,  $C_4AH_{13}$  e  $C_2AH_8$ . Por serem metaestáveis podem se transformar em  $C_3AH_6$ , fase cúbica termodinamicamente estável e de resistência superior. A partir de uma solução saturada em cal, o  $C_2AH_8$  reage com o  $Ca(OH)_2$  para formar  $C_4AH_{13}$  ou  $C_3AH_6$ , dependendo das condições de formação. O  $C_3AH_6$  também pode ser formado diretamente a partir de  $80^\circ C$ . De acordo com Taylor (1990), a presença de sulfato de cálcio garante a utilização do cimento Portland através da desaceleração da rápida reação dos aluminatos com a água, evitando o fenômeno da pega rápida através da formação de  $C_6\bar{A}S_3H_{32}$  (etringita – AFt). Odler (1998) complementa que, se houver desequilíbrio entre a reatividade do  $C_3A$  e a taxa de dissolução do sulfato de cálcio, pequenas quantidades de  $C_4\bar{A}SH_{12}$  (monosulfato – AFm) ou  $C_4AH_{19}$  podem ser formadas. A maneira como se processa o retardo da hidratação do  $C_3A$  pela gipsita e a razão da posterior conversão de etringita em monosulfoaluminato, está apresentado em detalhes pormenorizados no item subsequente. As equações de hidratação dos aluminatos são apresentadas a seguir:





O aprofundamento do conhecimento da hidratação do cimento Portland, direcionado aos mecanismos do processo, principalmente nos estágios iniciais, bem como as teorias que fundamentam a cinética das reações químicas, auxiliam o entendimento dos efeitos causados pelos aditivos utilizados em misturas cimentícias, particularmente o aditivo estabilizador de hidratação e o aditivo redutor de água de base lignosulfonato de sódio.

## 2.1 Mecanismos de hidratação do cimento Portland

Inicialmente, o processo de hidratação tende a ser controlado principalmente pela taxa de dissolução do sulfato de cálcio e das fases do clínquer. Com o progresso da hidratação, a taxa de reação passa a ser controlada cada vez mais pela taxa de nucleação e crescimento dos hidratos e, finalmente, pela taxa de difusão da água e dissolução dos íons (ODLER, 1998).

Na Figura 3 (a), está representado o desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação de uma pasta de cimento ao longo do tempo, proposta por Scrivener (1984), citada por TAYLOR (1990). Segundo o que é sugerido por Scrivener, no início visualiza-se o grão de cimento anidro poli-fásico (0). Após o contato do cimento com a água, há a formação de um gel amorfo de C-S-H e pequenos cristais de etringita, presente essencialmente na solução, os quais serão responsáveis pelo período de dormência (1). A retomada da reação é expressa através da formação mais acentuada de C-S-H externo<sup>6</sup> e etringita, distantes aproximadamente 1µm da superfície do grão (2). Com o prosseguimento da hidratação é observada a formação de cristais mais aciculares de etringita, a solução difunde-se através dos hidratos mais densos e o C-S-H começa a formar-se internamente (3). No decurso do processamento das reações acontece a conversão de etringita em monosulfoaluminato (4). Finalmente, há a produção de uma quantidade significativa de C-S-H interno, preenchendo o espaço entre o grão anidro e a camada externa (5).

Paralelamente ao desenvolvimento da microestrutura do grão, está representada a evolução de calor da reação de hidratação do cimento em função do tempo, demarcada em cinco etapas,

<sup>6</sup> Embora existam várias denominações para a nomenclatura dos diferentes tipos de C-S-H, a terminologia mais aceita foi de “outer product” para o C-S-H, precipitado inicialmente no espaço preenchido pela água, e “inner product” para o gel formado posteriormente no local, proveniente dos grãos anidros do cimento.

expressa na Figura 3 (b). Resumidamente, após o contato do cimento com a água, observa-se uma alta liberação de calor (I), seguida de uma baixa e constante quantidade de calor liberada, correspondente ao período de dormência (II). Posteriormente, ocorre a retomada da aceleração da hidratação, associada a uma forte evolução de calor (III). Finalmente, observa-se a desaceleração das reações de hidratação do cimento e, portanto o decréscimo da quantidade de calor liberada (IV e V).

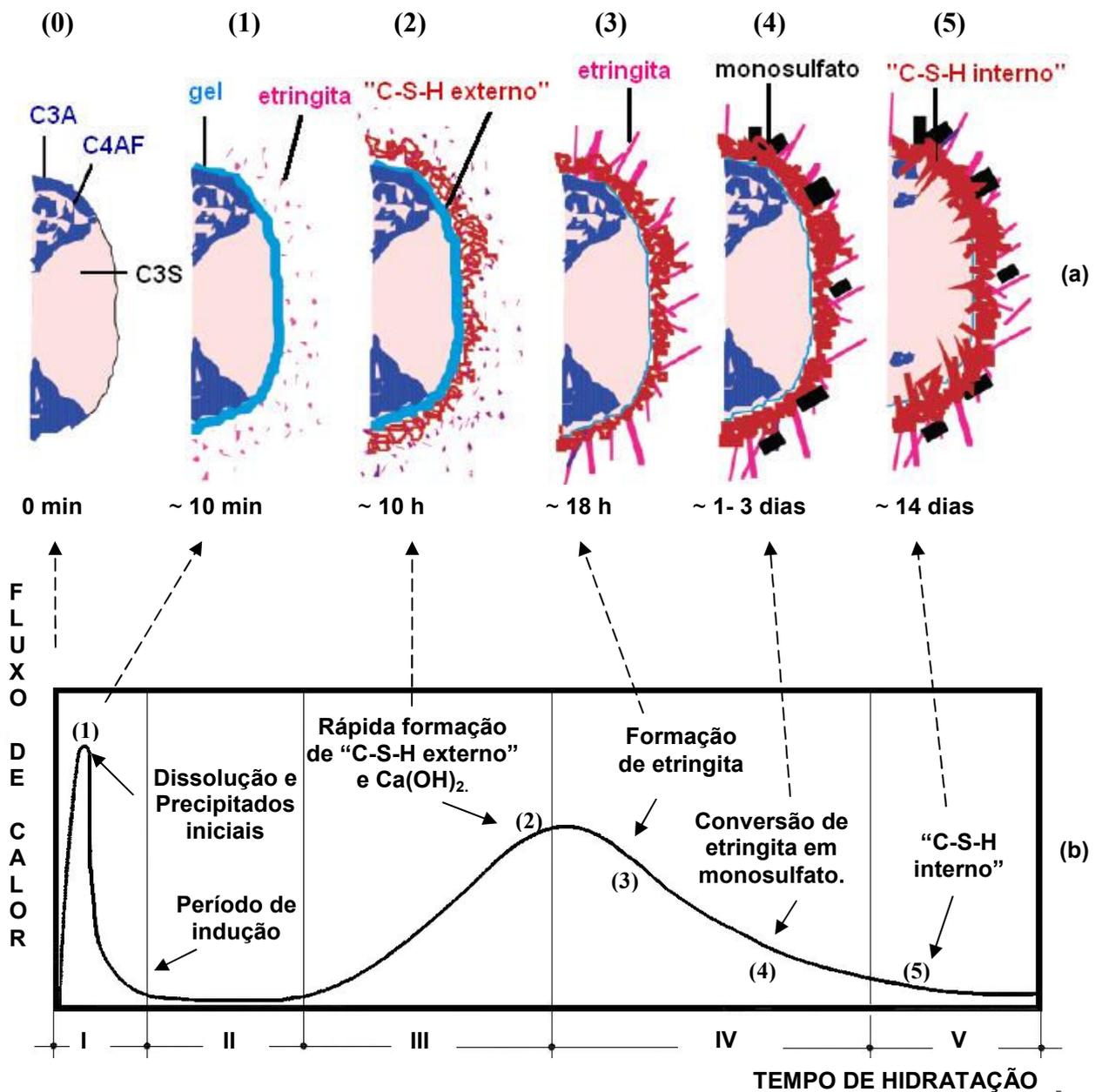


Figura 3 – (a) Desenvolvimento da microestrutura do cimento Portland, adaptado por SCRIVENER (BISHOP et al., 2003). (b) Representação da curva da taxa de liberação de calor do cimento Portland, dividida em 5 etapas (adaptado de ZAMPIERI, 1989).

Os mecanismos do processo de hidratação, divididos nas quatro etapas estabelecidas por Odler (1998), considerando os aspectos da cinética das reações químicas, são apresentados em maiores detalhes, a seguir:

### *I. Pré-indução (primeiros minutos)*

O período de pré-indução tem início imediatamente após o contato do cimento com a água, havendo uma rápida dissolução dos álcalis presentes no cimento, resultando na liberação dos íons  $K^+$ ,  $Na^+$  e  $SO_4^{2-}$  na solução. É seguido da dissolução do sulfato de cálcio até a saturação (em aproximadamente 6 minutos, segundo Gartner et al., 1985), com liberação dos íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ . Com o prosseguimento desta etapa ocorre o início da dissolução das fases anidras  $C_3S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ , havendo o ingresso de íons silicato na solução, os quais permanecem em pequenas quantidades. Para a maioria dos cimentos a saturação do CH ocorre em até 12 min e o fator de saturação alcança o máximo valor em aproximadamente 2 horas (GARTNER et al., 1985). Somente uma parcela do  $\beta C_2S$  fornece  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$  para a solução, já que sua taxa de hidratação evolui mais vagarosamente, em comparação ao  $C_3S$ . Há várias proposições para explicar a maior reatividade do  $C_3S$ , sendo destacado por Ramachandran (1984) o número de coordenação<sup>7</sup> irregular do Ca, implicando em imperfeições na estrutura. A hidratação nesta etapa se processa de maneira rápida e intensa, e sua natureza é altamente exotérmica, havendo uma contribuição de todas as reações para o pico (1) de liberação de calor, o que pode ser visualizado na Figura 3 (b). A rehidratação de sulfato de cálcio hemi-hidratado em di-hidratado também pode contribuir para este pico.

Há, fundamentalmente, a formação de dois precipitados: o gel de C-S-H e Aft. A camada de C-S-H na superfície do grão é proveniente principalmente da dissolução congruente<sup>8</sup> do  $C_3S$ . O C-S-H precipitado apresenta estrutura amorfa. Sua notação é efetuada por meio de hífen para denotar incerteza estequiométrica, já que sua composição química e morfologia variam ao longo da superfície do grão de cimento. A menor relação C/S do hidrato formado, em comparação ao  $C_3S$ , justifica a alta concentração de  $Ca^{2+}$  e  $OH^-$  na solução.

<sup>7</sup> Caracteriza o número de ligações conectadas diretamente ao átomo central por outros átomos, radicais ou moléculas. Ex:  $[Fe(CN)_6]^{3+}$ : número de coordenação igual a 6.  $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ : número de coordenação igual a 4.  $[Co(NO_2)_3(NH_3)_3]$ : número de coordenação igual a 6 (CARVALHO, 1997).

<sup>8</sup> Considera-se dissolução congruente quando todos os componentes de um mineral se dissolvem.

A hidratação da fase aluminato possibilita a formação de dois hidratos, dependendo da concentração de íons aluminatos e sulfatos na solução. Neste primeiro momento, a abordagem será direcionada à formação de etringita, já que sua precipitação acontece nesta fase inicial devido à alta relação  $\bar{S}/A$ . De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o rápido ingresso de íons hidroxila, íons álcalis e sulfato na solução, diminui a solubilidade do  $C_3A$ , resultando numa baixa concentração de  $Al^{3+}$  para a precipitação da etringita. Esta mesma constatação explica, através da diminuição da solubilidade do  $C_3A$ , o mecanismo de retardo da hidratação do  $C_3A$  pela gipsita. Segundo Dalgleish et al. (1982), dentro de um intervalo de 10 minutos já existe a possibilidade de visualização dos cristais de etringita em forma de pequenas agulhas prismáticas. Mehta (1976) observou em pastas com  $C_3A$  e sulfato de cálcio, que a morfologia da etringita depende da relação  $a/c$  e do espaço disponível; longas agulhas aciculares são formadas apenas quando há espaço suficiente (altas relações  $a/c$ ), enquanto pequenas agulhas prismáticas ocorrem principalmente em baixas relações  $a/c$ . Apesar da similaridade estrutural entre os hidratos formados pelo  $C_4AF$  e  $C_3A$ , o processamento das reações da fase ferrita é mais lento.

## *II. Indução ou dormência (primeiras horas)*

O período de dormência é marcadamente caracterizado pela diminuição da taxa de hidratação, isto é, a dissolução iônica é reduzida, mas não cessa completamente, de forma que, próximo ao final deste período observa-se um aumento na concentração iônica na solução. Além disso, não é constatada a formação relevante de hidratos de qualquer natureza. Odler (1998) afirma que, mesmo com uma eventual formação de etringita, a concentração de  $SO_4^{2-}$  se mantém constante, uma vez que há um suprimento iônico de sulfato de cálcio adicional. Neste estágio, constata-se uma baixa e constante liberação de calor, proveniente da hidratação do cimento, de acordo com a etapa II da Figura 3 (b). O reflexo físico deste período é a característica plástica da mistura.

Existem algumas teorias postuladas para justificar o referido período, dentre as quais, a de Trados (1976), que destaca o impedimento do crescimento de CH pela presença do  $SiO_2$ . Este processo é conhecido por envenenamento, já que sua presença provoca a nucleação impura do CH. Desta forma, os cristais de CH não são precipitados até que sua concentração iônica na solução tenha excedido o nível de saturação. É sugerido por Gartner et al. (1985) que, um fator de saturação entre 2 e 3 é suficiente para compensar o efeito do envenenamento ou continuar a nucleação. No fim do período de indução é observada a cristalização do CH e diminuição de íons cálcio na solução.

É também sugerido, por vários pesquisadores, que a presença de uma camada protetora de C–S–H em torno dos grãos de cimento atua como barreira entre o material anidro e a solução. Embora a membrana de C–S–H seja responsável pela diminuição da permeabilidade das moléculas de água da solução em direção ao grão, bem como dos íons provenientes do interior da matriz cimentícia para a solução, existe fluxo iônico, que é responsável pelo aumento da concentração de íons dissolvidos na solução. Powers (1961), citado por ODLER; DÖRR (1979), considera que a ruptura da camada é causada pela pressão de novos hidratos ou forças osmóticas. Desta forma, existe uma propensão por parte de vários pesquisadores, em associar o fim do período de dormência à ruptura ou transformações, que tornam a membrana de C–S–H mais permeável. Embora esta teoria sugira de forma coerente a causa do período de indução, Ramachandran (1984) relata que existem algumas observações que divergem desta proposição como: a existência de uma membrana de C–S–H descontínua, com estrutura delicada que pode ser afastada facilmente da superfície do grão de cimento; a pequena relação C/S do produto hidratado e a ocorrência de uma dissolução inicial, que pode ser congruente ou não.

Segundo Odler (1989), a teoria mais aceita para a ocorrência do período de indução propõe a formação de uma camada de etringita na superfície do  $C_3A$ , atuando como uma barreira responsável pela diminuição da velocidade de hidratação. Desta forma, o término do período de indução é atribuído à ruptura da referida camada, causada pelo completo consumo de sulfato de cálcio adicional e também pela nucleação e crescimento do C–S–H. Mehta (1976) contesta essa proposição e afirma que a grande quantidade de etringita em torno do grão de  $C_3A$  não parece ser impermeável às moléculas de água.

Ramachandran (1984) menciona a estabilização da superfície de  $C_3S$  pela presença de uma fina película de água, a qual é removida quando a concentração de  $Ca^{2+}$  aumenta na solução, causando a precipitação do C–S–H. Desta forma, o fim do período de indução corresponde ao crescimento de C–S–H.

### *III. Aceleração (3 - 24 h)*

De acordo com Odler (1998), o término do período de dormência origina a retomada da aceleração da hidratação, que é controlada pela formação de CH e C–S–H, associada a uma forte evolução de calor, correspondente ao pico (2) da Figura 3 (b). O aumento da taxa de hidratação, principalmente do  $C_3S$ , seguido do início da hidratação do  $\beta C_2S$ , possibilita a formação intensa do C–S–H, hidrato que exerce maior contribuição para a resistência do

cimento hidratado. Em virtude da intensa formação de produtos e do crescimento de grandes cristais de CH, ocorre o declínio na concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ . Após a completa dissolução de sulfato de cálcio, também é constatada uma diminuição gradativa de sua concentração iônica na solução, em decorrência da formação de etringita (AFt), bem como da adsorção deste íon na estrutura do C-S-H.

Neste estágio, existe a possibilidade de visualização dos cristais de CH, de estrutura hexagonal e com pontos de clivagem, que atribuem menor resistência ao cristal. Embora comprovada a cristalinidade do CH, Diamond (2004) observou portlanditas de formas irregulares no interior de pastas de cimento. É também constatada uma densa camada de C-S-H, em torno dos grãos de cimento, que engloba e talvez nucleie sobre a etringita. Segundo Scrivener (2004), o local onde as duas fases precipitam é bastante diferente; o CH é formado nos poros preenchidos por água, enquanto o C-S-H é depositado principalmente em torno dos grãos de cimento. Ao término de 4 horas, os grãos apresentam-se completamente envolvidos e, em aproximadamente 12 horas, ocorre um fenômeno conhecido por ponto de coesão, em que o crescimento externo da camada atinge uma considerável espessura, que torna possível a aglutinação dos grãos. Esta etapa coincide com a máxima taxa de evolução de calor e corresponde, aproximadamente, ao fim de pega (TAYLOR, 1990).

De acordo com Scrivener (2004), entre o término do período de indução e aproximadamente 1 dia do início da hidratação são formadas as camadas hidratadas ou *hydration shells*<sup>9</sup>. Grãos menores que 5  $\mu\text{m}$  são completamente hidratados neste estágio, originando os grãos de Hadley<sup>10</sup>. Os grãos maiores continuam a se hidratar, originando um C-S-H mais denso, com isto o espaço vazio entre os grãos de cimento desaparece em 1 a 2 semanas. Na Figura 4 está representada a forma de hidratação dos diferentes tamanhos de grãos. A coluna do meio expressa a situação após 1 dia. Todos os grãos estão envolvidos por uma fina camada de C-S-H separada por aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  do grão. A coluna à direita mostra a situação em pasta madura. No topo estão representados pequenos grãos completamente hidratados nos primeiros estágios, permanecendo como cavidades das cascas do produto de hidratação. Com o prosseguimento da hidratação, os grãos de tamanho médio (no meio) formam uma espessa camada de C-S-H, talvez com um pequeno vazio no centro. Grãos maiores que 15  $\mu\text{m}$  hidratam-se até preencher o espaço entre a camada e o grão (SCRIVENER, 2004).

<sup>9</sup> Hidrato precipitado dentro do limite originado pelos grãos de cimento. Também denominado “inner product” C-S-H (DIAMOND, 2004).

<sup>10</sup> São espaços vazios isolados, resultantes da completa hidratação do grão de cimento.

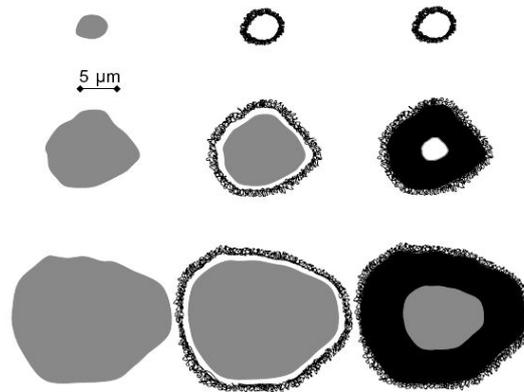


Figura 4 – Representação das camadas de hidratação em função do tempo, para os diferentes tamanhos de grãos (SCRIVENER, 2004).

É relevante destacar que, a estrutura intercomunicada dos grãos de cimento explica as propriedades mecânicas. No estágio de aceleração os produtos são formados no espaço originalmente preenchido pela água, e apresentam uma estrutura consideravelmente porosa. Uma vez que, nesta etapa, é possível constatar uma região existente entre a estrutura e o grão de cimento, genericamente conhecida por “outer product”, existe a possibilidade de migração iônica, resultando no processamento de reações por dissolução-precipitação (SCRIVENER, 1989 apud TAYLOR, 1990).

#### *IV e V: Pós-aceleração (após 12 h)*

Com o progresso da hidratação ocorre, sobre os grãos de cimento, a formação de hidratos de maior espessura, conduzindo a uma dificuldade da mobilidade iônica e a uma diminuição progressiva da taxa de reação, a qual passa a ser controlada pelo processo de difusão das moléculas de água, através das camadas de hidratos.

Com a continuidade da hidratação do  $C_3S$  e  $\beta C_2S$  há o prosseguimento na formação do  $C-S-H$ , de modo que, a deposição deste hidrato acontece principalmente nos espaços internos do grão de cimento, permitindo a adsorção dos “outer products” essencialmente pelos grãos maiores. A contribuição do  $\beta C_2S$  aumenta com o tempo, conseqüentemente a taxa de formação do CH adicional é diminuída. Em aproximadamente 7 dias pode ser notado um preenchimento total da área situada entre o grão anidro e a estrutura dos grãos de aproximadamente  $8 \mu m$  (SCRIVENER, 1989 apud TAYLOR, 1990).

Como mencionado anteriormente, existe a possibilidade de visualização dos cristais de etringita em 10 minutos. No entanto, a formação é finalizada em 24 horas, e, desta vez, os cristais são expressivamente mais aciculares do que os produzidos no período de pré-indução (BENSTED, 1983). Segundo Diamond (2004), concretos expostos à condição de secagem e molhagem podem exibir poros completamente preenchidos por etringita (Figura 5). A renovação dos cristais de etringita acontece, de acordo com Taylor (1990), no período de 12 a 16 h, ocasionando a queda brusca da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , equivalente a um pico na região (3), na curva calorimétrica, de acordo com a Figura 3 (b). Com a continuidade da hidratação é possível constatar a carência no fornecimento de íons  $\text{SO}_4^{2-}$ , o que proporciona a reação da etringita com o  $\text{C}_3\text{A}$  excedente, originando o monosulfoaluminato. Segundo Odler (1998), existe a possibilidade de alguns cimentos apresentarem um pico correspondente à conversão de AFt em AFm, proveniente da reação iniciada em aproximadamente 18 h (região 4 da Figura 3 (b)).



Figura 5 – Etringita secundária localizada no poro de uma pasta de cimento Portland (<http://www.ctu.edu.vn/colleges/tech/bomon/ktdx>)

Diamond (2004) constatou uma variação da espessura do C-S-H interno em torno dos diferentes grãos de cimento (Figura 6). Na área “A” é visualizado um grão anidro envolvido por uma larga camada de C-S-H interno, enquanto que sobre o grão “B” está precipitada uma fina camada de C-S-H interno. Esta constatação foi associada à abundante presença de  $\beta\text{C}_2\text{S}$  na composição do grão “B”, que é confirmada por sua textura mesclada, demonstrando a hidratação parcial do grão. No entanto, outros grãos também podem demonstrar a mesma tendência, sem essencialmente ser compostos por  $\beta\text{C}_2\text{S}$ . O grão “C” encontra-se totalmente hidratado.

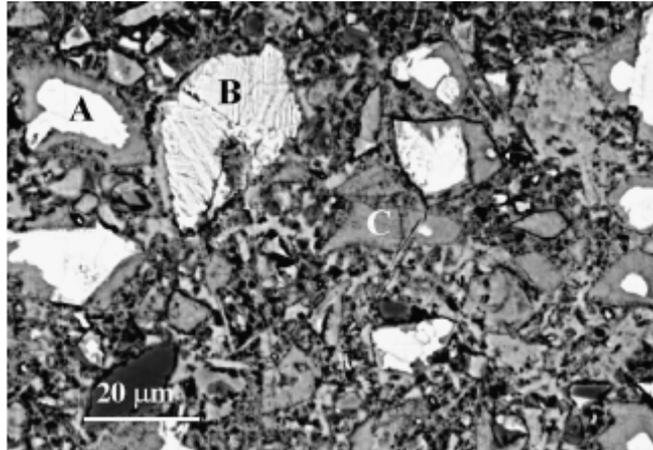


Figura 6 – Detalhe do C-S-H interno na microestrutura de uma pasta de cimento hidratada, relação  $a/c=0,3$  e 100 dias de idade (DIAMOND, 2004).

Devido à intensa formação de hidratos, que conduz ao refinamento da microestrutura, permanecem os grãos maiores, que são gradualmente substituídos por C-S-H através do movimento interno na interface. Diante disso, Scrivener (1986), citada por Taylor (1990), afirma que o processo de hidratação passa a ser regido pelo mecanismo topoquímico. A pesquisadora, ainda, difere três regiões onde o C-S-H possa estar localizado em pastas com idades avançadas: na região originalmente preenchida pela água, na parte interna dos grãos de cimento e no núcleo central formado a partir do processo topoquímico. A desaceleração das reações corresponde à região (5) da curva de liberação de calor, localizada na Figura 3 (b).

## 2.2 Fatores determinantes na cinética da hidratação

Segundo Odler (1998), os fatores determinantes na cinética da hidratação são:

- A composição da fase do clínquer, a qualidade e a quantidade de íons substituintes incorporados na estrutura cristalina dos minerais individuais do clínquer;
- O histórico de processamento do clínquer, incluindo a taxa de aquecimento, a temperatura de queima e a taxa de resfriamento;
- A quantidade e o tipo de sulfato de cálcio presente no cimento;
- A finura do cimento;
- A tecnologia empregada na moagem do cimento;

- A relação água/cimento da mistura;
- As condições de cura (cura imersa ou úmida);
- A temperatura de hidratação;
- A presença de aditivos na mistura.

O tratamento detalhado desses fatores foge do escopo desse trabalho. No entanto, alguns aspectos principais estão tratados a seguir, no item 2.3, como fatores que afetam a pega do cimento.

### **2.3 Aspecto físico da hidratação: pega**

A presença de aditivos redutores de água e estabilizadores de hidratação no concreto provoca o prolongamento dos tempos de pega, refletindo no aumento do tempo de espera para a desforma da unidade estrutural, ou prejudicando as atividades de acabamento da obra. Portanto, o conhecimento dos tempos de pega pode ser de um valor considerável no planejamento das operações de concretagem, o que justifica a necessidade de embasamento teórico sobre o assunto.

#### **2.3.1 Descrição do fenômeno**

A pega é um processo de transformação dos grãos de cimento, originado de suas reações de hidratação, decorrente de uma suspensão dispersa e concentrada para um sistema conectado (JIANG et al., 1995).

A teoria mais consolidada sobre o mecanismo de pega, proposta por Rebinder et al. (1956), sugere que, após o contato do cimento com a água ocorre a dispersão dos grãos de cimento na solução. Com isso, forças iônicas são desenvolvidas, conduzindo à coagulação<sup>11</sup> das partículas, responsável pelo aprisionamento de uma parcela da água, resultando na diminuição da fluidez (Figura 7). A rede de coagulação originada por este fenômeno é fraca, em virtude do baixo número de contato entre as partículas, por isso o sistema é mecanicamente reversível (uma nova mistura ou aplicação de ultra-som pode destruir a estrutura que se forma novamente quando mantida em repouso, Odler, 1988). Com o prosseguimento da hidratação, fortes ligações

---

<sup>11</sup>Coagulação é a neutralização das cargas negativas das partículas, promovendo sua atração mútua, isto é, sua aglomeração (RICHTER, 2006 apud BENINI, 2005).

químicas se desenvolvem nos pontos de contato entre os grãos individuais de cimento, cobertos com o material hidratado, ocorrendo a formação da estrutura cristalizada, resultante do aumento do número de contato entre as partículas pela intensa formação de hidratos da solução supersaturada.

Pesquisas realizadas por Schukin et al. (1979), sobre a formação dos contatos de cristais de gipsita pela nucleação de novas fases a partir da solução supersaturada, confirmam a teoria do mecanismo de pega proposta por Rebinder et al. (1956), segundo a qual dois tipos de forças ligam os pontos de contato dos cristais. A primeira é da ordem de magnitude das forças de van der Waals, correspondente ao surgimento da coagulação. A segunda é da ordem de magnitude de ligações cristalinas, que resultam em entrelaçamentos subsequentes dos cristais, ou seja, por meio das chamadas pontes de contato a estrutura coagulada torna-se rígida e, portanto mecanicamente irreversível.

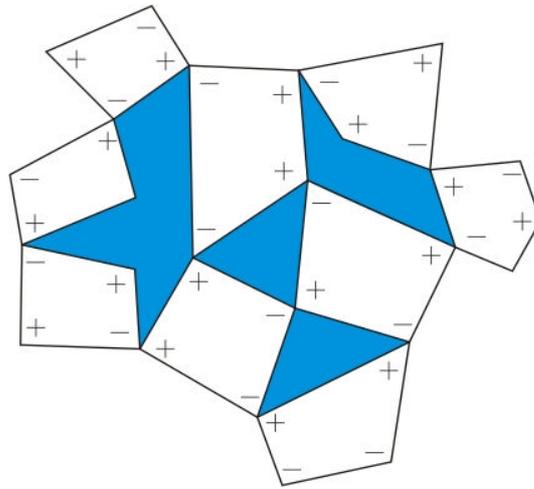


Figura 7 – Estrutura floclada das partículas da pasta de cimento (AÏTCIN, 2000).

#### a) Influência do processo de hidratação

Geralmente, considera-se uma relação direta entre hidratação e pega, mas não existe um consenso dos pesquisadores sobre a influência dos compostos do cimento em relação ao fenômeno. Odler (1998) sugere que a pega normal parece ser consequência tanto da hidratação do  $C_3S$  quanto do  $C_3A$ , portanto, é procedente da formação das fases C-S-H e AFt. Em cimento Portland normal, sem quantidades excessivas de  $C_3A$  e  $C_4AF$ , a pega parece ser controlada principalmente pela formação de C-S-H; no entanto, em cimentos com altas quantidades de  $C_3A$ , a formação de etringita parece exercer uma importância relevante no processo da pega

(CHEN; ODLER, 1992). Taylor (1990) ressalta que, a similaridade da pega entre pastas de cimento e pastas de  $C_3S$ , conduz à proposição de que o fenômeno é originado principalmente das reações dos silicatos. Outra hipótese propõe que, o início de pega esteja associado com a recristalização da etringita microcristalina, inserida em cristais bem desenvolvidos (LOCHER, 1974). Chen e Odler (1992) não observaram a precipitação de grandes cristais de etringita em pastas de relação  $a/c$  menores que 0,5, o que pode ser associado com a falta de espaço disponível entre os grãos de cimentos da pasta. No entanto, evidências microestruturais demonstraram que, poucas mudanças ocorrem na quantidade ou morfologia da etringita durante este período; o crescimento secundário da etringita ocorre mais tarde (TAYLOR, 1990). Apesar das opiniões controversas a respeito da formação de C-S-H e AFt no fenômeno da pega, existe um consenso sobre a contribuição do C-S-H na pega (BENSTED, 1983).

#### b) Influência da presença e teor de sulfato de cálcio

O sulfato de cálcio é adicionado ao clínquer do cimento Portland para regular o tempo de pega. Por isso, a pega é influenciada pelos diferentes tipos de sulfato de cálcio, com diferentes graus de solubilidade, os quais podem estar presentes nos cimentos, tais como:  $CaSO_4$  (anidrita – baixa solubilidade),  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (sulfato de cálcio di-hidratado ou gesso – alta solubilidade),  $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$  (sulfato de cálcio hemi-hidratado – alta solubilidade),  $CaSO_4$  (anidrita solúvel ou gesso desidratado). Uma vez que o equilíbrio aluminato/sulfato, na solução de uma pasta de cimento, determina principalmente se o comportamento da pega é normal ou não, serão descritos a seguir três fenômenos de pega influenciados pelo desequilíbrio na relação  $A/\bar{S}$ , baseados em Odler (1998).

A solubilidade do  $C_3A$  e  $C_4AF$  é diminuída na presença de quantidades adequadas de  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  na solução, com isto camadas microcristalinas de AFt são precipitadas na superfície dos grãos de cimento. Nestas condições a reologia da pasta é preservada. Subseqüentemente, a pega normal é iniciada quando a formação de hidratos é intensificada, em particular do C-S-H.

Na presença de alta quantidade de  $C_3A$  reativo e pequena quantidade de sulfato de cálcio solúvel, há um aumento nas reações iniciais das fases aluminato e ferrita, resultando na formação de cristais em forma de placas hexagonais de monossulfato (AFm) e aluminato de cálcio hidratado, conduzindo à pega rápida na pasta. Este fenômeno está vinculado a uma intensa liberação de calor, a plasticidade não é recuperada e o ganho de resistências é baixo.

Existe outra situação indesejável, conhecida por falsa pega, decorrente de cimentos com  $C_3A$  de baixa reatividade ou com baixo teor deste composto, em que parte do hemi-hidrato pode precipitar e formar sulfato de cálcio dihidratado. Desta forma, o intertravamento desses cristais pode conduzir ao endurecimento ou a falsa pega. Esta situação resulta na perda da plasticidade, que pode ser recuperada com uma nova energia de mistura, caso a quantidade de gesso secundário não seja muito grande. Este processo não está associado com uma alta taxa de evolução de calor, e o desenvolvimento da resistência não é significativamente afetado.

Segundo Taylor (1990), o fator mais influente no curso das reações não é apenas a quantidade relativa de sulfato de cálcio ou aluminatos, mas as taxas com que as espécies iônicas são disponibilizadas. O teor de  $SO_3$  requerido para controlar a pega no cimento Portland, não deve exceder de 3 a 4%, caso contrário pode acontecer uma expansão na pasta endurecida, já que a abundante presença de sulfato propicia a excessiva formação de etringita.

### c) Influência da relação a/c

De acordo com Odler (1998), o aumento da relação a/c provoca o prolongamento do tempo de pega. Mehta e Monteiro (1994) explicam que isto ocorre porque a pega é influenciada pelo preenchimento dos espaços vazios com os produtos de hidratação. Desta forma, os dados de tempo de pega de pastas de cimento não coincidem com o tempo de pega do concreto que contenha o mesmo cimento, em virtude das relações a/c, nos dois casos, serem normalmente diferentes.

Em geral, quanto menor a relação a/c, menor o tempo de pega, pois com a diminuição da relação a/c, o espaçamento entre as partículas é menor, e a formação da microestrutura do material é mais rápida, resultando na diminuição do tempo de pega. Garcia et al. (2007) justifica que o aumento no teor de água deve provocar um aumento no tempo de pega, por favorecer a formação de hidratos mais solúveis e, conseqüentemente, aumentar o tempo para que inicie a precipitação. Desta forma, a falta de água deve provocar uma aceleração no endurecimento do cimento por proporcionar a nucleação de hidratos menos solúveis.

Para efeito de ilustração da influência da relação a/c na pega, foram medidos experimentalmente os tempos de início de pega, através do método de Vicat, em pastas de diferentes relações a/c. De acordo com a Figura 8, percebe-se o prolongamento dos tempos de pega com o aumento da quantidade de água na mistura. Portanto, a pasta de relação a/c=0,4 exibiu o valor de

aproximadamente 3h40min, enquanto a de  $a/c=0,6$  registrou 6h5min, indicando uma variação de 2h25min nos resultados.

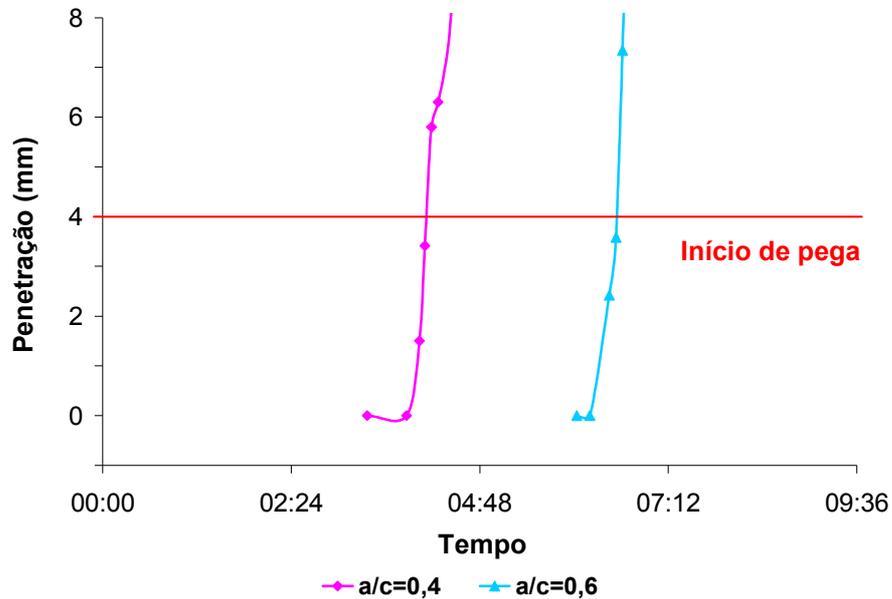


Figura 8 – Comparação dos tempos de início de pega entre pastas de relação  $a/c=0,4$  e  $a/c=0,6$ .

#### d) Influência da temperatura

Através do aumento da temperatura, o tempo de pega é encurtado e a resistência inicial pode ser aumentada (JIANG, 1995). Os valores da temperatura ambiente e da umidade do ar são especificados na NBR NM 9 (2003), uma vez que exercem influência sobre os tempos de pega.

De acordo com a Figura 9, é possível constatar o efeito da temperatura sobre as curvas típicas de pega de concretos, obtidas pela ASTM C 403 (1992). Percebe-se que, se o concreto for preparado e curado a  $10^{\circ}\text{C}$  e  $23^{\circ}\text{C}$ , os tempos de pega serão prolongados em aproximadamente 7 e 4 horas, respectivamente.

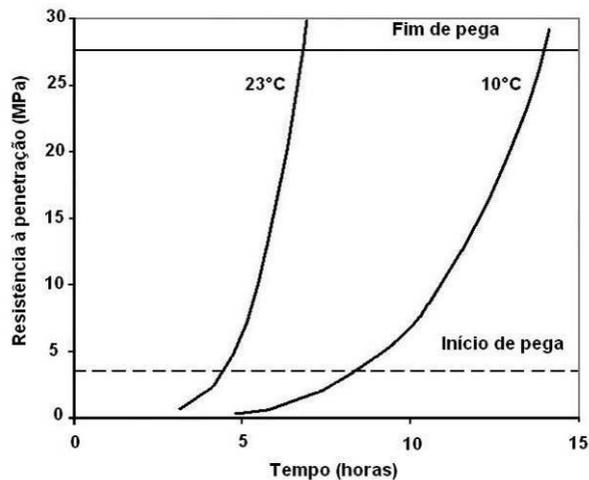


Figura 9 – Influência da temperatura nos tempos de pega de concretos (ASTM C 403)

### 2.3.2 Medição dos tempos de pega

Antes de descrever os métodos experimentais que determinam os tempos de início e fim de pega, vale ressaltar as três manifestações físicas da hidratação: o enrijecimento, a pega e o endurecimento. O primeiro é o aumento da consistência da pasta plástica e, está associado à perda de abatimento do concreto. É causada pela interação entre as partículas, pela perda de água livre do sistema devido às reações iniciais de hidratação, adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade e a evaporação. A pega implica na solidificação da pasta; e o endurecimento está relacionado ao ganho de resistência, em virtude do preenchimento progressivo dos espaços vazios da pasta com os produtos de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

#### a) Resistência à Penetração

O tempo de início de pega define o limite de manuseio da mistura, e o fim de pega está associado ao início do desenvolvimento da resistência mecânica; são pontos definidos arbitrariamente, através do método de resistência à penetração. Desta forma, são puramente pontos de referência, pois não coincidem exatamente com a perda completa de fluidez ou com o início da resistência mecânica. No entanto, são úteis para avaliação comparativa de desempenho de diferentes tipos e teores de aditivos controladores de pega ou servir de parâmetro para o planejamento das operações de concretagem.

Em pasta de cimento, os tempos de pega são quase universalmente determinados pelo aparelho de Vicat (Figura 10), o qual mede a resistência à penetração de uma mistura de consistência padrão, por meio de uma agulha sob uma carga total de 300 g. O início de pega é um tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha interrompe sua penetração a  $4\pm 1$  mm do fundo. O fim de pega é atingido quando a agulha faz uma impressão na superfície da pasta, correspondente a 0,5 mm. Este procedimento de ensaio é recomendado pela NBR NM 65 (2003).



Figura 10 – Aparelho de Vicat.

O método de determinação dos tempos de pega em concretos e argamassas, também por meio da resistência à penetração é prescrito pela NBR NM 9 (2003). O ensaio consiste em obter uma porção de argamassa, a partir do peneiramento do concreto, compactá-la em um molde padrão e medir a força necessária para fazer uma agulha penetrar 25 mm na argamassa. Os tempos de pega são determinados a partir da declividade da curva, obtida de uma representação linear de dados do tempo decorrido e da resistência à penetração. Neste caso, os tempos de início e fim de pega são os tempos decorridos após o contato do cimento com a água de amassamento, necessários para uma argamassa atingir a resistência à penetração igual a 3,4 e 27,6 MPa, respectivamente. Mehta e Monteiro (1994) ressaltam que esses pontos não indicam a resistência do concreto, já que para o valor de 3,5 MPa de resistência à penetração, a resistência à compressão do concreto é muito pequena, enquanto que para 27,6 MPa, a resistência à compressão é de aproximadamente 0,7 MPa (Figura 11).

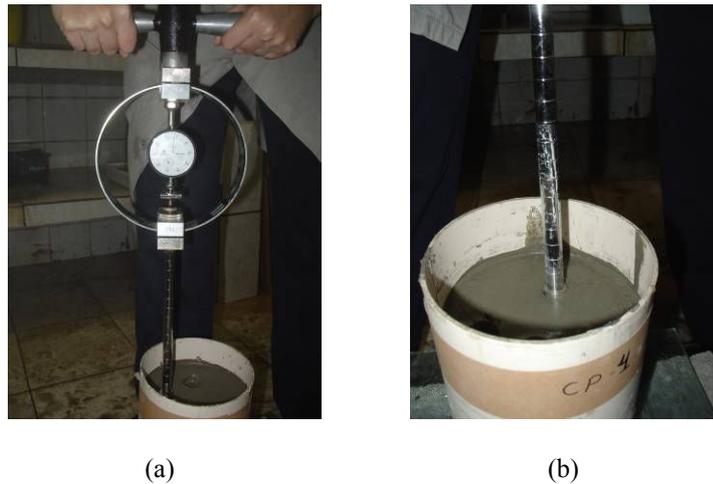


Figura 11 – Ensaio de resistência à penetração em argamassa. (a) Detalhe do anel dinanométrico do penetrômetro. (b) Detalhe da agulha de seção circular do penetrômetro imersa na argamassa.

#### b) Taxa de liberação de calor

Embora existam vários procedimentos para a determinação dos tempos de pega, é apresentado o método que associa os tempos de pega à curva de evolução de calor das reações de hidratação do cimento ao longo do tempo, em virtude deste ensaio ser empregado nos experimentos desta pesquisa. Segundo Ramachandran (1984), o tempo de início de pega, em pastas de  $C_3S$ , ocorre quando a taxa das reações é intensificada, enquanto o tempo de fim de pega acontece antes do término do período de aceleração. Entretanto, Taylor (1990); Mehta e Monteiro (1994) indicam que, em pastas de cimento, o tempo de fim de pega corresponde aproximadamente à máxima taxa de calor liberado no período de aceleração das reações de hidratação (Figura 12).

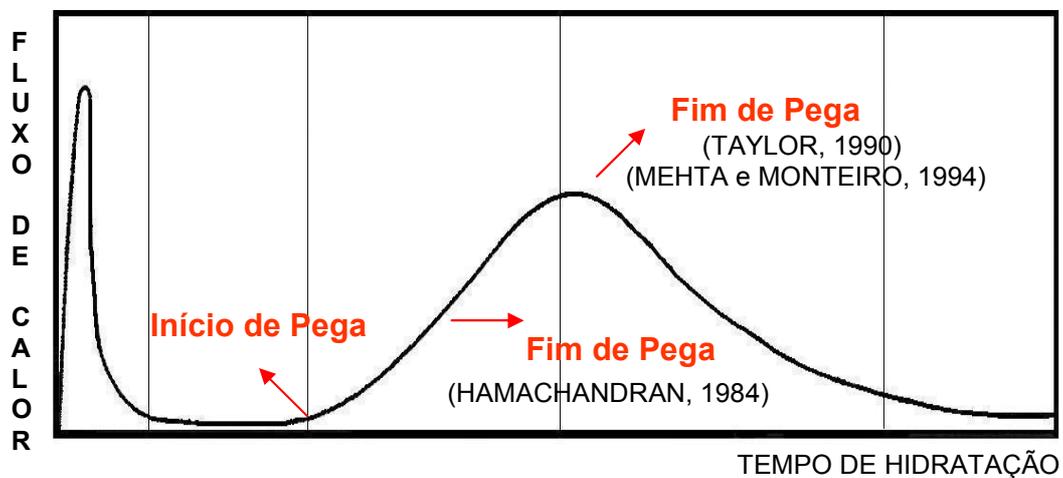


Figura 12 – Localização dos tempos de pega na curva de evolução de calor.

## 3 ASPECTOS GERAIS DOS ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA E ESTABILIZADORES DE HIDRATAÇÃO

### 3.1 Aditivos redutores de água

Como o próprio nome indica, os aditivos redutores de água proporcionam a redução na quantidade de água do concreto necessária para a obtenção de um abatimento desejado, e melhoram as propriedades da mistura no estado endurecido, principalmente a resistência e a durabilidade, nas idades finais. Comercialmente, estes aditivos devem proporcionar uma redução de água compreendida entre 5 a 15% em relação à mistura de referência (COLLEPARDI, 1984). Caso as proporções da mistura sejam mantidas, estes aditivos atuam como plastificante. As possibilidades de sua utilização são refletidas no material cimentício de diferentes formas, conforme está abordado no item 3.1.2. Na Tabela 1 estão compilados alguns requisitos de desempenho definidos em normas para este tipo de aditivo.

Tabela 1 – Comparação entre os requisitos de desempenho dos aditivos redutores de água de acordo com as normas americana e brasileira.

Norma	Classificação	Redução de água*	Tempo de início de pega*	Tempo de fim de pega*	Resistência à compressão mínima*
NBR 11768 (1992)	Plastificante	≥ 6%	Máx: -1h e +1,5h	Máx: -1h e 1,5h	≥ 110% (3, 7, 28, 90 dias)
ASTM C 494 (1999)	Tipo A: redutor de água	≥ 5%	Mín: 1h Máx: 1,5h	Mín: 1h Máx: 1,5h	≥ 110% (3, 7, 28 dias)

\* Em relação à mistura de referência.

#### 3.1.1 Composição química

O lignosulfonato é o composto orgânico mais utilizado na produção dos aditivos redutores de água. É proveniente da lignina, resíduo obtido a partir do processo de extração do licor da madeira, utilizado na indústria de celulose. A composição do lignosulfonato pode variar, dependendo do processo de fabricação ao qual o produto é submetido, bem como do tipo e idade da madeira usada como matéria-prima (COLLEPARDI, 1984).

A estrutura molecular do lignosulfonato é muito complexa e desorganizada, e por ser um composto natural não há um controle sobre sua unidade química (Figura 13). Sua massa molecular é relacionada ao processo de refinamento na fabricação de lignosulfonato; esta característica indica o desempenho do aditivo e sua forma de ação, pois interfere na distância de repulsão das partículas de cimento. Desta forma, aditivos com menor massa molecular apresentam menor eficiência, por serem facilmente incorporados pelos hidratos formados no início do processo de hidratação (RIXON e WADDICOR, 1981 apud ODLER, 1988).

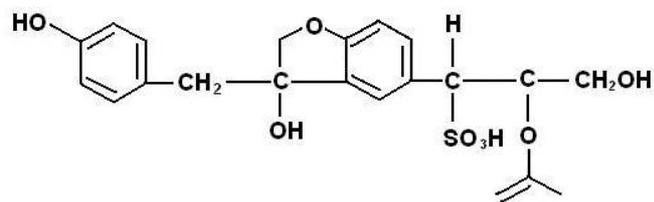


Figura 13 – Unidade estrutural de uma molécula de lignosulfonato.

Os lignosulfonatos comercialmente usados são compostos por aproximadamente 70% de sais lignosulfônicos e 30% de açúcares (MILESTONE, 1979). Segundo Collepari (1984), é possível submeter a lignina a um processo de fermentação, para remover parte do açúcar, responsável pelo retardamento de pega. Após este tratamento, o composto passa por um processo de sulfonatação através da adição de sulfito ou ácido sulfúrico, para que haja a incorporação do grupo sulfônico.

Os sais de lignosulfonato mais utilizados nas formulações dos aditivos redutores de água são os de cálcio e sódio, os quais substituem o hidrogênio no grupo sulfônico ( $\text{SO}_3\text{H}$ ) ou carboxílico ( $\text{COOH}$ ), ou seja, através do processo de neutralização do ácido pela adição dos álcalis, é formado o sal. Quando o sal entra na solução, acontece a ionização, de maneira que os esferóides externos ficam dotados por cargas negativas e o metal por positivas. De acordo com Odler (1998), apenas os grupos carboxílicos e sulfônicos situados na superfície do esferóide são ionizáveis (Figura 14). Além disso, o lignosulfonato de sódio apresenta maior grau de ionização na solução, em relação ao de cálcio. Isto justifica a maior demanda de concentrações de cálcio para obter a mesma redução de água de mistura, comparada com o sal de sódio. Desta forma, o grau de ionização é um indicador de qualidade do aditivo, já que possibilita a geração de cargas, e, com isto, a adsorção na superfície do cimento e a repulsão eletrostática.

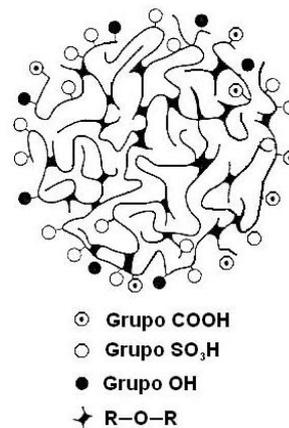


Figura 14 – Unidade de microgel do lignosulfonato.

### 3.1.2 Aplicações

Segundo Collepardi (1984), os aditivos redutores de água podem ser empregados no concreto visando três objetivos distintos: economizar o cimento, aumentar a fluidez e aumentar a resistência.

Quando o aditivo é incorporado a uma mistura cimentícia com a finalidade de economizar cimento, é necessária também a diminuição da quantidade de água, para garantir ao concreto o mesmo desempenho nas características de resistência e fluidez em relação à mistura de referência. A redução do teor de cimento, além de resultar em economia financeira, pode reduzir o calor de hidratação, característica relevante para concretagens realizadas em climas quentes ou estruturas maciças.

A ação dispersante do aditivo aumenta a fluidez da mistura se a proporção dos materiais for mantida. Este efeito é causado pela adsorção do aditivo na superfície dos grãos de cimento, dotando-os de cargas negativas e conduzindo a repulsão das partículas (Figura 15). Mollah et al. (1995) considera que a taxa de hidratação é melhorada na presença de lignosulfonato, em virtude da ação defloculante do aditivo permitir o aumento da área de contato do cimento com a água. Contudo, a posterior hidratação do cimento não é significativamente afetada (ODLER, 1988). O concreto de alta fluidez é desejável quando o seu lançamento é executado em locais que apresentam armaduras consideravelmente densas; neste caso o aditivo atua como plastificante.

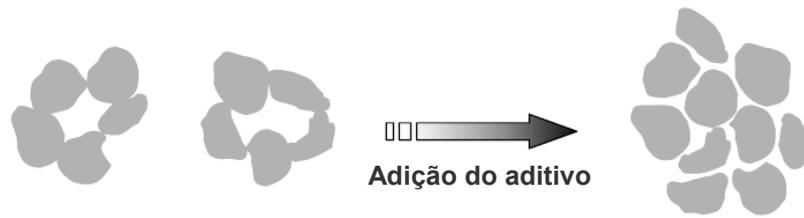


Figura 15 – Ação do aditivo redutor de água sobre a flocculação e deflocculação das partículas de cimento (Adaptado de NUNES, 2001).

Finalmente, a adição do composto possibilita a redução da relação a/c para o mesmo nível de fluidez e um aumento do grau de hidratação, resultando em um melhoramento das propriedades mecânicas e de durabilidade. Entretanto, se o aditivo redutor de água aumentar ou diminuir consideravelmente o grau de hidratação em idades iniciais, será designado por aditivo plastificante acelerador ou retardador, respectivamente (COLLERPARDI, 1984). Em geral, a utilização dos redutores de água no concreto implica em um melhoramento das propriedades físico-químicas do mesmo.

### ***3.1.3 Mecanismo da ação defloculante***

Embora haja conhecimento que a presença de aditivo altere o curso das reações de hidratação do cimento, o modo de ação ainda não está completamente entendido. Muitos mecanismos têm sido sugeridos para explicar o efeito plastificante dos redutores de água no concreto. Collerpardi (1984) reúne algumas proposições, baseado nos estudos dos pesquisadores identificados abaixo:

- a) redução da tensão superficial: de acordo com PRIOR e ADAMS, o sistema disperso é termodinamicamente instável, comparado ao floculado, pois a tensão superficial é reduzida, com isto a dispersão é facilitada pelas moléculas adsorvidas.
- b) adsorção de multi-camadas<sup>12</sup> das moléculas orgânicas: a presença de uma camada adsorvida de diferentes espessuras, correspondente a diversas camadas de moléculas de água, que podem mudar a energia de interação interpartículas. BANFIL acredita que tais adsorções multi-camadas podem promover uma estabilização estérica, menos importante na ação defloculante que a mudança no potencial zeta<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Adsorção de moléculas em mais de uma camada sobre o substrato, neste caso sobre o produto anidro.

<sup>13</sup> Representa o potencial elétrico no plano de cisalhamento. Quanto maior o potencial zeta, positivo ou negativo, maior a estabilidade da suspensão, superando a tendência natural de aglomeração (CYR, 1999 apud BETIOLI, 2007).

c) aumento do potencial eletro-cinético: medições em suspensões de água/cimento indicam que os grãos de cimento não migram em um campo elétrico, enquanto que em uma solução com lignosulfonato movem-se em direção ao ânodo, demonstrando a presença de uma carga negativa através da adsorção do aditivo na superfície das partículas de cimento. Esta carga negativa é atribuída aos ânions do lignosulfonato adsorvidos, e a dispersão do cimento à uma repulsão eletrostática mútua entre partículas (ERNSBERG; FRANCE).

d) formação de uma camada protetora de moléculas, o que dificulta a passagem de água: a carga negativa na superfície do cimento orienta o dipolo das moléculas de água, formando um hidrato protetor que previne a coagulação entre as partículas (PRIOR; ADAMS).

e) a liberação da água aprisionada entre as partículas de cimento floculadas: parte da água de mistura que estaria presa nos flóculos é liberada, contribuindo para o aumento da fluidez da pasta, em virtude da dispersão do cimento (SCRIPTURE).

f) efeito retardador da hidratação do cimento: de acordo com MASSAZZA e COSTA, a menor taxa de formação da etringita, causada pela presença de lignosulfonato, é responsável pela redução na demanda de água. Esta proposição é válida também para a redução da taxa de formação do aluminato hidratado hexagonal.

g) mudança na morfologia dos hidratos: uma diminuição do efeito de inter-travamento da etringita foi observada na presença do lignosulfonato. Isto pode ser causada por uma redução no tamanho dos cristais de etringita, resultando num melhoramento do comportamento reológico (MASSAZZA; COSTA).

### ***3.1.4 Efeitos***

Este item é direcionado somente ao estudo da influência do lignosulfonato nas propriedades do concreto, avaliadas no programa experimental, como: fluidez, perda de abatimento, incorporação de ar, tempos de pega e a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo.

#### **a) Estado fresco**

A presença de aditivos redutores de água pode modificar as propriedades reológicas do concreto. A mudança é principalmente devido aos efeitos físico-químicos das moléculas orgânicas dos aditivos na superfície do cimento.

A fluidez é aumentada através da incorporação de aditivos redutores de água, em concretos com uma determinada quantidade de água. Entretanto, dentre os diversos aditivos redutores de água, o lignosulfonato é um dos que apresenta a menor eficiência sobre o aumento do abatimento da mistura (COLLEPARDI, 1984). O efeito do aditivo redutor de água no aumento da fluidez do concreto é maior para misturas com maiores abatimentos, ou maiores quantidades de água.

Não existe um consenso sobre o efeito dos redutores de água na perda de abatimento. Tuthill et al. (1960) não verificaram perdas de abatimento expressivas em concretos tratados com esses redutores. Em contrapartida, pesquisas realizadas por Ramachandran (1981), citado por COLLEPARDI (1984), indicaram que em concretos com uma determinada relação a/c, apesar de o abatimento inicial aumentar com a adição de lignosulfonato, a taxa de perda de fluidez é maior na presença do aditivo. Entretanto, embora exista uma tendência dos concretos com aditivo redutor de água apresentarem uma maior perda de abatimento, estudos demonstraram que, o uso desses aditivos permite uma redução significativa na demanda de água adicional. O efeito indesejável da perda de fluidez pode ser minimizado através de uma sobredosagem, ou de uma superdosagem do aditivo.

De acordo com Tuthill et al. (1960), em virtude de sua formulação química, alguns redutores de água em dosagens normais causam uma incorporação de 2 a 3% de ar, o que pode ser aumentado para 7 a 8 %, se for usado aditivo em dosagem superior à recomendada pelo fabricante, principalmente em baixas temperaturas, em que a manutenção das bolhas de ar é maior.

Geralmente o lignosulfonato causa um atraso nos tempos de pega, devido à presença de impurezas como açúcares em sua composição Kennerley et al. (1960), citado por MILESTONE (1979).

#### b) Estado endurecido

A redução na quantidade de água, proporcionada pelos aditivos redutores de água, conduz a um aumento na resistência. No entanto, é necessário fazer algumas considerações a respeito do ganho de resistência ao longo do tempo. O efeito retardador do lignosulfonato na hidratação do cimento, geralmente ocasiona uma diminuição na resistência à compressão no 1º dia do concreto, em relação à referência para a mesma relação a/c, devido ao efeito retardante desse aditivo na reação de hidratação inicial. Entretanto, aos 28 dias, a maior resistência à compressão dos concretos com lignosulfonato, em comparação à referência de mesma relação a/c, é conseqüência não apenas da redução de água proporcionada por esses aditivos, como também do

maior grau de hidratação em idades avançadas, isto é, devido ao aumento da superfície de cimento disponível para hidratar. Desta forma, em virtude da melhoria no processo de hidratação, a resistência obtida em misturas com aditivo é maior para as mesmas relações a/c (COLLEPARDI, 1984).

### **3.2 Aditivos estabilizadores de hidratação**

De acordo com a classificação funcional dos aditivos, o aditivo estabilizador de hidratação do cimento (AEH) é um tipo de retardador. Embora os aditivos retardadores e os estabilizadores de hidratação exerçam influência no progresso da hidratação do cimento, há algumas distinções que devem ser compreendidas.

Estudos calorimétricos realizados por Paolini e Khurana (1998), evidenciaram que os retardadores convencionais exercem uma influência maior sobre as fases silicato. Portanto, estes compostos afetam mais o desenvolvimento da resistência inicial, em vez da reologia do concreto fresco, promovendo reduzida manutenção do abatimento e retardo de pega. Em contrapartida, o AEH é capaz de baixar a concentração de sulfato do cálcio na solução e retardar todos os minerais do clínquer.

#### ***3.2.1 Mecanismos de ação retardante***

O estabilizador é um agente ativo de superfície designado para inibir a nucleação na superfície de hidratos ricos em íons cálcio. Desta forma, o mecanismo de ação fundamenta-se na inibição da nucleação do C-S-H e CH. Quando o AEH é adicionado juntamente com a água de amassamento, diminui a nucleação e formação do C-S-H; se adicionado durante ou após o período de indução, diminui a nucleação e crescimento do C-S-H e CH. Quando os núcleos já estão formados, o estabilizador, além de retardar o crescimento dos hidratos, altera a morfologia externa dos hidratos subseqüentemente formados (PAOLINE; KHURANA, 1998).

Em termos práticos, a capacidade do AEH de retardar o crescimento de núcleos já formados, implica na possibilidade do material ser estabilizado algumas horas depois de misturado. O curso da hidratação é retomado quando um aditivo ativador é adicionado, ou quando o estabilizador é completamente consumido, de maneira que, o processo de hidratação recomeça regularmente com o endurecimento e consideráveis ganhos de resistência final do concreto estabilizado.

De acordo com o fabricante do AEH<sup>14</sup> empregado nos experimentos deste trabalho, sua natureza química é composta por uma solução aquosa de sais ácidos hidrocarboxilados e carboidratos. RICKERT (2000) destaca que, aditivos de base ácido fosfônico podem ser utilizado em altos teores em aplicações relacionadas à reciclagem de concreto. Embora não existam na literatura informações detalhadas sobre a interação entre o cimento com este tipo de aditivo, o pesquisador sugere que, o ácido fosfônico forma complexos com os íons cálcio. Assim uma camada solúvel de fosfonato de cálcio é produzida na superfície da partícula, bloqueando o acesso da água na superfície do cimento e, conseqüentemente, retardando as reações de hidratação do cimento.

### ***3.2.2 Efeitos***

Os aditivos retardadores são empregados nos materiais cimentícios, principalmente para prolongar o tempo de início de pega. Este efeito proporciona uma adequação das características reológicas das misturas, de acordo com o desejado. Estes aditivos interferem fortemente nas reações iniciais de hidratação e nas características físicas dos compostos do cimento.

Em virtude da escassez de trabalhos científicos relacionados à influência do AEH em águas de lavagem, este item também reúne os resultados de várias pesquisas quanto aos efeitos das águas de lavagem sem AEH, nas propriedades de concretos e argamassas, pois estas servem como parâmetro de comparação para os resultados obtidos experimentalmente nesta pesquisa.

#### ***3.2.2.1 Águas de lavagem com AEH***

Através de estudos realizados em argamassa, Peneirol (2006) concluiu que as águas de lavagem estabilizadas, com teores 0,6% e 1% m.c. de AEH, têm pouca influência sobre a consistência e o teor de vazios em relação à mistura de referência. Além disso, o AEH não exerce influência nociva sobre a resistência à compressão, embora tenha sugerido estudos mais aprofundados para a consolidação desta afirmativa.

Calicho (2005) constatou o aumento do abatimento do concreto com água de lavagem estabilizada, em relação à referência, somente quando foi empregada uma quantidade expressiva de AEH (16% m. c.) sendo que a utilização do AEH não prejudicou a resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias.

---

<sup>14</sup> Grace Brasil Ltda.

A maioria dos estudos experimentais indica que a presença de águas de lavagem estabilizadas sobre as propriedades do concreto e argamassa não são prejudiciais, resultando na possibilidade de reutilização do material proveniente da lavagem do caminhão-betoneira, na produção de novos concretos.

### 3.2.2.2 Águas de lavagem sem AEH

Chatveera et al. (2006) estudaram o efeito de diferentes percentuais de substituição (0 a 100% em massa) de águas de lavagem por água potável, nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto. Os pesquisadores concluíram que, o aumento da porcentagem de substituição da água de lavagem sobre a água potável reduziu o abatimento, devido o aumento da quantidade de partículas sólidas, o que aumentou a demanda de água a ser adsorvida na superfície e absorvida dentro das partículas. A partir de 40% de substituição da água de lavagem por água potável, houve uma diminuição da resistência à compressão, pois o aumento da alcalinidade da matriz contribuiu para o aumento da espessura da camada localizada na zona de transição, causando o enfraquecimento da ligação entre o agregado e a pasta de cimento.

Su et al. (2002) verificaram a influência de águas de lavagem com diferentes concentrações nas propriedades de concretos e argamassas. Os resultados obtidos evidenciaram uma aceleração do tempo de pega nas argamassas com maior concentração de sólidos, atribuída a maior quantidade de álcalis, cimento parcialmente hidratado e finos originados da operação de lavagem do caminhão. Embora as resistências das argamassas tenham sido ligeiramente inferiores à de referência, as misturas atenderam as exigências da ASTM C 94 (2004), que estabelece uma resistência à compressão mínima de 90% da mistura com água de lavagem em relação à referência. Quanto aos concretos, foi concluído que as águas de lavagem podem ser utilizadas em sua produção, pois não ocasionaram efeito significativamente adverso sobre o abatimento, o teor de ar incorporado e a resistência à compressão.

Chini et al. (2001) investigaram a reutilização de águas de lavagem de caminhões-betoneira, provenientes de duas centrais dosadoras diferentes, para a produção de concreto. Os resultados obtidos indicaram que a água de lavagem não afetou significativamente os tempos de pega, as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto.

Já, SANDROLINI E FRANZONI (2001) variaram a concentração de sólidos das águas de lavagem, para verificar a influência de sua utilização nas propriedades mecânicas e microestruturais em concretos e argamassas. Os resultados no concreto indicaram uma ligeira

redução no abatimento, o que foi atribuído à adição de finos e à redução da relação a/c. No entanto, a resistência à compressão não foi inferior ao limite recomendado pela ASTM C 94 (2004).

### **3.2.3 Aplicações**

O emprego do AEH na estabilização de águas de lavagem, proveniente de caminhões-betoneira foi descrita no Capítulo 1. Desta forma, nos subitens seguintes, estão descritas outros tipos de aplicações do AEH.

#### **3.2.3.1 Concreto compactado com rolo**

A característica marcante do concreto compactado com rolo (CCR) é a baixa quantidade de água e o baixo consumo de aglomerante, por isso, o material é consolidado por meio de cargas vibratórias, de geralmente 10 toneladas. Nos CCR's convencionais, mesmo que a compactação das camadas seja realizada o mais breve possível, a presença de juntas frias é inevitável; portanto sua preparação requer que a superfície subjacente seja constantemente mantida em condição úmida. Se necessário, deve-se proceder a uma limpeza antes da colocação da próxima camada. Além disso, a ligação entre as camadas requer a aplicação de argamassa com elevada fluidez e alto consumo de cimento, visando uma maior aderência entre as juntas, através do preenchimento dos poros na superfície (PAOLINI; KHURANA, 1998).

Pesquisas conduzidas pela Water-ways Experimental Station investigaram a possibilidade do uso de CCR estabilizado, sem a necessidade de tratamento excessivo de juntas e uso de argamassa, visando uma considerável economia na execução deste método construtivo. Resultados obtidos por Paolini e Khurana (1998) indicaram que o uso de AEH permite ao CCR um retardamento por longos períodos. Estudos em laboratório e em obra demonstraram que as resistências ao cisalhamento entre as camadas foram discretamente aumentadas quando eram mantidas frescas, em relação às camadas endurecidas que foram tratadas com argamassa.

#### **3.2.3.2 Concreto projetado via úmida**

O uso de AEH em concreto projetado data dos anos 90; seu emprego compreende túneis, mineração ou situações de reparo, onde o concreto projetado é especificado. A adição de estabilizadores em concretos projetados possibilita maiores períodos em que o concreto

permanece fresco, permitindo um comportamento mais controlado quanto à manutenção do abatimento, facilidade de bombeamento e projeção. O efeito estabilizador do concreto projetado pode ser interrompido a qualquer momento pelo uso de aditivos aceleradores, os quais promovem pega rápida e rápido desenvolvimento de resistências iniciais à mistura após sua projeção. Em virtude das melhorias nas características da mistura e, conseqüentemente, nos benefícios de aplicação, as propriedades no estado endurecido do concreto projetado estabilizado são melhoradas (PAOLINI; KHURANA, 1998).

### 3.2.3.3 Estabilização de concretos retornados

O uso do AEH possibilita o reaproveitamento de concretos retornados à central dosadora, através do controle da taxa de hidratação do cimento, refletindo na estabilização da mistura no estado fresco. De acordo com Paolini e Khurana (1998), as causas de devolução do concreto fresco podem ser devidas à: perda excessiva de abatimento durante o transporte, o vencimento do prazo de utilização do concreto (resultante de problemas como a quebra do equipamento de bombeamento) planejamento inadequado da encomenda pelo cliente, inadequação da consistência aos requisitos da obra e erro na requisição do volume total de concreto.

Pesquisas conduzidas por Borger et al. (1994) indicaram que a resistência à compressão, de concretos estabilizados, são tão boas ou melhores que as misturas de referência. Analogamente, Paolini e Khurana (1998) obtiveram valores de resistência à compressão em concretos com AEH, não inferior a 90% em relação à mistura de referência. Benini (2005) indicou que os resultados de resistência à compressão dos concretos estabilizados atingiram valores equivalentes ao concreto de referência, a partir dos 7 dias de idade; aos 28 dias, os resultados foram similares ao concreto de referência.

### 3.2.3.4 Concretagens a longas distâncias

O AEH ainda é usado quando as concretagens estão localizadas a longas distâncias da central. Sua utilização proporciona um controle mais previsível do retardo de pega desses concretos, principalmente em dias quentes, sem prejudicar propriedades futuras devido à adição de água para recuperar a perda excessiva de abatimento ou o atraso de pega (BENINI, 2005).

## **4 MÉTODOS CALORIMÉTRICOS**

A necessidade da determinação do início das reações de hidratação do cimento em água de lavagem, para a obtenção dos teores mínimos e de segurança de AEH, conduziu à realização de ensaios calorimétricos.

Basicamente, existem dois tipos de calorímetros: os adiabáticos (ou semi-adiabáticos), onde o calor de hidratação é obtido de forma indireta, medindo-se o acréscimo de temperatura da amostra; e os isotérmicos, onde o calor de hidratação é medido diretamente por sensores de fluxo de calor.

Neste trabalho, as técnicas utilizadas foram através dos métodos de calorimetria semi-adiabática e isotérmica.

### **4.1 Calorimetria semi-adiabática**

Diferente da calorimetria isotérmica, que mede a taxa de energia liberada pelas reações de hidratação do cimento, a calorimetria semi-adiabática mede o acréscimo de temperatura, que é utilizada para a obtenção da quantidade de calor produzida pelas reações. Para tanto, é necessário conhecer o calor específico da amostra e a capacidade térmica do calorímetro, obtida a partir de sua calibração.

No calorímetro adiabático existe um isolamento ativo (aquecimento controlado), que neutraliza a perda de calor para o ambiente, enquanto no calorímetro semi-adiabático o isolamento é parcial, ocorrendo perdas de calor para o ambiente. Esta troca de calor deve ser quantificada em uma calibração prévia. Diante disso, um calorímetro é denominado semi-adiabático quando existem trocas de calor, provenientes do processamento das reações entre o recipiente contendo a amostra e seu envolvente (neste caso, o ambiente).

#### 4.1.1 Cálculo da quantidade de calor

A transferência de calor da água de lavagem para o ambiente foi considerada em regime transiente, isto é, a temperatura varia com o tempo. Através da expressão abaixo, constata-se que o acréscimo da energia interna juntamente com as perdas de calor são responsáveis pela geração de uma taxa de energia (ou potência).

$$\mu''' = \underbrace{C_t \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}}_{\text{variação de energia}} + \underbrace{h \cdot A \cdot (T - T_\infty)}_{\text{Perdas de calor}} \quad (8)$$

Onde:

$\mu'''$  : taxa de energia gerada (W);

$\Delta T$  : variação da temperatura da água de lavagem (K);

$\Delta t$  : variação do tempo (s).

$T - T_\infty$  : variação da temperatura da água de lavagem (K).

$C_t$ : capacidade térmica total [capacidade térmica do calorímetro + (calor específico da amostra multiplicado pela massa)] (J/K);

$h \cdot A$  : coeficiente de transferência de calor (W/m<sup>2</sup> K);

Portanto, a energia (em Joules) é obtida através da multiplicação da taxa de energia gerada pela variação do tempo (em segundos), como segue:

$$E = \mu''' \cdot \Delta t \quad (9)$$

Calculados os referidos valores, é possível plotar a taxa de energia por massa em função do tempo, bem como a quantidade de energia acumulada em função do tempo.

#### 4.1.2 Calibração

Antes de se proceder ao ensaio de evolução de temperatura das águas de lavagem, é necessário recorrer inicialmente à calibração do calorímetro, isto é, determinar a capacidade térmica do calorímetro, obtida através da seguinte expressão:

$$C_{\text{cal}} = m \cdot c \quad (10)$$

Este método de calibração consiste no seguinte princípio: toda a quantidade de calor perdida pela água quente é absorvida pela água fria e pelo calorímetro. Esta consideração é expressa através da equação:

$$m_{\text{quente}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{quente}} = m_{\text{fria}} \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T_{\text{fria}} + \underbrace{C_{\text{cal}}}_{\text{incógnita desejada}} \cdot \Delta T_{\text{cal}} \quad (11)$$

Onde:

$\Delta T$ : variação de temperatura (K). A variação da água fria é exatamente a mesma sofrida pelo calorímetro;

$c_{\text{água}}$ : calor específico da água (4,184 J/g K);

$C_{\text{cal}}$ : capacidade térmica do calorímetro, obtida através da média de duas determinações, (J/K).

A orientação do fluxo de calor é no sentido dos corpos mais quentes para os mais frios, portanto sua direção é do interior do calorímetro para o ambiente externo, já que a temperatura da amostra é superior à temperatura ambiente. Para o cálculo do fluxo de calor<sup>15</sup>, a área e a espessura de todas as paredes dos calorímetros foram consideradas iguais, assim optou-se pela determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h \cdot A$ ). Como a constante total ( $C_t$ ) é a soma da capacidade térmica do calorímetro e da amostra, determina-se o coeficiente de transferência de calor, expresso por:

$$h \cdot A = \frac{C_t \cdot (T_o - T)}{\Delta t \cdot (T - T_{\infty})} \quad (12)$$

Onde:

$h \cdot A$ : coeficiente de transferência de calor (W/m<sup>2</sup> K);

$T_o - T$ : variação das temperaturas inicial e final da mistura (K);

$T - T_{\infty}$ : variação da temperatura final da mistura (T) e do ambiente ( $T_{\infty}$ ). (K).

---

<sup>15</sup> O cálculo do fluxo de calor e da quantidade de calor foram baseadas em Incropera e Witt (1992).

#### 4.1.3 Possível fonte de erro

Uma considerável fonte de erro é a associação da medição do acréscimo de temperatura da amostra com o início das reações de hidratação, pois é possível que as reações do cimento tenham se processado antes que o sistema de aquisição de dados compute o acréscimo de temperatura real da mistura. Isto porque, as fugas de calor do sistema para o ambiente podem ser tão altas, que a variação de temperatura pode ser menor do que a correspondente à realidade (WADSÖ, 2003).

#### 4.2 Calorimetria isotérmica

A técnica isotérmica fornece diretamente a taxa de energia produzida na reação de hidratação sob condições de temperatura constante. A medição é por meio de um transdutor de fluxo de calor. Neste trabalho foi utilizado um novo tipo de transdutor de fluxo de calor, (GÜTHS et al., 1995), chamado “a gradiente tangencial”, cujo princípio consiste desviar as linhas de fluxo de calor, de modo a gerar um gradiente de temperatura em um plano tangencial ao plano de medição. Tal gradiente é medido por termopares planares a eletrodos depositados (realizados a partir de técnicas de fotogravura), ligados em série. Cada um dos termopares converte a diferença de temperatura em força eletromotriz, a qual pode ser medida e registrada durante a realização do experimento.

Conforme a Figura 16, o transdutor geralmente tem a forma de uma placa lisa e deve medir o fluxo de calor que o atravessa. O resultado do fluxo de calor obtido no experimento é expresso em  $W/m^2$ , o que representa a taxa de energia transferida através de uma dada superfície.

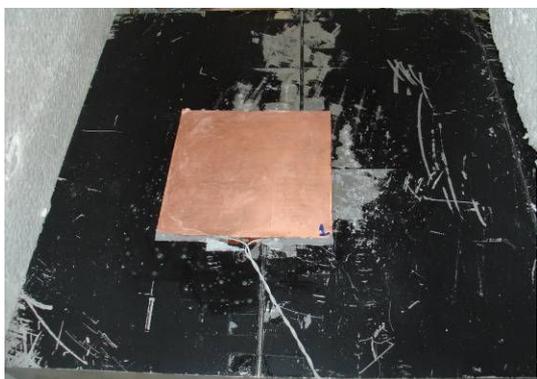


Figura 16 – Transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial (GÜTHS, 2006).

O transdutor é fixado sobre um trocador de calor com temperatura controlada, sendo a amostra com cimento depositada sobre o dispositivo e acomodada dentro de um bloco vazado de poliestireno expandido (EPS). Um segundo aparato é montado de maneira simétrica, contendo apenas água potável no recipiente, chamado de referência, o qual mede as trocas de calor com o ambiente, conforme mostrado na Figura 17. A perda de calor é subtraída do dispositivo de medição, de forma a se obter somente o calor de hidratação da amostra.



(a)



(b)



(c)

Figura 17 – Esquema do calorímetro isotérmico. (a) Cubos vazados de poliestireno expandido (EPS) onde são acomodadas as amostras e, transdutores não fixados sobre o trocador de calor. (b) Transdutor fixado sobre o trocador de calor, dentro do calorímetro isotérmico. (c) Dois cubos vazados de EPS sobre o trocador de calor, acomodados no interior do calorímetro isotérmico aberto.

### 4.2.1 Calibração

Na Figura 18, o fluxo de calor que atravessa o fluxímetro a calibrar ( $q_{cal}$ )<sup>16</sup> é dado pela seguinte expressão:

$$q_{cal} = q_{res} - q_{aux} \quad (13)$$

Onde:  $q_{res}$  é o de fluxo de calor gerado pela resistência aquecedora e  $q_{aux}$  é o fluxo de calor medido pelo transdutor auxiliar. A constante de calibração ( $C$ ) de um fluxímetro é, então, expressa por:

$$C = \frac{q_{res} - q_{aux}}{V_{cal}} \quad (14)$$

Onde:  $V_{cal}$  é a tensão medida no sensor a calibrar.

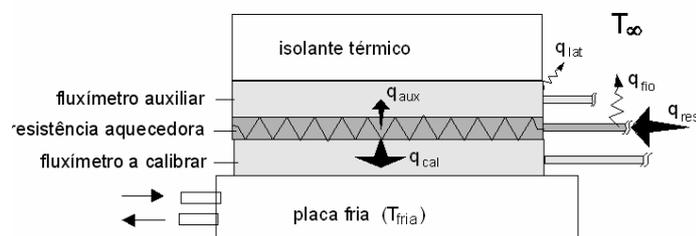


Figura 18 – Dispositivo de calibração “a transdutor auxiliar” (GÜTHS et al, 1998).

### 4.2.2 Possíveis fontes de erro

O método assume que o fluxo de calor é uniforme e perpendicular ao sensor de superfície. Entretanto, existe a possibilidade de ocorrer erro relacionado ao sensor, quando os sensores são sensíveis ao fluxo de calor lateral ou quando o calor flui em outra direção.

Um erro de aplicação pode acontecer durante o processo de calibração, pois ocorrem fugas de calor pelas superfícies laterais e através dos cabos de conexão, em função da diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança. O desempenho dos transdutores está fortemente relacionado com as incertezas envolvidas no processo de calibração (GÜTHS et al., 2006).

<sup>16</sup> Método de calibração realizada de acordo com GÜTHS et al., 1998.

### 4.3 Vantagens e desvantagens dos métodos

Os métodos de medição do calor de hidratação das reações do cimento têm várias particularidades, dentre as quais se destaca:

No método de calorimetria semi-adiabática, recomenda-se que se proceda a calibração do calorímetro a cada vez que a amostra seja ensaiada. Além disso, por ser uma técnica que mede a variação de temperatura da amostra, para o cálculo da quantidade de calor das reações é necessário conhecer a capacidade térmica do calorímetro, o calor específico da amostra, e considerar as fugas de calor das reações para o ambiente. Na prática a determinação desses valores não é simples, à exceção do calor específico da amostra, que pode ser estimado. O método apresenta como vantagem, a possibilidade de medição da variação de temperatura em grandes amostras, portanto, o ensaio pode ser realizado em concretos ou argamassas (WADSÖ, 2003).

Na técnica de calorimetria isotérmica, é efetuada a medição direta da taxa de calor produzida na reação de hidratação, não havendo, portanto, necessidade de conhecer o calor específico da amostra ou a capacidade térmica do calorímetro. Esta técnica apresenta muita estabilidade e não há necessidade de calibração muitas vezes ao ano. Com a aquisição instantânea dos dados, é possível a visualização do primeiro picos de liberação de calor provenientes da dissolução dos compostos e formação de etringita. Segundo Wadsö (2003), os calorímetros isotérmicos são mais sensíveis em relação aos outros métodos para o estudo de hidratação do cimento, uma vez que a temperatura das reações é mantida. A desvantagem do método isotérmico é a realização dos ensaios em pequenas amostras. Por isso, para medições em concreto, há necessidade de dispor de calorímetros adiabáticos ou semi-adiabáticos, a menos que o peneiramento do material seja efetuado.

## **5 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental foi dividido em duas etapas. A primeira compreendeu o estudo em águas de lavagem de cimento estabilizado com AEH, através dos métodos de calorimetria semi-adiabática e isotérmica. Embora o material a ser estabilizado seja o cimento e não a água, por uma questão de simplificação, é denominado no decorrer deste trabalho por água de lavagem quando não contiver AEH e, água de lavagem estabilizada quando apresentar AEH em sua composição. O objetivo desta primeira etapa foi o estabelecimento de um método para a otimização do emprego do AEH em águas de lavagem. A segunda fase, do programa experimental, correspondeu à aplicação das águas de lavagem estabilizadas com diferentes teores de AEH no concreto, visando à verificação do efeito do material reaproveitado em algumas de suas propriedades, no estado fresco e após o endurecimento.

Diante do exposto, pretendeu-se contribuir com o estabelecimento de um procedimento racional para a avaliação e otimização do uso de AEH. Os ensaios realizados em águas de lavagem foram executados no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais (LMPT), do Departamento de Engenharia Mecânica. A produção dos concretos foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), do Departamento de Engenharia Civil. Ambos estão situados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### **5.1 Parâmetros fixos**

#### ***5.1.1 Proporcionalamento das misturas***

##### **5.1.1.1 Água de lavagem**

A relação a/c das águas de lavagem é muito variável, pois depende da quantidade de água adicionada na lavagem do caminhão. Nesta pesquisa o valor foi estabelecido em 10, pois se considerou um incremento de 200 litros de água no balão do caminhão-betoneira com capacidade de 8 m<sup>3</sup>. Este consumo de água é indicado para a dispersão do AEH em todo o interior do balão. Desta forma, a quantidade de cimento presente na água de lavagem é muito pequena.

O uso de aditivo redutor de água de base lignosulfonato é bastante freqüente na maioria dos concretos produzidos atualmente. Por isso, foi decidido verificar seus efeitos residuais na água de lavagem, onde o teor foi fixado em 0,6% m.c.<sup>17</sup>, de acordo com a dosagem mínima recomendada pelo fabricante. O tempo de colocação do aditivo está especificado no item 5.4.3.

#### 5.1.1.2 Concreto

Foram produzidos dois concretos com classes de resistência diferentes, um convencional e outro de maior resistência em relação ao convencional, denominado simplificada por concreto de maior resistência. Os traços unitários, em massa, foram fixados em 1 : 1,9 : 1,52 : 3,66 : 0,71 (cimento : areia média : areia fina : brita : a/c), para o concreto convencional e, em 1 : 1,18 : 0,94 : 2,27 : 0,48, para o concreto de maior resistência. O teor de aditivo redutor de água foi estabelecido em 0,6% m.c., de acordo com a dosagem mínima recomendada pelo fabricante. Estes valores foram baseados em proporções utilizadas por uma concreteira de Florianópolis. A seqüência de mistura e o tempo de colocação do aditivo está especificado no item 5.5.1.

A intenção em produzir dois tipos de concretos foi elucidar os questionamentos das centrais dosadoras sobre os efeitos do reaproveitamento de águas de lavagem na produção de concretos, com classes de resistência diferentes.

#### **5.1.2 Porcentagem da água de lavagem**

A porcentagem de água de lavagem foi fixada. Portanto, foram considerados 212 litros de água residual em um caminhão betoneira de 8 m<sup>3</sup>. Sabendo-se que foram produzidos 46 litros de concreto por betonada, através de uma regra de três simples chega-se ao teor de substituição de 1,22 litros de água de lavagem por betonada. Com base no consumo de água total (APÊNDICE 1) foram obtidos os valores de 14% de substituição em massa de água estabilizada por água potável, para o concreto convencional e, 13,6% para o de maior resistência. Cabe ressaltar que, como a presença do cimento é desconsiderada, a substituição da parcela da água de amassamento pela estabilizada foi realizada em massa.

---

<sup>17</sup> Porcentagem total de aditivo em relação à massa de cimento.

### ***5.1.3 Intervalo de adição do AEH***

Foi definido o intervalo de 4 horas para adição do AEH, tempo este que retrata uma realidade prática bastante desfavorável, pois pode ocorrer imprevisto no deslocamento do caminhão, devido uma longa distância entre a obra e a central dosadora ou ainda em cidades onde o trânsito é intenso.

### ***5.1.4 Tipo de cimento***

Nesta pesquisa, foi empregado o Cimento de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos (CPV-ARI-RS). A elevada finura deste tipo de cimento provoca grande liberação de calor, facilitando a execução dos ensaios de calorimetria.

### ***5.1.5 Período de estabilização***

A estabilização da água de lavagem foi fixada em 16 horas, para o período de uma noite e, 64 horas para um fim de semana. Os referidos períodos de estabilização representam situações em que a água de lavagem permanece armazenada no interior do caminhão-betoneira para a posterior produção do concreto, no dia subsequente ou após o fim de semana.

## **5.2 Variável independente**

### ***5.2.1 Teor de AEH***

Determinou-se a dosagem mínima de AEH capaz de estabilizar a reação de hidratação do cimento, presente nas águas de lavagem por 16 horas (uma noite) e 64 horas (um fim de semana). Após a obtenção do teor mínimo, foi determinado um teor que proporcionasse estabilização à água de lavagem, com determinada margem de segurança (teor de segurança). Portanto, foram somadas 8 horas nos períodos de estabilização de 16 e 64 horas, o que resultou em 24 e 72 horas. Em síntese, foi aumentada a quantidade de aditivo, objetivando permitir uma margem de segurança no tempo de estabilização da água de lavagem.

Além dos teores mencionados, foram consideradas as dosagens de AEH recomendadas pelo fabricante, sendo os valores calculados com base no teor de cimento estimado, presente no balão de um caminhão-betoneira de 8 m<sup>3</sup>, após descarga do concreto. Desta forma, os teores obtidos foram de 5,6% m.c. para uma noite de estabilização e, 11,2% m.c. para um fim de semana. A

obtenção desses valores está descrita no APÊNDICE 2. O estudo de diversos teores de AEH em águas de lavagem é relevante, pois é possível que o excesso de aditivo ocasione não apenas prejuízo financeiro, como também efeitos indesejados às propriedades funcionais do concreto.

### 5.3 Características dos materiais utilizados

#### 5.3.1 Cimento

O cimento (CPV-ARI-RS) utilizado na produção das águas de lavagem e no preparo dos concretos convencionais, da marca Votoran, foi originado do mesmo lote de fabricação. Suas características, físicas e químicas, estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. O cimento empregado na produção dos concretos de maior resistência foi proveniente de outro lote, sendo suas características físicas e químicas descritas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 2 – Caracterização física do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante).

	Item de controle	Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Físicos	Material Retido #200 (mesh)	%	0,11	0,04	0,00	0,30
	Material Retido #325 (mesh)	%	1,56	0,42	0,70	2,40
	Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4638	96	4620	5030
	Água de Consistência	%	29,25	0,18	28,80	29,50
	Início de Pega	horas	03:18	00:11	03:10	03:45
	Fim de Pega	horas	04:19	00:11	04:10	04:50
	Expansibilidade a Quente	mm	0,52	0,51	0,00	1,50
	Resistência R1	MPa	24,27	0,84	22,70	25,70
	Resistência R3	MPa	33,04	1,00	31,20	34,50
	Resistência R7	MPa	37,73	0,91	36,10	39,10
Resistência R28	MPa	47,05	0,78	45,70	48,80	

OBS: Resistências R28 referem-se ao mês de junho de 2006.

Tabela 3 – Caracterização química do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante).

	Item de controle	Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Químicos	Perda ao Fogo	%	3,45	0,20	3,14	3,92
	SiO <sub>2</sub>	%	24,35	0,36	23,48	25,12
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	7,68	0,25	7,20	8,10
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,27	0,04	3,15	3,35
	CaO	%	52,14	0,53	51,04	53,12
	MgO	%	5,53	0,09	5,39	5,72
	K <sub>2</sub> O	%	1,10	0,02	1,03	1,15
	Na <sub>2</sub> O	%	0,07	0,00	0,07	0,07
	SO <sub>3</sub>	%	3,12	0,06	2,92	3,24
	Resíduo Insolúvel	%	13,49	0,86	11,52	15,09
	CO <sub>2</sub>	%	2,51	0,22	2,02	2,63

\* Massa Específica deste cimento: 2,99 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4 – Caracterização física do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante).

	Item de controle	Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Físicos	Material Retido #200 (mesh)	%	0,09	0,04	0,0	0,1
	Material Retido #325 (mesh)	%	1,19	0,47	0,3	2,0
	Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4935	124,6	4650	5160
	Água de Consistência	%	30,84	0,32	30,2	31,4
	Início de Pega	horas	206	13	180	220
	Fim de Pega	horas	271	15	240	290
	Expansibilidade a Quente	mm	0,59	0,37	0	1,5
	Resistência R1	MPa	23,92	1,41	22,10	26,00
	Resistência R3	MPa	32,59	1,36	30,50	35,20
	Resistência R7	MPa	37,10	1,14	35,30	38,70
	Resistência R28	MPa	47,42	0,70	45,50	48,40

OBS: Resistências R28 referem-se ao mês de fevereiro de 2007.

Tabela 5 – Caracterização química do CPV-ARI-RS (Dados fornecidos pelo fabricante).

	Item de controle	Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
<b>Ensaio Químicos</b>	<b>Perda ao Fogo</b>	%	3,52	0,22	2,93	3,99
	<b>SiO<sub>2</sub></b>	%	22,84	0,91	21,48	24,24
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	6,91	0,55	5,39	7,78
	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	3,28	0,10	3,11	3,50
	<b>CaO</b>	%	51,65	0,80	50,45	53,37
	<b>MgO</b>	%	5,60	0,13	5,39	5,83
	<b>K<sub>2</sub>O</b>	%	1,10	0,05	1,02	1,20
	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	%	0,06	0,00	0,06	0,07
	<b>SO<sub>3</sub></b>	%	3,68	0,22	2,96	4,03
	<b>Resíduo Insolúvel</b>	%	12,73	12,73	10,65	15,13
	<b>CO<sub>2</sub></b>	%	2,33	2,33	2,09	3,00

\* Massa Específica deste cimento: 2,96 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.3.2 Agregados

A areia fina utilizada no preparo das misturas foi natural de cava, proveniente do município de Palhoça (SC); a areia média industrial (resíduo originado da britagem) e a brita de origem granítica foram oriundas do município de Biguaçu (SC). Os resultados da caracterização dos agregados estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 e, suas curvas granulométricas na Figura 19.

Tabela 6 – Caracterização física dos agregados miúdos.

Abertura das peneiras (mm)		Areia Fina	Areia Média	
		% média acumulada		
<b>Granulometria</b>	2,4	-	7,1	<b>Referências normativas</b>
	1,2	-	30,3	
	0,6	0,5	56,0	
	0,3	4	74,4	
	0,15	83,1	87,3	
	Fundo	100	100,0	
<b>Diâmetro máx. característico (mm)</b>		0,3	4,8	NBR NM 248 (2003)
<b>Diâmetro mín. característico (mm)</b>		< 0,15	< 0,15	
<b>Módulo de Finura</b>		0,88	2,55	
<b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>		2,65	2,65	Método do Picnômetro
<b>Massa unitária no estado solto (kg/dm<sup>3</sup>)</b>		1,45	1,58	NBR NM 45 (2006)
<b>Material Pulverulento (%)</b>		1,65	5,31	NBR NM 46 (2003)

Tabela 7 – Caracterização física do agregado graúdo.

Abertura das peneiras (mm)		Brita	
		% média acumulada	
<b>Granulometria</b>	19	0	<b>Referências normativas</b>
	12,5	49	
	9,5	84,2	
	6,3	98,4	
	4,8	99,3	
	Fundo	100,0	
<b>Diâmetro máx. característico (mm)</b>		19	NBR NM 248 (2003)
<b>Diâmetro mín. característico (mm)</b>		6,3	
<b>Módulo de Finura</b>		1,84	
<b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>		2,63	Método da Balança Hidrostática
<b>Massa unitária no estado solto (kg/dm<sup>3</sup>)</b>		1,41	NBR NM 45 (2006)
<b>Material Pulverulento (%)</b>		0,21	NBR NM 46 (2003)

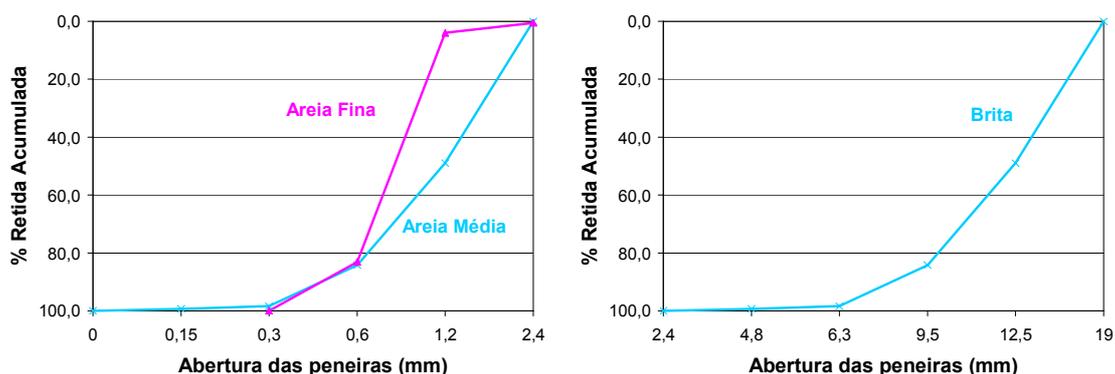


Figura 19 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos e graúdo.

### 5.3.3 Aditivos

Para a realização do experimento foram empregados dois tipos de aditivos químicos, fornecidos pela Grace Brasil: o aditivo estabilizador de hidratação e o aditivo redutor de água, comercialmente denominados por RECOVER e MIRA 77, respectivamente. Suas principais características foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização dos aditivos químicos (Dados fornecidos pelo fabricante).

Nome comercial	RECOVER	MIRA 77
Principal agente químico	Solução aquosa de sais ácidos hidrocarboxilados e carboidratos	Lignosulfonato de sódio
Estado físico/Aparência	Líquido límpido verde escuro	Líquido marron escuro
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,12	1,19
pH (20°C)	6,5	8,5
Teor de Sólidos (%)	21	40
Dosagem recomendada pelo fabricante (teor total)	1 a 2 litros por caminhão (para uma noite e um fim de semana, respectivamente)	0,6 a 1,2 % m.c.

## 5.4 Estudo em água de lavagem

### 5.4.1 Calorimetria semi-adiabática

A água de lavagem é um material que requer alguns cuidados pelo fato das concentrações de finos e aditivos não serem conhecidos, e variarem em função da quantidade de água adicionada no caminhão-betoneira. Em virtude das particularidades do material, foram realizadas algumas verificações preliminares, através do método semi-adiabático, para elucidar alguns questionamentos e definir a metodologia de produção das águas de lavagem.

Estabelecido os critérios de ensaio, passou-se para a verificação da variabilidade do ensaio, bem como para a determinação dos tempos de estabilização para os teores de 0% a 2,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%, visando à comparação com os resultados obtidos pelo método isotérmico, isto é, verificar se é possível associar o início das reações de hidratação, localizadas nas curvas calorimétricas, com as curvas de evolução de temperatura. Todas as verificações realizadas através do método semi-adiabático estão descritas no item 5.4.4.

#### 5.4.1.1 Medição da evolução de temperatura

O ensaio foi realizado em uma sala climatizada sob a temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . A evolução da temperatura das águas de lavagem foi medida através de termopares tipo K, com erro de  $2,2^{\circ}\text{C}$ , os quais eram conectados a um sistema de aquisição de dados de marca Agilent Technologies 34970A. Os dados eram coletados por meio do software BenchLink Data Logger.

Antes da realização dos ensaios, os materiais utilizados no preparo das amostras eram separados até atingir o equilíbrio térmico com o ambiente. Em virtude da água de lavagem apresentar uma quantidade de cimento bastante reduzida, as amostras foram produzidas em um recipiente plástico, com capacidade de armazenamento para 5 litros de água. Por isso, foi necessário confeccionar calorímetros semi-adiabáticos de poliestireno expandido (EPS), de forma cúbica, revestidos por papel alumínio, com dimensões externas de (44x44x49) cm e internas de (24x24x18) cm, para proporcionar o isolamento térmico à mistura (Figura 20). As dimensões da tampa do calorímetro estão especificadas na Figura 21.



Figura 20 – (a) Dimensões externas do calorímetro em fase de execução. (b) Dimensões internas do calorímetro concluído.



Figura 21 – Tapa do calorímetro semi-adiabático. (a) Dimensões externas. (b) Dimensões internas.

Após o preparo da água, a amostra foi isolada dentro dos blocos de poliestireno expandido, onde foram imersos os termopares. Finalmente, o calorímetro foi tampado e a variação de temperatura em função do tempo, proveniente das reações de hidratação, foi monitorada (Figura 22).

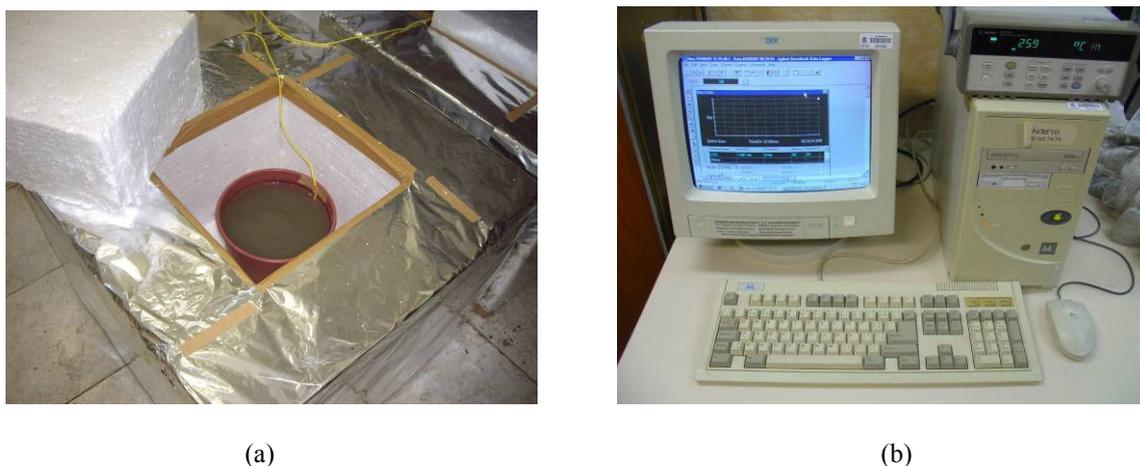


Figura 22 – (a) Representação do sistema de isolamento térmico para medição do aumento de temperatura. (b) Sistema de aquisição de dados.

Quando se deseja obter a taxa de calor liberada da reação de hidratação do cimento, a partir do monitoramento do acréscimo da temperatura, é necessária a calibração prévia do calorímetro (descrita no item 5.4.1.2) e, também, considerar as perdas de calor, liberada pela reação de hidratação do cimento, para o ambiente.

#### 5.4.1.2 Calibração do calorímetro semi-adiabático

O procedimento consistiu em preencher um recipiente com 2 litros de água fria, em uma sala climatizada a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , até que fosse atingido seu equilíbrio térmico com o ambiente. Obtida a estabilidade térmica, a amostra foi colocada no calorímetro para o monitoramento da sua temperatura. Subsequentemente foi aquecida outra amostra, com o mesmo volume, até aproximadamente  $50^\circ\text{C}$ . Ao término do aquecimento foi medida a massa da água quente, a qual foi despejada no recipiente contendo a água fria. A mistura (água fria + água quente) foi mantida isolada no calorímetro semi-adiabático e sua variação de temperatura foi monitorada, bem como a do ambiente externo, por aproximadamente dois dias. Ao término deste período, obteve-se o gráfico da variação de temperatura em função do tempo. O procedimento de cálculo, para a obtenção da capacidade térmica do calorímetro, está descrito no item 4.1.2.

#### 5.4.2 Calorimetria isotérmica

O objetivo da realização do ensaio de calorimetria isotérmica foi determinar os tempos de estabilização para os teores de 0% a 2,2% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%, visando à obtenção dos teores mínimos (16 e 64 horas) e, de segurança (24 e 72 horas), para a estabilização

das águas de lavagem e aplicação nos concretos. Além disso, procedeu-se a determinação da variabilidade deste ensaio. As verificações realizadas pelos dois métodos calorimétricos estão apresentadas no item 5.4.4.

#### 5.4.2.1 Medição da taxa de energia

O procedimento de ensaio consistiu em reservar os materiais (água, cimento e aditivos redutor de água e AEH) em ambiente climatizado a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , até o equilíbrio térmico. O experimento foi realizado sobre um trocador de calor plano em alumínio, alimentado por um banho termostático, o que garantiu a manutenção da temperatura em  $23\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ . O preparo da água de lavagem foi realizado em saco plástico, com capacidade para um 1 litro, localizado sobre o transdutor devidamente calibrado (o método de calibração está descrito no item 4.2.1), em contato térmico com o trocador de calor, aderido por uma fina camada de gel. A amostra e o transdutor foram isolados por um cubo vazado de poliestireno expandido, com dimensões externas de (30x30x20) cm e internas de (10x10x20) cm, o que pode ser visualizado nas Figuras 23 a 25. Paralelamente à medição do fluxo de calor gerado pela água de lavagem, era monitorada a taxa de calor liberado por uma amostra de referência (água potável, previamente reservada até atingir o equilíbrio térmico com a temperatura ambiente à  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), visando quantificar a energia perdida para o ambiente, este procedimento de cálculo está descrito no item 5.4.2.2. Ao término da aquisição era obtido um gráfico da taxa de liberação de calor em função do tempo.



(a)



(b)

Figura 23 – Vista frontal do aparato experimental. (a) Calorímetro isotérmico aberto com dois cubos vazados de EPS em seu interior e banho termostático à direita. (b) Calorímetro isotérmico fechado e banho termostático à direita.

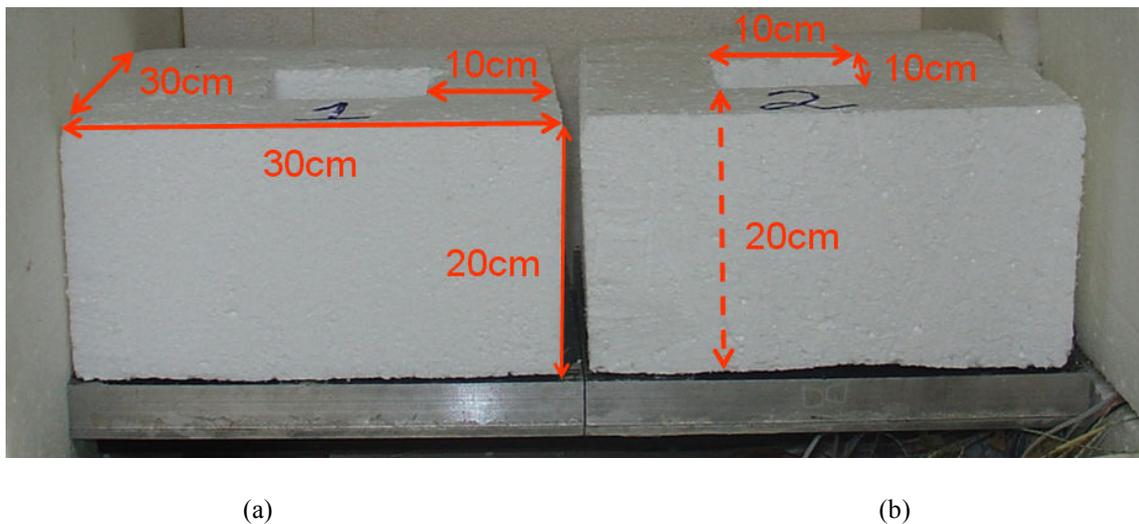


Figura 24 – (a) Dimensões externas do cubo vazado de EPS. (b) Dimensões internas do cubo vazado de EPS.



Figura 25 – Detalhe interior do calorímetro isotérmico. (a) Posicionamento do transdutor sobre o trocador de calor aderido por uma fina camada de gel. (b) Preparo da amostra sobre o transdutor, envolvidos pelo cubo vazado de EPS, com aquisição de dados instantânea.

#### 5.4.2.2 Calibração do calorímetro isotérmico e tratamento dos dados

Obtidas as constantes de calibração, de acordo com o item 4.2.1, determinou-se o fluxo do calor de reação da água de lavagem ( $q_1$ ), bem como da amostra de referência ( $q_2$ ), a partir da expressão:

$$q_1 = \underbrace{C_{AL} \cdot V_{AL}}_{\text{Água de Lavagem}} \quad (15)$$

$$q_2 = \underbrace{C_{AR} \cdot V_{AR}}_{\text{Água de Referência}} \quad (16)$$

Onde,

$q_1$  e  $q_2$ : densidade de fluxo de calor ( $W/m^2$ ). Os índices AL e AR referem-se ao dispositivo de medição da água de lavagem e potável, respectivamente.

C: constante de calor do fluxímetro ( $W/m^2/V$ ).

V: tensão gerada pelo sensor (V).

O fluxo de calor gerado pela água de lavagem, considerando a perda de calor para o ambiente, é dado por:

$$q = q_1 - q_2 \quad (17)$$

O gráfico obtido através do ensaio de calorimetria isotérmica é plotado a partir da taxa de energia liberada em função do tempo. A título de exemplo, na Figura 26 observa-se a taxa de liberação de calor de uma água de lavagem de relação  $a/c=10$  e de uma pasta de relação  $a/c=0,6$ , respectivamente.

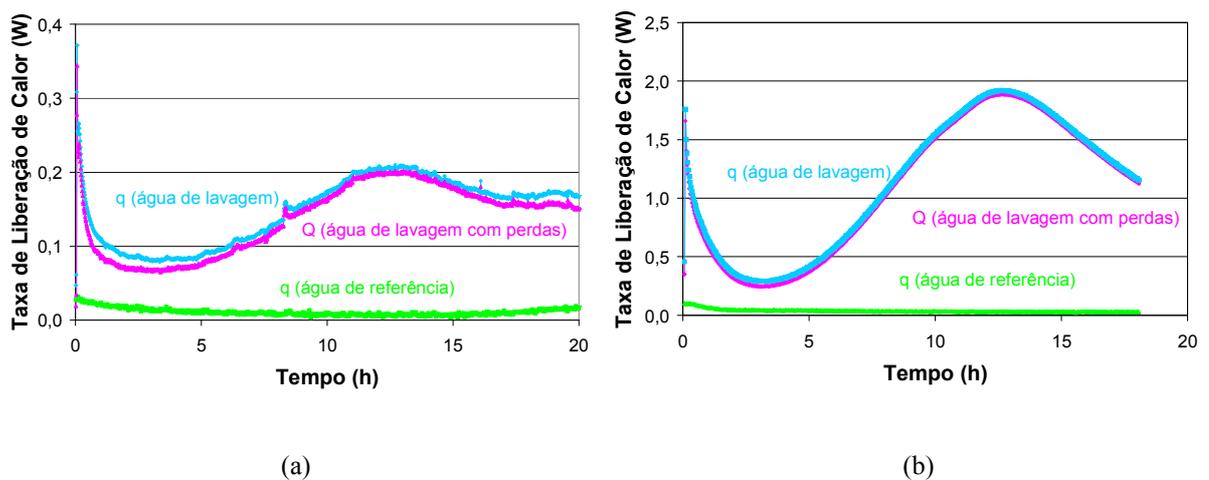


Figura 26 – Taxa de calor liberado. (a) Água de lavagem ( $a/c=10$ ). (b) Pasta ( $a/c=0,6$ ).

### 5.4.3 Produção das águas de lavagem

O procedimento de preparo das águas estabilizadas foi igual para ambos os métodos calorimétricos, diferindo somente na quantidade da amostra produzida (a quantidade de material empregada no método semi-adiabático foi superior ao isotérmico). A seqüência de mistura das águas de lavagem, produzidas em sala climatizada a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , está detalhada a seguir, sendo apresentada fora do parêntese a quantidade de material utilizado no método semi-adiabático, e entre parênteses a quantidade utilizada no método isotérmico.

- Coloca-se 240 (36) ml de água no recipiente;
- Acresce-se 400 (60) g de cimento ao longo de 2 min;
- Mistura-se por 1 min;
- Adiciona-se o aditivo redutor de água ao longo de 30 s;
- Prossegue-se com a mistura por 1 min;
- Faz-se a vedação e repouso da amostra por 4 h;
- Ao término deste período, inicia-se o processo de mistura da pasta por 30 s;
- Adiciona-se o restante da água de lavagem 3760 (564) g;
- Acrescenta-se o AEH e prossegue-se a mistura por 1 min.

O preparo das águas de lavagem, em laboratório, simula a produção do resíduo da lavagem do caminhão-betoneira em centrais dosadoras, uma vez que é comum a adição da água no balão, após o descarregamento do concreto, o qual geralmente é produzido com aditivo redutor de água. Neste trabalho, o aditivo redutor de água foi colocado previamente em uma pasta, de relação  $a/c=0,6$ , produzida em um recipiente e reservada por 4 horas. Após este período foi acrescentado o restante da água, de maneira a ser obtida uma mistura de relação  $a/c=10$ , onde foi adicionado o AEH.

Para tanto, procedeu-se o preparo de duas misturas; uma denominada íntegra, em que a água ascendida não foi removida e, outra onde a água ascendida era succionada após 1 h, permanecendo apenas a pasta. As misturas foram produzidas com relação  $a/c=10$ , aditivo redutor de água e AEH dosados em 0,6% m.c.

#### 5.4.4 Verificações dos ensaios calorimétricos

Na Tabela 9 estão apresentadas as verificações realizadas pelos ensaios semi-adiabático e isotérmico, assim como o objetivo dessas determinações.

Tabela 9 – Verificações realizadas nos ensaios calorimétricos.

Ensaio calorimétrico	Determinações	Proporcionamento dos materiais empregados	Objetivo	
Semi-adiabático	Verificações Preliminares	Verificação do volume da água de lavagem	a/c=10 e a/c=0,4	Determinar a quantidade de cimento necessária para que o acréscimo de temperatura possa ser medido.
		Influência do succionamento*	a/c=10 ARA**=0,6% m.c. AEH=0,6% m.c.	Verificar se é possível a diminuição do tamanho dos calorímetros.
		Influência do tempo de adição do AEH	a/c=10 ARA=0,6% m.c. AEH=0,6% m.c.	Verificar a influência do tempo de adição do AEH nas águas de lavagem estabilizadas.
		Influência do aditivo redutor de água (ARA)	a/c=10 ARA= 0% e 0,6% m.c. AEH= 0% a 2,2% m.c., com incrementos de 0,2%.	Verificar a influência da presença de aditivo redutor de água em águas de lavagem com diversos teores de AEH.
		Influência da relação a/c da água de lavagem	a/c=5; 7,5; 10 e 15 ARA=0,6% m.c. AEH= 0% a 1% m.c., com incrementos de 0,2%.	Verificar a influência da relação a/c de águas de lavagem no desempenho do AEH. Foram escolhidos valores de relações a/c foram próximos a 10.
Semi-adiabático e Isotérmico	Variabilidade dos ensaios	a/c=10 ARA=0,6% m.c. AEH=0,4% m.c.	Comparar a dispersão dos resultados apresentados por ambos os ensaios calorimétricos. Os números de repetições foram:  Semi-adiabático: 6  Isotérmico: 4	
	Determinação dos tempos de estabilização para os diversos teores de AEH	a/c=10 ARA=0,6% m.c. AEH <sub>semi-adiabático</sub> =0% a 2,6% m.c., com incrementos de 0,2%. AEH <sub>isotérmico</sub> =0% a 2,2% m.c., com incrementos de 0,2%.	Semi-adiabático: comparação com os tempos de estabilização obtidos através do método isotérmico.  Isotérmico: obtenção dos teores mínimos e de segurança, para a estabilização das águas de lavagem e aplicação nos concretos.	

\*Para a realização deste ensaio, procedeu-se o preparo de duas misturas; uma denominada íntegra, em que a água ascendida não foi removida e, outra onde a água ascendida era succionada após 1 h, permanecendo apenas a pasta, conforme a Figura 39.

\*\*Aditivo redutor de água.

## 5.5 Estudo em concreto

O objetivo desta etapa foi verificar a influência das águas de lavagem, com diversos teores de AEH, nas propriedades do concreto, bem como indicar um teor ótimo de AEH para dois períodos de estabilização, isto é, uma dosagem mínima necessária para estabilizar o material residual, sem prejudicar as características do concreto. De acordo com a Figura 27, sete concretos convencionais foram produzidos: um de referência (preparado integralmente com água potável e sem AEH), três com água de lavagem estabilizada com três teores diferentes de AEH para uma noite de estabilização, e três com água de lavagem estabilizada com três teores diferentes de AEH para um fim de semana de estabilização. Diante da necessidade de esclarecimento sobre os efeitos do AEH em concretos com maiores resistências, foram produzidas três misturas: uma de referência e duas com os teores mínimos, para os dois diferentes períodos de estabilização (Figura 28).

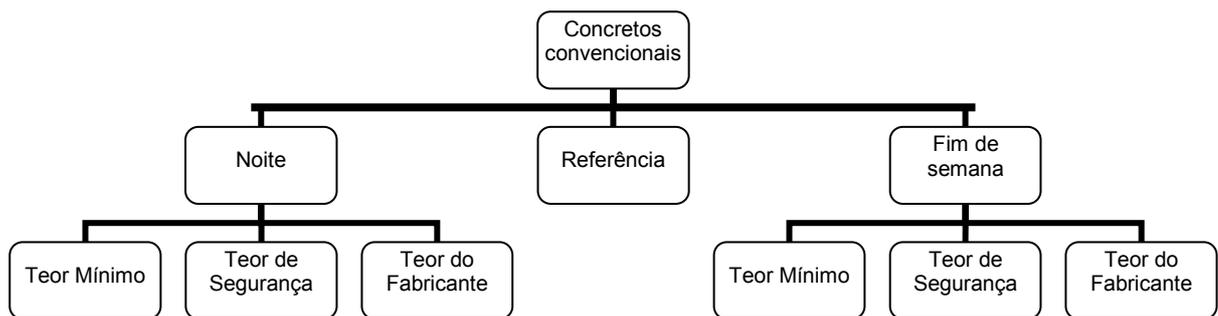


Figura 27 – Representação do número de concretos convencionais produzidos.

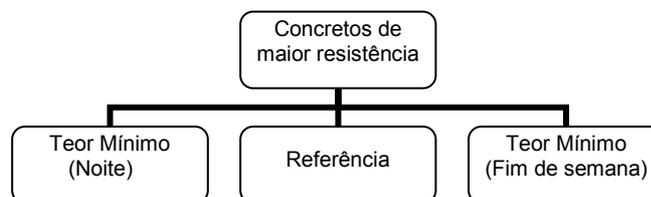


Figura 28 – Representação do número de concretos de maior resistência produzidos.

### 5.5.1 Produção dos concretos

Houve um planejamento para a produção das águas de lavagem e dos concretos, pois como o período de estabilização é um parâmetro fixo, determina o horário que o concreto deve ser preparado. O proporcionamento dos materiais foi fixado, conforme descrito no item 5.1.1. Os

agregados miúdos foram utilizados no estado úmido, por isso foi determinada, experimentalmente, a umidade de uma amostra representativa para o desconto da quantidade de água de amassamento do concreto.

A produção das águas de lavagem estabilizadas, com os teores de AEH de 0,8% (teor mínimo), 1,1% (teor de segurança) e 5,6% m.c. (do fabricante), para uma noite de estabilização, foi realizada 16 horas antes do preparo do concreto; enquanto, as águas de lavagem com os teores de AEH de 2,2% (teor mínimo), 2,4% (teor de segurança) e 11,2% m.c. (teor do fabricante), para um fim de semana de estabilização, foram preparadas 64 horas antes da produção dos concretos. Os teores mínimos e de segurança foram determinados experimentalmente, através do ensaio de calorimetria isotérmica (item 6.1.2.2), enquanto os teores do fabricante são valores indicados pelo fabricante do aditivo (item 5.2.1).

Na Figura 29 estão apresentados os recipientes onde as águas de lavagem foram produzidas. Após seu preparo, os recipientes foram fechados e mantidos em ambiente climatizado a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . A seqüência de mistura foi realizada conforme detalhado no item 5.4.3, e o consumo de material especificado no APÊNDICE 1.

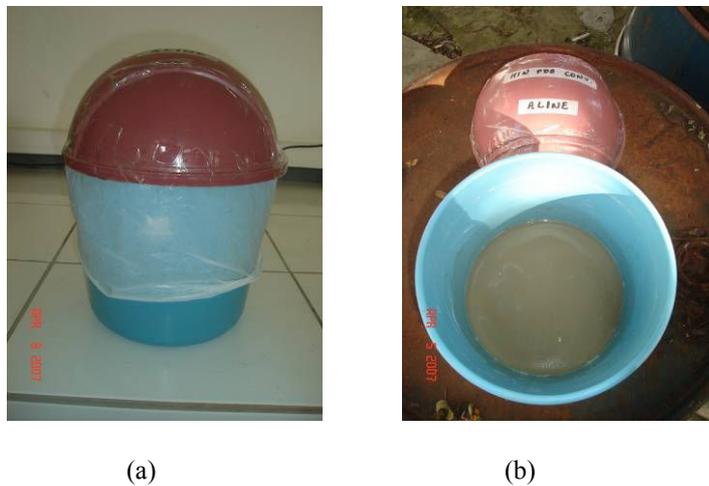


Figura 29 – (a) Recipiente plástico fechado, onde foram produzidas as águas de lavagem estabilizadas. (b) Recipiente aberto, com água de lavagem estabilizada em seu interior.

Foram produzidos 46 litros de concreto em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de mistura de 120 litros (Figura 30). A quantidade de substituição de água de lavagem por água proveniente do sistema de abastecimento público foi de 14% para o concreto convencional e 13,6% para o de maior resistência (conforme item 5.1.2). Imediatamente antes da produção do concreto, a temperatura ambiente foi monitorada. Seu preparo foi realizado logo após a

imprimação da betoneira com o mesmo traço do concreto. A seqüência de colocação dos materiais foi a seguinte:

- 100% da brita e 90% da água de amassamento;
- Acionamento da betoneira e adição do cimento;
- Colocação da areia média;
- Acréscimo da areia fina;
- Aplicação do aditivo redutor de água.

Todos os materiais secos eram adicionados lentamente na betoneira. Eventualmente, no intervalo de adição da areia média ou areia fina, desligava-se a betoneira para retirar, com o auxílio de uma colher de pedreiro, o material aderido às paredes do equipamento, sendo então adicionados os 10% de água restante para evitar a formação de grumos. Quando da produção de concretos convencionais, a colocação de todos os materiais secos foi concluída em um intervalo de aproximadamente 8 minutos. A homogeneização do concreto prosseguiu até doze minutos a partir da colocação do cimento; ao término deste período foi adicionado o aditivo redutor de água e a mistura continuava por mais três minutos. Os tempos de mistura foram de quinze minutos para os concretos convencionais, enquanto para os concretos de maior resistência a duração da mistura foi prolongada em quatro minutos. Ao término do processo de mistura, foi medida a temperatura do concreto, realizados os ensaios no estado fresco e moldados os corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão.

A colocação da água de lavagem foi realizada logo após a imprimação da betoneira e o procedimento de mistura seguiu conforme detalhado anteriormente, para os concretos de referência.



Figura 30 – Concreto em fase de produção na betoneira de eixo inclinado.

### **5.5.2 Ensaio**

Para a indicação do teor ótimo de AEH, foram analisados os efeitos das águas de lavagem estabilizadas com os diferentes teores de AEH (mínimo, de segurança e do fabricante) nas propriedades do concreto. Desta forma, foram feitas determinações no estado fresco, através da determinação do abatimento inicial, perda de abatimento, tempos de pega, evolução de temperatura e teor de ar incorporado. No estado endurecido foi determinada a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. Além disso, foi realizado um levantamento dos custos dos insumos empregados na produção dos concretos, com a finalidade de verificar a influência do teor de AEH no preço final do material.

#### **5.5.2.1 Abatimento**

A leitura do abatimento inicial foi realizada logo após o preparo do concreto. Embora esta medição tenha sido executada após 15 minutos (término do tempo de mistura), para os concretos convencionais e, após 19 minutos para os de maior resistência, foi denominada por abatimento inicial no instante zero. Este ensaio foi executado de acordo com a NBR NM 67 (1998).

#### **5.5.2.2 Perda de Abatimento**

No decorrer do ensaio de perda de abatimento foram realizadas quatro medições ao longo do tempo, nos instantes 0, 15, 30 e 60 minutos. Ao término do preparo do concreto foi medido o primeiro abatimento. Após a primeira medição, a mistura foi homogeneizada e dela extraída uma pequena parcela (aproximadamente 18 kg) para a determinação da massa específica e teor de ar incorporado. Posteriormente, foi retornada ao misturador para a medição do abatimento correspondente a 15 minutos. Após a segunda medição do abatimento, uma representativa porção do concreto foi retirada gradualmente, até aproximadamente 70 kg, e submetida ao peneiramento para o ensaio de resistência à penetração. No intervalo das medições de abatimento correspondentes a 30 minutos e 1 hora, procedeu-se a moldagem de nove corpos-de-prova, o que representou a remoção de mais material. Desta forma, o volume de concreto utilizado na última medição de abatimento foi ligeiramente superior ao volume do cone.

No intervalo das medições de abatimento, o concreto permaneceu dentro da betoneira em repouso e protegido contra o excesso de perda de umidade para o ambiente, através da colocação de pano úmido sobre a betoneira, para minimizar a saída de água por evaporação. Antes de cada leitura de abatimento o material era misturado por 3 minutos. A execução do ensaio seguiu as recomendações da NBR 10342 (1992).

#### 5.5.2.3 Teor de ar incorporado

Para o cálculo do teor de ar, recorreu-se à determinação da massa específica, através do método gravimétrico, segundo a NBR 9833 (1987). O ensaio foi realizado logo após a medição do primeiro abatimento.

#### 5.5.2.4 Pega

O ensaio de pega está subdividido em duas partes. A primeira apresenta a medição dos tempos de pega através do método de resistência à penetração, visando à verificação do efeito das águas de lavagem em argamassas; a segunda parte apresenta a evolução de temperatura em argamassas, tendo por objetivo saber se é possível relacionar, nas curvas de evolução de temperatura, a variação de temperatura, correspondente ao início e fim de pega, com os tempos de início e fim de pega, determinados a partir do ensaio de resistência à penetração. A NBR NM 9 (2003) recomenda que, o ensaio de resistência à penetração seja feito em argamassas obtidas a partir do peneiramento do concreto, por isso ambos os ensaios de pega foram realizados em argamassa.

##### a) Resistência à penetração

Os tempos de início e fim de pega foram determinados através do método de resistência à penetração, de acordo com a NBR NM 9 (2003). Na Figura 31 está apresentada a argamassa obtida através do peneiramento do concreto. Assim, dois corpos-de-prova de (15x19) cm foram moldados, protegidos no topo com plástico e armazenados em câmara úmida, sob temperatura ambiente de  $25\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 90% (Figura 32). Desta forma, os resultados são a média de duas determinações.



(a)



(b)

Figura 31 – (a) Peneira com abertura de malha 4,8mm sobre mesa vibratória. (b) Peneiramento do concreto, para a obtenção da argamassa.



(a)



(b)



(c)

Figura 32 – (a) Moldagem da argamassa no molde. (b) Penetrômetro com anel dinanométrico e agulha de seção circular imersa em argamassa. (c) Corpos-de-prova em câmara úmida, durante o ensaio de resistência à penetração.

### a) Evolução de temperatura

Uma parte da argamassa peneirada foi acomodada dentro de um calorímetro de poliestireno expandido para o monitoramento da evolução de temperatura ao longo do tempo. Nas Figuras 33 e 34 estão especificadas as dimensões externas de (17x23x20) cm, o diâmetro interno de 9 cm e a altura interna de 13 cm do calorímetro. O acréscimo de temperatura foi medida por termopares inseridos nas amostras, e os dados foram coletados por meio do software BenchLink Data Logger. O procedimento detalhado deste ensaio está descrito no item 5.4.1.1. O objetivo deste monitoramento foi verificar se existe uma relação entre a variação de temperatura, correspondente aos tempos de início e fim de pega das argamassas, e os tempos de pega determinados por resistência à penetração.

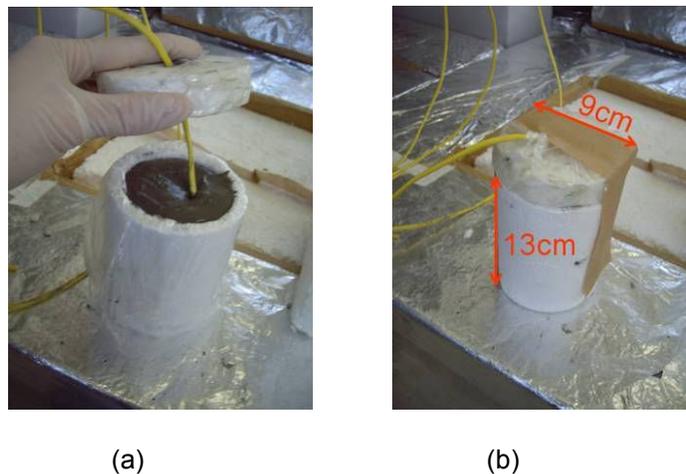


Figura 33 – Argamassa acomodada em recipiente cilíndrico, com termopar imerso na amostra. (b) Dimensões do recipiente cilíndrico.

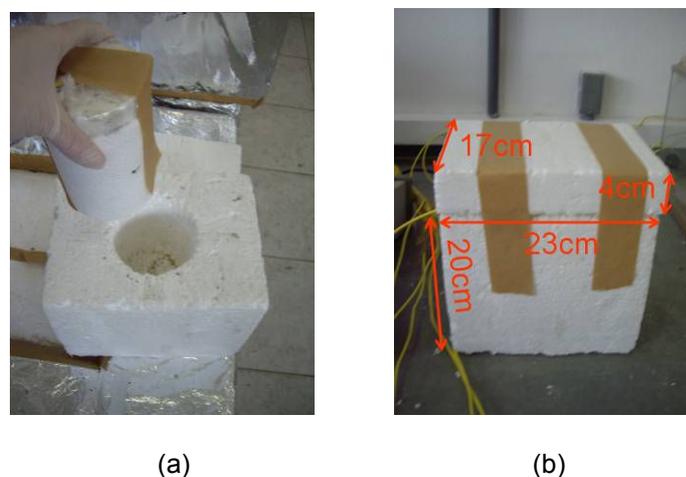


Figura 34 – (a) Acomodação dentro do calorímetro do recipiente cilíndrico com argamassa. (b) Dimensões externas do calorímetro semi-adiabático.

### 5.5.2.5 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi executado em prensa Shimadzu, de acordo com a NBR 5739 (1994). Quando os parâmetros de ensaio são devidamente controlados, os resultados obtidos apresentam baixa dispersão, desta forma a moldagem de três corpos-de-prova é considerada uma quantidade representativa. Portanto, os resultados apresentados no Capítulo 6 é a maior resistência obtida a partir de três corpos-de-prova cilíndricos de (10x20) cm, para as idades de 3, 7 e 28 dias. O procedimento de moldagem foi executado conforme a NBR 5738 (2003). Após o acabamento dos topos dos corpos-de-prova, com colher de pedreiro, procedia-se a proteção superficial com o auxílio de saco plástico e elástico. A desmoldagem foi realizada após 24 horas. Os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida até a idade de ruptura, entretanto antes do rompimento os topos foram fresados (Figuras 35 a 37).



(a)



(b)



(c)

Figura 35 – (a) Moldagem dos corpos-de-prova. (b) Acomodação dos corpos-de-prova em câmara úmida. (c) Acabamento do topo com colher de pedreiro e proteção superficial dos topos com saco plástico e elástico.



Figura 36 – (a) Fresagem dos topos dos corpos-de-prova. (b) Detalhe do topo do corpo-de-prova fresado.

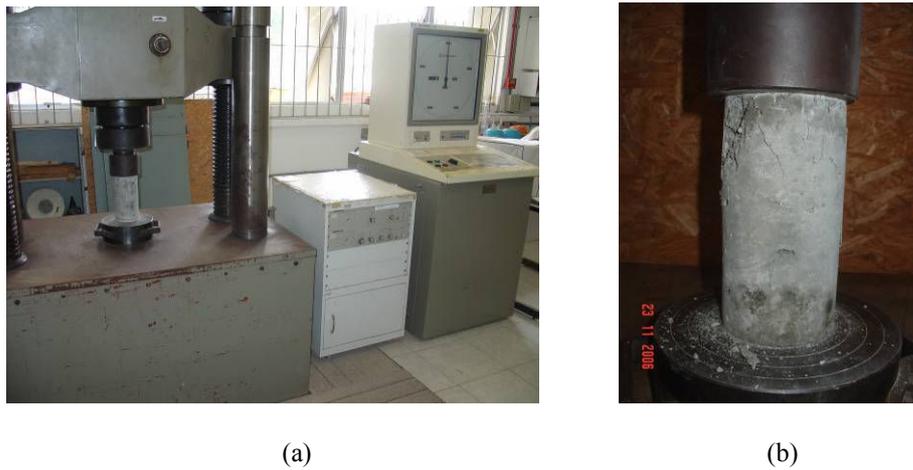


Figura 37 – (a) Ensaio de resistência à compressão em prensa Shimadzu. (b) Aspecto do corpo-de-prova rompido à compressão.

## 5.5.2.6 Resumo dos ensaios em concreto

Os ensaios realizados em concretos, em cada fase do programa experimental, estão resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Resumos dos ensaios realizados em concreto.

Material	Ensaio	Nº de ensaios	Referências Normativas	Parâmetros fixos	Critério de aceitação	Objetivo
<p>- Concreto Convencional (referência, teor de segurança, teor mínimo, teor do fabricante para uma noite e um fim de semana) Total: 7 misturas</p> <p>- Concreto de maior resistência (referência, teor mínimo para uma noite e um fim de semana) Total: 3 misturas</p>	Abatimento	10	NBR NM 67 (1998)	<p>- traço da mistura;</p> <p>- relação a/c;</p> <p>- teor de aditivo redutor de água.</p>	-	<p>-Determinação do teor ótimo;</p> <p>- Avaliação do efeito das águas de lavagem com vários teores de AEH (mínimo, segurança, fabricante), nas propriedades do concreto;</p> <p>- Comparação entre os custos dos concretos com porcentagens diferentes de AEH.</p>
	Perda de Abatimento	10	NBR 10342 (1992)			
	Teor de ar incorporado	10	NBR 9833 (1987)			
	Tempos de pega	10	NBR NM 9 (2003)		ASTM C 94 (2004) O concreto com água de lavagem tem uma tolerância de aceleração em 1h e um retardamento de até 1,5h nos tempos de pega em relação à referência.	
	Evolução de temperatura	10	Ensaio não normatizado		Definição do ponto de inflexão na curva da evolução de temperatura em função do tempo, correspondente ao valor de taxa mínima, que determina o término do período de dormência.	
Resistência à compressão	10 concretos: 3 CP's por idade de 3, 7 e 28 dias Total: 90 CP's	NBR 5739 (1994)	ASTM C 94 (2004) O concreto com água de lavagem tem que apresentar pelo menos 90% da resistência da mistura de controle.			

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 Ensaio em águas de lavagem

#### 6.1.1 Calorimetria semi-adiabática

##### 6.1.1.1 Verificações preliminares

Em virtude das águas de lavagem apresentarem quantidade de cimento bastante reduzida, foi determinada a quantidade de material necessário para que o acréscimo de temperatura pudesse ser medido. Além disso, foram observados os tempos de término de estabilização nas curvas de evolução de temperatura, ao longo do tempo, para águas de lavagem succionadas e íntegras. Finalmente, foi verificada a influência do tempo de adição do AEH, da presença do aditivo redutor de água em misturas com e sem AEH e da variação da relação a/c no desempenho do AEH. Os resultados estão apresentados a seguir. A quantidade de material empregado na produção das amostras e a seqüência de mistura estão detalhadas no item 5.4.3. Esta parte do estudo visa à contribuição para a definição do procedimento de produção das águas de lavagem.

##### a) Verificação do volume de água de lavagem

Como o teor de cimento presente em águas de lavagem é bastante reduzido, se comparado à pasta ou argamassa com a mesma massa de cimento, a primeira verificação realizada foi a quantidade de material necessário para que a evolução de temperatura pudesse ser medida. Para isso, foram produzidas uma água de lavagem e uma pasta, com o consumo de cimento fixado em 400 g, e submetidas ao ensaio de evolução de temperatura.

Na Figura 38 é possível constatar uma expressiva diferença na evolução de temperatura da água de lavagem de  $a/c=10$  e da pasta de  $a/c=0,4$ . Como era de se esperar, a mistura com menor quantidade de água apresentou uma variação térmica consideravelmente maior, isto é, o acréscimo de temperatura apresentada pela água de lavagem e pasta foi de aproximadamente  $2,5^{\circ}\text{C}$  e  $19^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Contudo, mesmo sendo reduzido o intervalo de variação de temperatura da água de lavagem, este pequeno aumento possibilita a definição do início das reações de hidratação. Além disso, é relevante notar que, o tempo de término da estabilização, de aproximadamente 5 h foi observado para ambas as misturas. Baseado nos resultados considera-se o volume da amostra adequado para a realização do ensaio, ou seja, é possível a medição da

evolução de temperatura na água de lavagem, e o equipamento experimental (aquisitor de dados, Data Logger e termopares) é apto para as medições de temperatura em soluções diluídas.

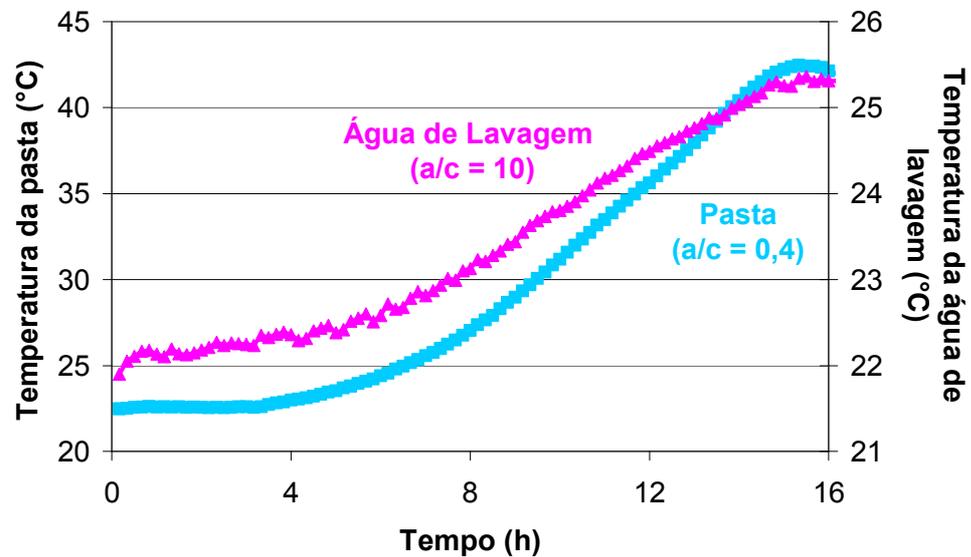


Figura 38 – Evolução de temperatura da água de lavagem e da pasta.

#### b) Influência do succionamento

A água de lavagem é um material notavelmente heterogêneo, poucos minutos após sua produção, é percebida a decantação do cimento, visualizando-se uma pasta na região inferior do material e uma água praticamente límpida na região superior (Figura 39).

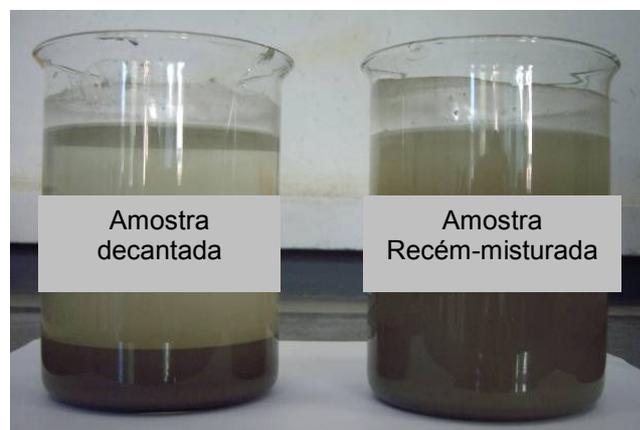


Figura 39 – Representação de uma amostra de água de lavagem decantada e outra recém-misturada.

Em virtude da água de lavagem e da pasta terem apresentado, aproximadamente, o mesmo tempo de término de estabilização, optou-se por monitorar a evolução de temperatura de duas águas de lavagem, uma com a água ascendida removida e outra com seu volume mantido. O objetivo desta verificação foi observar se os tempos de término de estabilização destas misturas seriam iguais; em caso afirmativo haveria a possibilidade de diminuição do tamanho dos calorímetros.

Para tanto, procedeu-se o preparo de duas misturas; uma denominada íntegra, em que a água ascendida não foi removida e, outra onde a água ascendida era succionada após 1 h, permanecendo apenas a pasta. As misturas foram produzidas com relação  $a/c=10$ , aditivo redutor de água e AEH dosados em 0,6% m.c.

A sucção foi realizada por meio de uma mangueira, utilizando o princípio de vasos comunicantes para a retirada da água da amostra. A realização deste procedimento pode resultar no aumento da precisão do ensaio e, conseqüentemente, na diminuição do aparato experimental (calorímetro). Isto porque, a variação da temperatura da amostra decantada é consideravelmente maior, em virtude da maior concentração de cimento.

Na Figura 40 é possível constatar que as águas de lavagem íntegras e succionadas apresentaram tempos de término de estabilização bastante próximos. A variação de temperatura da água succionada pode ser aumentada se a lâmina de água, que permaneceu na amostra, for completamente retirada. Contudo deve-se ter cuidado para garantir a permanência de todo o cimento. Desta forma, fica a critério do pesquisador a decisão de succionar, ou não, a água de lavagem, isto é, diminuir, ou não, o tamanho dos calorímetros. No entanto, vale destacar que, se o ensaio for realizado em sala climatizada, com grande variação de temperatura ambiente ( $\sim 3^{\circ}\text{C}$ ), é recomendado o succionamento do material residual, enquanto que se o experimento for realizado em salas com baixa variação de temperatura ( $\sim 1^{\circ}\text{C}$ ), não é necessário proceder o succionamento.

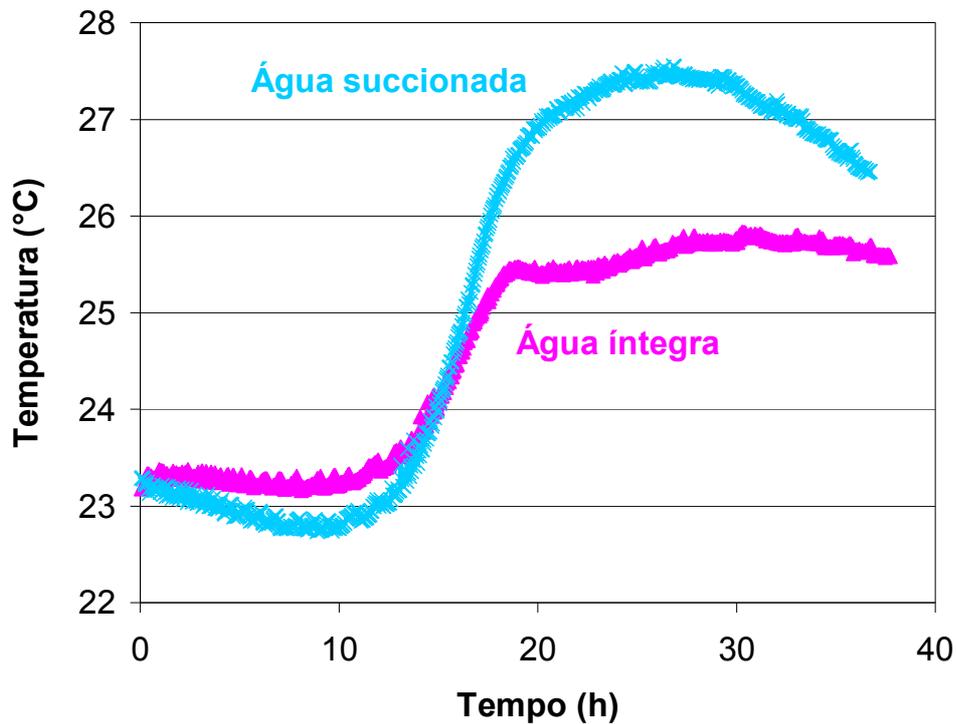


Figura 40 – Evolução de temperatura da água íntegra e succionada.

### c) Influência do tempo de adição do AEH

Como um dos objetivos específicos deste trabalho visa à contribuição de um procedimento racional para avaliação e uso do AEH, procedeu-se a comparação entre dois procedimentos de mistura, visando verificar a influência do tempo de adição do AEH em águas de lavagem com relação  $a/c=10$  e mesmo teor de aditivo redutor de água e AEH, correspondente a 0,6% m.c.. O volume das amostras produzidas foram iguais, o procedimento de mistura, denominado usual, corresponde ao empregado nesta pesquisa e consiste na adição do AEH após 4 h (descrito no item 5.4.3). O outro procedimento implica na adição consecutiva de todos os materiais, não havendo intervalo no tempo de adição do AEH, estando a seqüência de mistura detalhada a seguir:

- 1- Acréscimo e mistura de toda água e cimento ao longo de 2 minutos;
- 2- Colocação e mistura do aditivo redutor de água por 1 minuto;
- 3- Adição do AEH e prosseguimento da mistura por 1 minuto.

Na Figura 41 estão representadas as curvas de evolução de temperatura das águas de lavagem com o AEH adicionado no momento da mistura, e outra em que o AEH foi adicionado 4 h depois da produção da água de lavagem. De acordo com os resultados obtidos, foi observado um discreto encurtamento, de aproximadamente 3 h, no tempo de estabilização da água de lavagem com o AEH adicionado 4 h depois, o que evidencia a tendência de diminuição do desempenho do AEH para o maior tempo de adição, devido ao avançado grau de hidratação da mistura. Além disso, a mistura em que o AEH foi adicionado posteriormente exibiu uma taxa de evolução de temperatura superior às misturas sem tempo de adição.

Borger et al. (1994) verificou que, as argamassas em que o AEH foi adicionado imediatamente, necessitaram de menos aditivo do que as misturas em que o AEH era adicionado depois. Granato e Paulon (2003) notaram uma diminuição do início de pega com o aumento do tempo de adição do AEH. Os autores explicam que a adição do AEH em momentos posteriores à mistura do cimento com a água, resulta em diminuição do poder estabilizante do AEH.

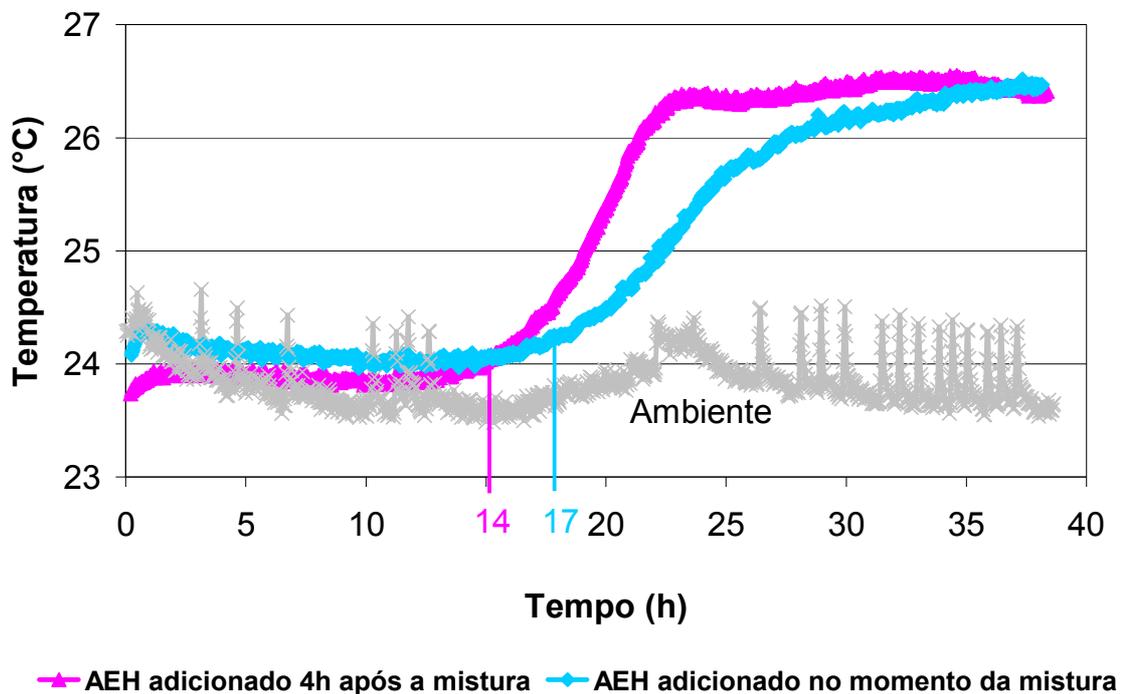


Figura 41 – Evolução de temperatura das águas de lavagem em função do tempo de adição do AEH.

#### d) Influência do aditivo redutor de água

Atualmente, a grande maioria dos concretos produzidos em centrais contém aditivos redutores de água. Por isso, optou-se por verificar seu efeito residual no comportamento de águas de lavagem. Para tanto, foram produzidas misturas de relação  $a/c=10$ , com 0% e 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e teores de AEH variando de 0% a 2,2% m.c., com incrementos de 0,2% m.c. A evolução de temperatura em função do tempo, para cada amostra, está apresentada no APÊNDICE 3, e os tempos de início da evolução de temperatura, obtidos a partir desses resultados, podem ser observados na Figura 42.

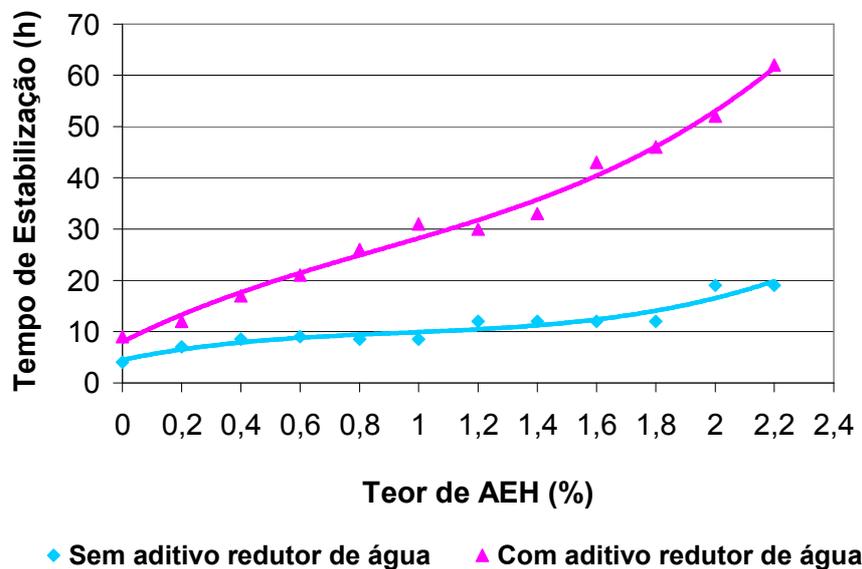


Figura 42 – Verificação da influência do aditivo redutor de água.

Os resultados evidenciaram o prolongamento dos tempos de estabilização das misturas com aditivo redutor de água de base lignosulfonato, sendo que o efeito retardante é maior em misturas com maior teor de AEH. Segundo Kinnerley et al. (1960), citado por MILESTONE (1979), isto confirma a tendência de retardo do lignosulfonato em altas dosagem, devido à presença de açúcares, em sua composição.

Na ausência de AEH, as misturas com aditivo redutor de água demonstraram o atraso de 5 h no início das reações, em relação às misturas sem o lignosulfonato. No entanto, com o aumento do teor de AEH para 2,2% m.c., esta diferença cresceu para 43 h. Portanto, é notável uma variação mais acentuada entre os tempos de estabilização das misturas com e sem aditivo redutor de água, para os maiores teores de AEH. Com isto, os resultados indicam que é preciso usar, na prática,

menos AEH possível, caso contrário, a influência no retardo fica mais acentuada em misturas com lignosulfonato. Desta forma, foram quantificadas e comprovadas: a influência da presença do aditivo redutor de água nas misturas e a variação do seu comportamento, quando combinado com diversos teores de AEH, o que justifica seu emprego na produção das águas de lavagem, para estudo de determinação de teores ótimos.

e) Influência da relação a/c

Para a verificação do efeito da relação a/c no desempenho do AEH, foram produzidas águas de lavagem com 0,6% m.c. de lignosulfonato e teores de 0% a 1% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c. As curvas de evolução de temperatura obtidas estão apresentadas no APÊNDICE 4. Com base nos resultados, obteve-se os tempos de estabilização em função da dosagem do AEH para as misturas com diferentes relações a/c, de acordo com a Figura 43.

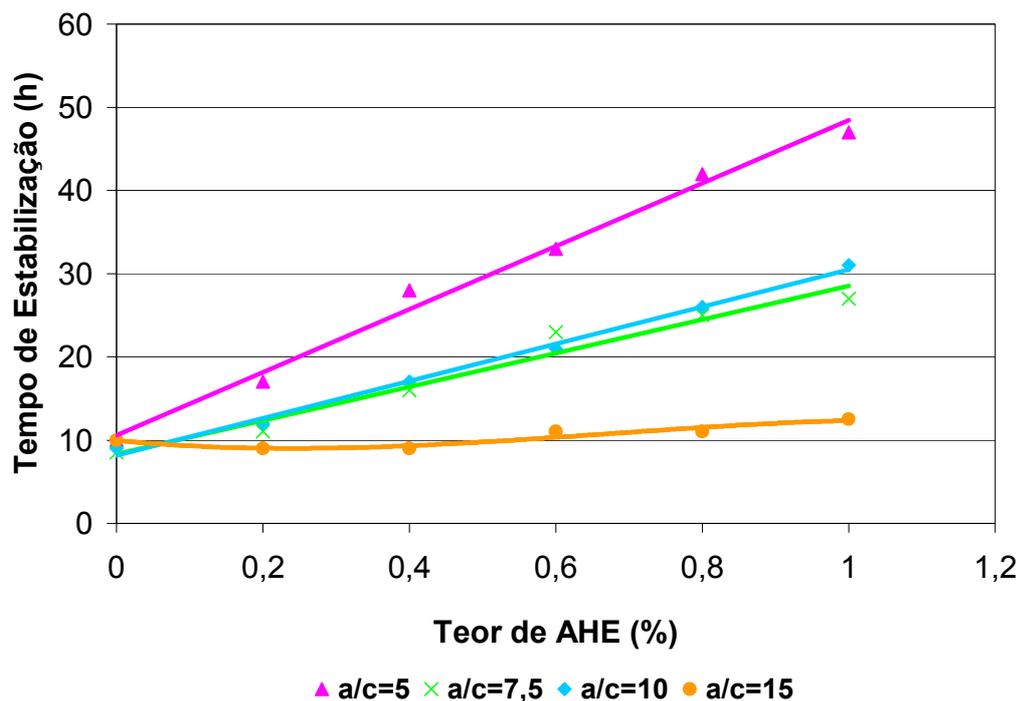


Figura 43 – Verificação da influência da relação a/c no desempenho do AEH.

As águas de lavagem com menor relação a/c (igual a 5), na presença de AEH, apresentaram maiores períodos de estabilização, enquanto as misturas com maior relação a/c (igual a 15), demonstraram uma menor eficiência do AEH. Este comportamento é facilmente compreensível, já que há uma menor diluição do AEH em águas de lavagem com menores relações a/c, conduzindo ao aumento efetivo do contato com os grãos de cimento e refletindo no acréscimo da

ação do AEH. A constatação da diminuição da eficiência do AEH em misturas com maiores relações a/c implica, na prática, em que a quantidade de água adicionada no balão do caminhão-betoneira seja fixada. Isto porque, quanto maior a quantidade de água, menor o efeito do AEH, o que resulta na diminuição do período de estabilização da água de lavagem, para a mesma dosagem de aditivo.

As misturas com relação a/c= 7,5 e 10 apresentaram diferenças pouco pronunciadas entre os tempos de estabilização. Em geral, foi constatada uma diferença de 1 h entre ambas as misturas para o mesmo teor de AEH. Contudo, houve um ligeiro aumento de 3 h quando as águas de lavagem apresentaram maior teor de AEH (1% m.c.).

Com base no comportamento das diferentes relações a/c, fica evidente que existe uma diminuição do desempenho do AEH com o aumento da relação a/c. No entanto, dentro de um intervalo de variação da relação a/c, a atuação do AEH não diminui proporcionalmente com o aumento da quantidade de água da mistura. Com isto, a influência da relação a/c no comportamento do AEH justifica a determinação do teor mínimo e de segurança diretamente na água de lavagem.

#### 6.1.1.2 Verificação da variabilidade do ensaio semi-adiabático

Na Figura 44 estão apresentadas as curvas de evolução de temperatura das águas de lavagem com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0,4% m.c. de AEH. Estas seis repetições foram realizadas para a determinação da dispersão dos resultados do ensaio de calorimetria semi-adiabática. O volume das amostras produzidas foi o mesmo para todas as determinações. As quantidades dos materiais empregados e a seqüência de mistura estão detalhadas no item 5.4.3.

Com base nos tempos de estabilização, extraídos das curvas de evolução de temperatura, foram obtidos os seguintes resultados: 9 ; 9,5 ; 12 e 10,5 h (este último valor foi observado em três das seis repetições). A maior variação ocorreu entre os tempos de estabilização de 9 e 12 h, o que resultou em 3 h de diferença. A média foi de aproximadamente 10,5 h e o desvio padrão de 1,03 h, resultando num coeficiente de variação de 9,8%. Cabe ressaltar que, esta variabilidade não está relacionada somente ao ensaio, mas também à definição do tempo de estabilização, o qual depende do critério descrito no item 6.1.2. Além disso, esses resultados são válidos para os calorímetros empregados nos experimentos deste trabalho, portanto, deve ser considerado o material que os compõe e suas dimensões (área e espessura da parede), conforme detalhado no item 5.4.1.1.

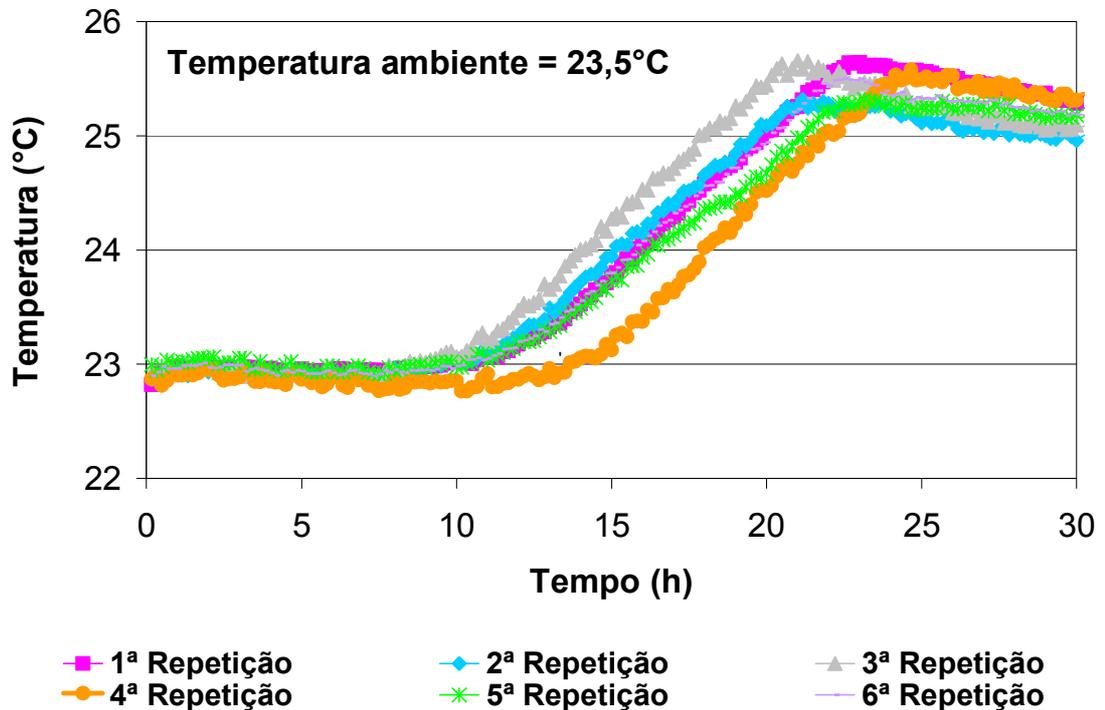


Figura 44 – Evolução de temperatura das águas de lavagem estabilizadas, expressas através da temperatura em função do tempo.

#### 6.1.1.3 Determinação dos tempos de estabilização

No APÊNDICE 5 estão definidos os tempos de estabilização obtidos a partir das 14 curvas de evolução de temperatura em função do tempo, localizadas nas Figuras 45 a 47, para as águas de lavagem com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 2,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c. A quantidade de material empregado na produção das amostras e a seqüência de mistura estão detalhadas no item 5.4.3. A definição dos tempos de término de estabilização para o método semi-adiabático foi semelhante ao isotérmico (descrito no item 6.1.2). No entanto, para a calorimetria semi-adiabática os pontos foram determinados a partir das curvas de evolução de temperatura, enquanto que para a isotérmica foram determinados a partir das curvas de liberação de calor.

Na Figura 48 estão apresentados os tempos de estabilização, obtidos a partir das curvas de evolução de temperatura, em função dos teores de AEH. A determinação dos tempos de estabilização através da calorimetria semi-adiabática visa somente à comparação com os resultados obtidos pelo método isotérmico, isto é, confrontar os resultados obtidos a partir da curva de evolução de temperatura com a curva de liberação de calor.

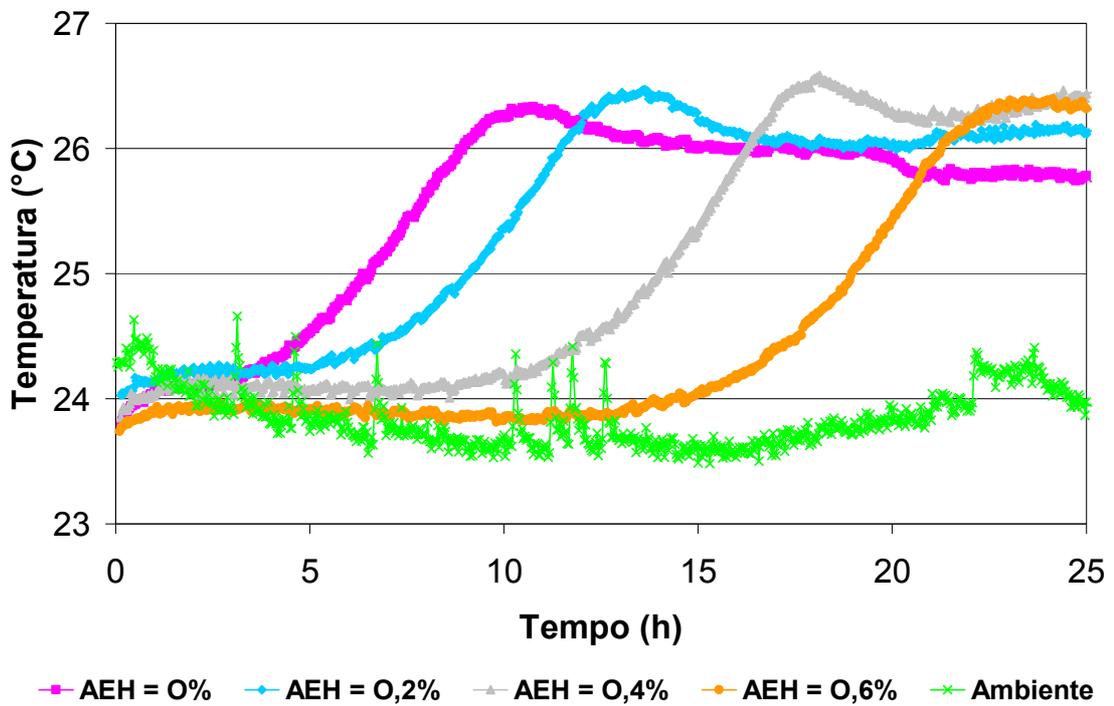


Figura 45 – Evolução de temperatura em função do tempo das águas de lavagem estabilizadas, para os teores de 0% a 0,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c.

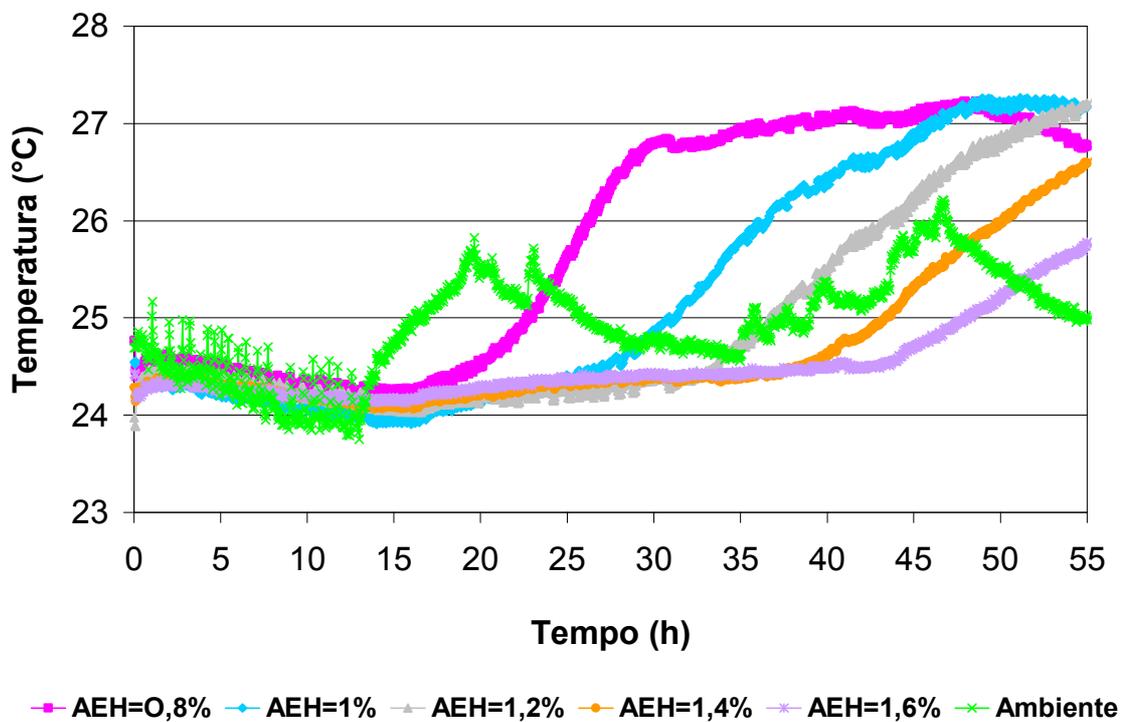


Figura 46 – Evolução de temperatura em função do tempo das águas de lavagem estabilizadas, para os teores de 0,8% a 1,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c.

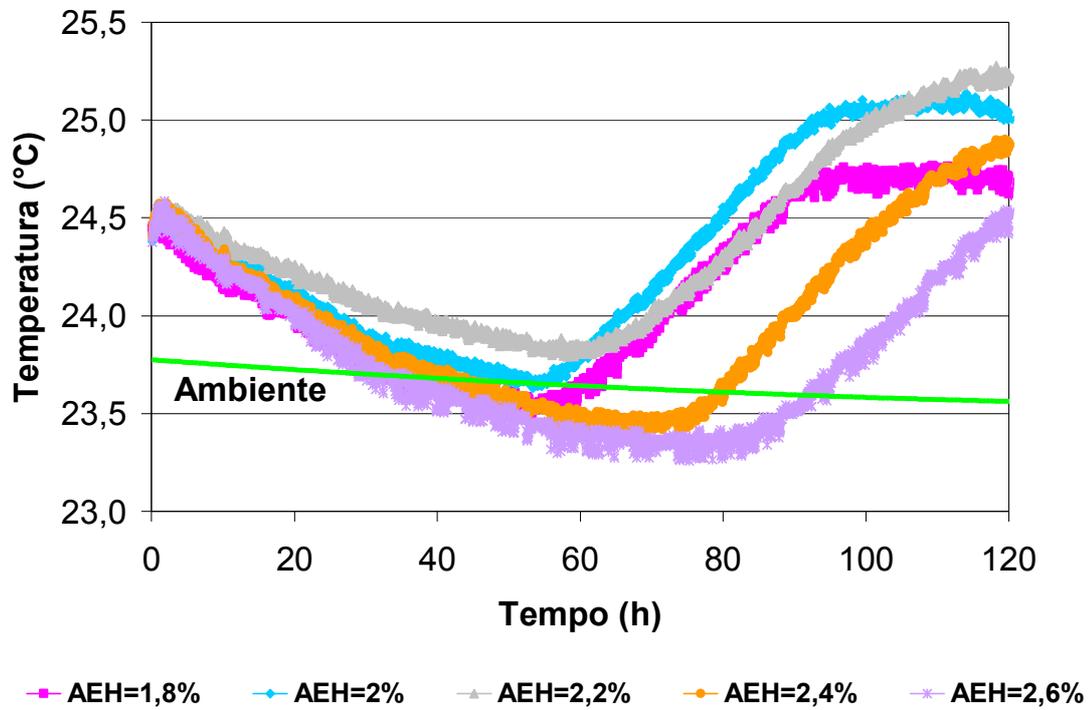


Figura 47 – Evolução de temperatura em função do tempo das águas de lavagem estabilizadas, para os teores de 1,8% a 2,6% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c.

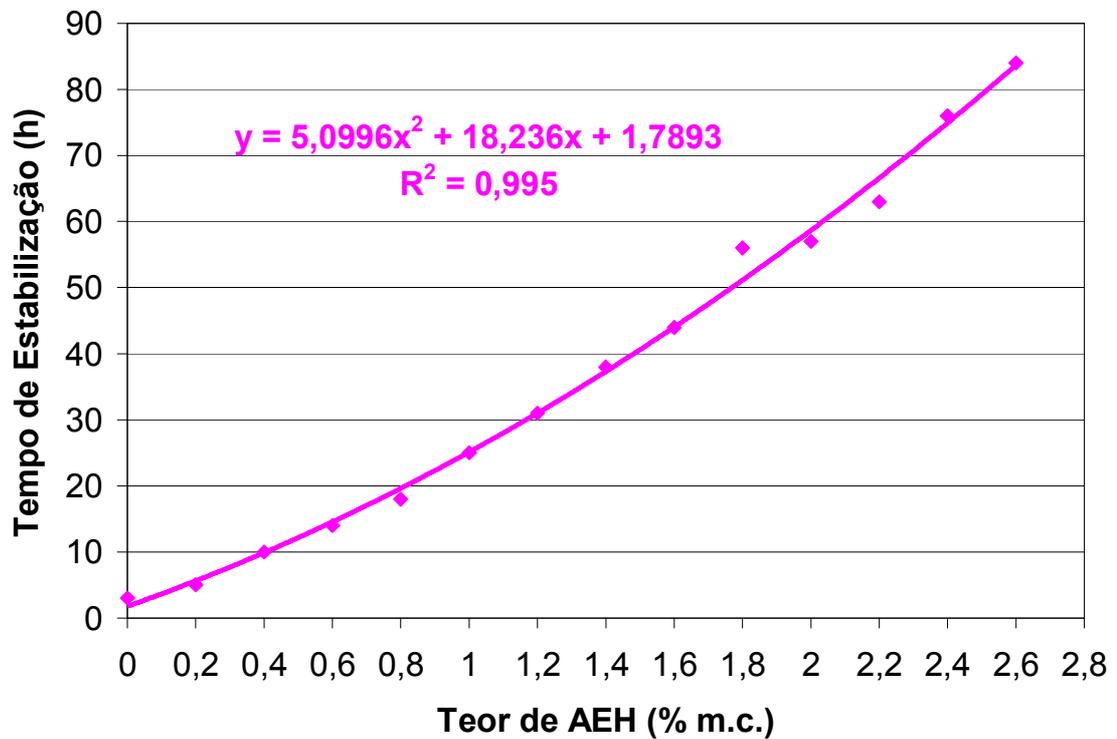


Figura 48 – Relação entre os tempos de estabilização e os teores de AEH.

### 6.1.2 Calorimetria isotérmica

A taxa de calor liberado na reação de hidratação do cimento de uma água de lavagem sem AEH, ao longo do tempo, está representada na Figura 49. Para a determinação do tempo de término da estabilização, foi considerado o comportamento da curva calorimétrica com as perdas de calor para o ambiente. A quantificação da taxa de calor, considerando as perdas para o ambiente, foi feita através do monitoramento da taxa de liberação de calor de uma amostra com água de lavagem (mistura em que se deseja a determinação do calor de hidratação) e outra com água potável (mistura de referência, que mede as trocas de calor com o ambiente). As amostras foram dispostas simetricamente sobre os sensores de medição de calor e envolvidas por um cubo de EPS, sob temperatura de  $23\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ , controlada por um banho termostático (conforme item 5.4.2.1). A taxa de calor liberado na reação de hidratação da água de lavagem, considerando o ganho de calor para o ambiente, foi obtida a partir da subtração da taxa de calor liberado por massa de cimento, em W/kg, da água potável.

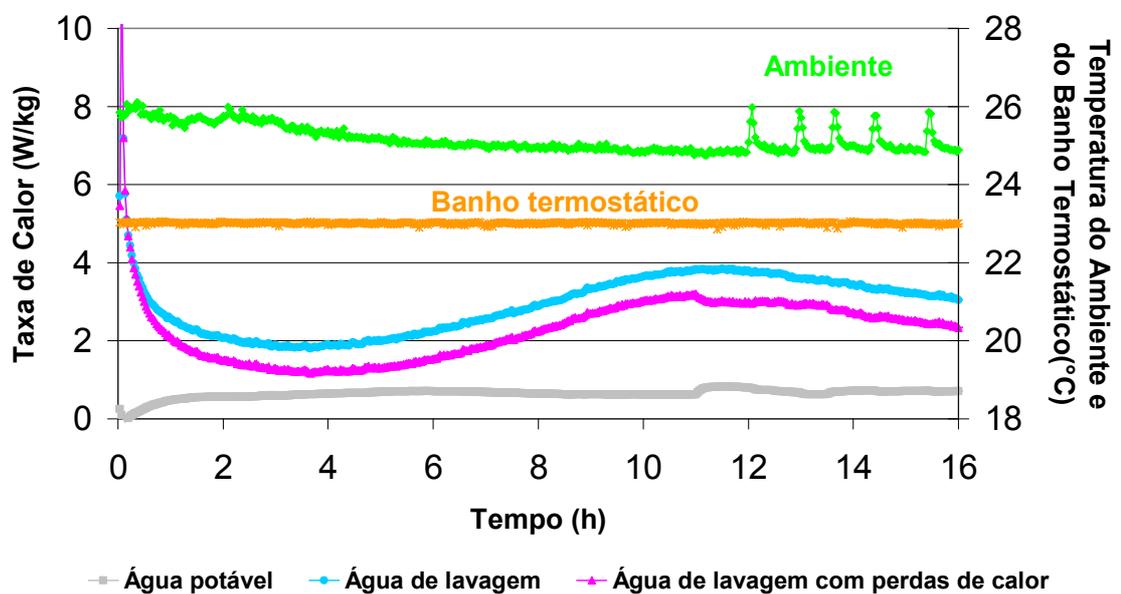


Figura 49 – Taxa de calor em função do tempo da água de lavagem estabilizada com 0% m.c. de AEH.

Na Figura 50 está representado o tempo correspondente ao término de estabilização das reações (destacado na cor vermelha) nas curvas calorimétricas da água de lavagem, estabilizada com 0,4% m.c. de AEH. Para a determinação do ponto correspondente ao término do período de estabilização das águas de lavagem, foi traçada uma linha tangente à taxa mínima de liberação de calor, considerando as perdas de calor para o ambiente. O tempo correspondente ao início das reações de hidratação, adotado no trabalho, foi o ponto onde houve um descolamento, de 0,03 W/Kg de cimento, entre a curva de liberação de calor e a reta tangente, após o término do período de dormência.

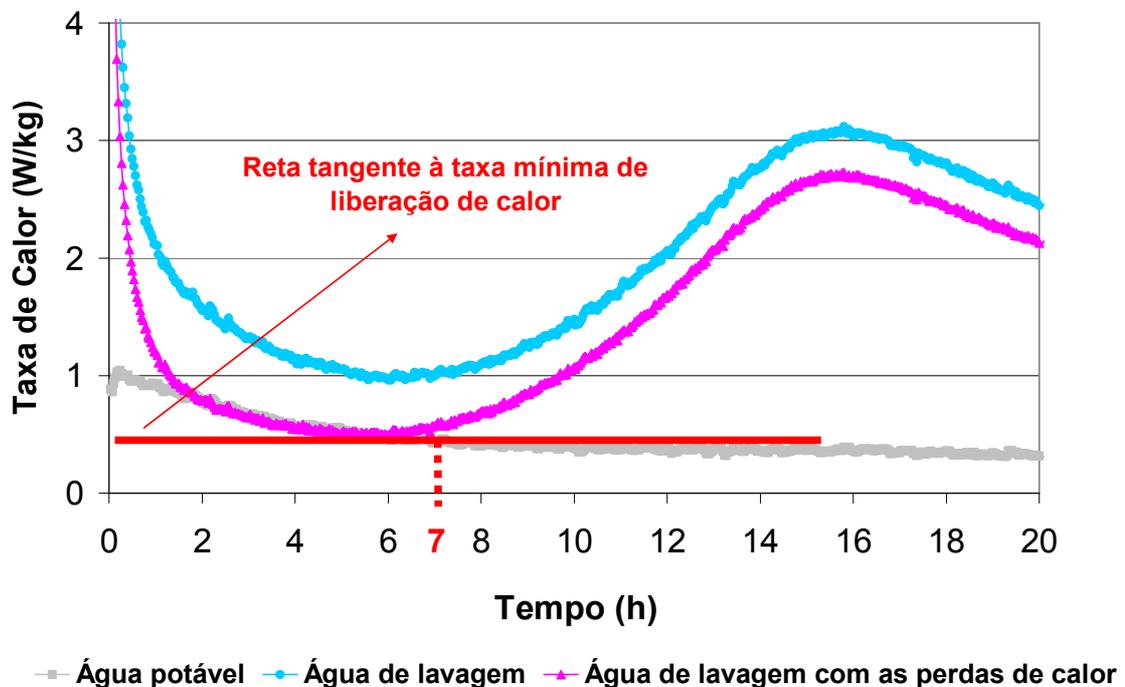


Figura 50 – Localização do tempo correspondente ao término de estabilização das reações nas curvas calorimétricas da água de lavagem estabilizada (AEH=0,4% m.c.).

A partir das curvas calorimétricas das águas de lavagem (apresentadas no APÊNDICE 6) foram obtidas as taxas máximas de calor por massa de cimento, pontos correspondentes ao pico máximo da curva de liberação de calor, para os teores de 0% a 2,2% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c. (Figura 51). Os teores de 1% e 1,2% m.c. de AEH não estão apresentados na curva da taxa máxima de calor, pois o ensaio foi interrompido antes da liberação máxima da quantidade de calor dessas amostras. É notável a diminuição da taxa máxima de calor com o aumento do teor de AEH, isto é, para maiores teores de AEH, mais difícil fica a

visualização da retomada das reações de hidratação na curva calorimétrica. Por isso, a partir de 1,8% m.c. de AEH, a precisão do ensaio isotérmico diminuiu significativamente.

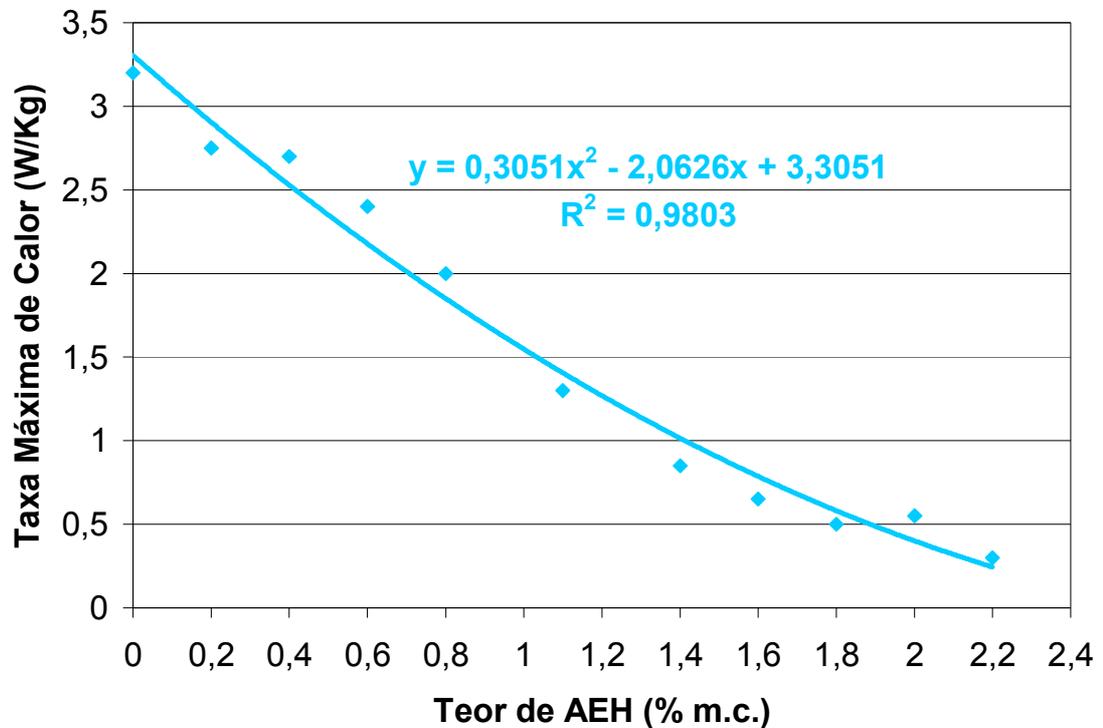


Figura 51 – Relação entre teor de AEH e taxa máxima de calor com perdas de calor.

#### 6.1.2.1 Verificações da variabilidade do ensaio isotérmico

Na Figura 52 estão descritas as curvas calorimétricas das águas de lavagem com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0,4% m.c. de AEH, considerando as perdas de calor para o ambiente. Estas quatro repetições foram realizadas para a determinação da dispersão dos resultados do ensaio de calorimetria isotérmica. O volume das amostras produzidas foram os mesmos para todas as determinações. As quantidades dos materiais empregados e a seqüência de mistura estão detalhadas no item 5.4.3. Os tempos de estabilização, obtidos a partir das curvas de calorimetria isotérmica, foram de 7; 8; 6 e 7 h, o que representou uma variação máxima de 2 h. A média obtida foi de 7 horas e o desvio padrão de 0,82 h, resultando num coeficiente de variação de 11,7%. É importante lembrar que esta variabilidade não está relacionada somente ao ensaio, mas também com a definição do tempo de estabilização, o que por sua vez depende do critério descrito no item 6.1.2. Além disso, esses resultados são válidos para os calorímetros empregados nos experimentos deste trabalho, portanto, deve ser considerado o material que os compõe e suas dimensões (área e espessura da parede), conforme detalhado no item 5.4.2.1.

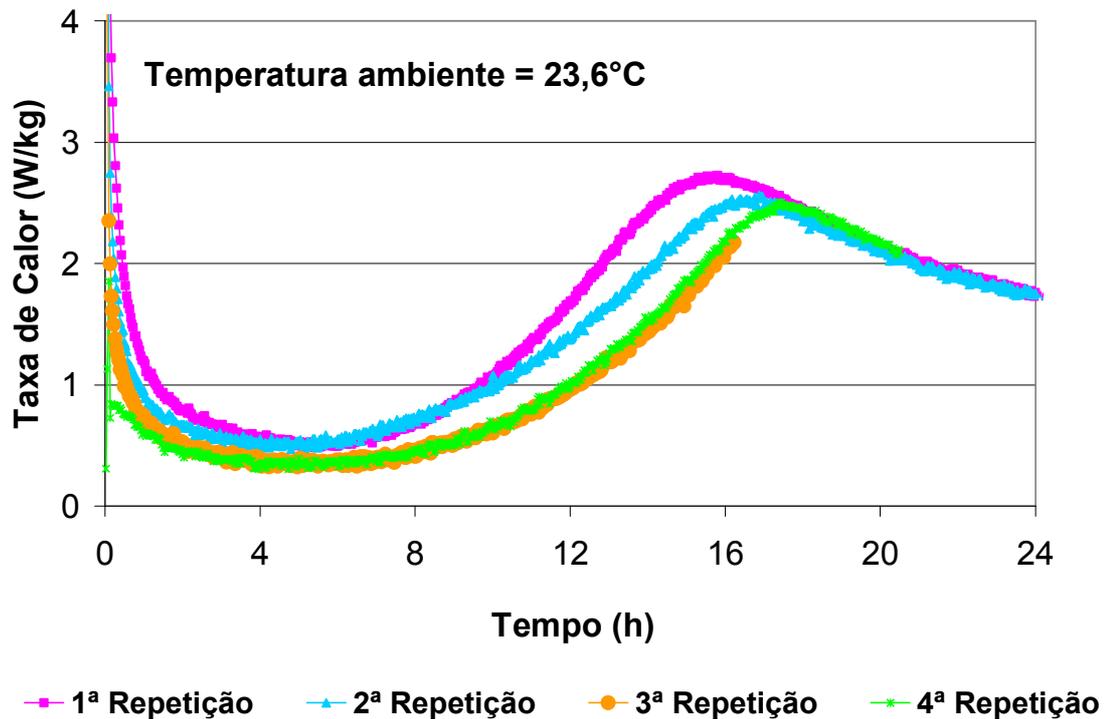


Figura 52 – Curvas calorimétricas das águas de lavagem estabilizadas, expressas através da taxa de calor em função do tempo.

#### 6.1.2.2 Determinação dos tempos de estabilização

A determinação dos tempos de estabilização para os diversos teores de AEH, através da calorimetria isotérmica, visa à obtenção dos teores, mínimo e de segurança, para a estabilização de águas de lavagem e aplicação nos concretos. Portanto, foram realizados 12 ensaios em águas de lavagem com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 2,2% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2% m.c. Entretanto, vale destacar que foi realizado um ensaio para o teor de 1,1% m.c., de acordo com as curvas calorimétricas apresentadas no APÊNDICE 6. A quantidade de material empregado na produção das amostras e a seqüência de mistura estão detalhadas no item 5.4.3. Com base nos resultados foram obtidos os tempos de estabilização em função do teor de AEH (Figura 53). Em virtude da precisão do ensaio isotérmico diminuir com o aumento do teor de AEH, devido à diminuição da taxa máxima de calor (Figura 51), os teores de AEH a partir de 1,8% m.c. não puderam ser determinados. A partir da relação entre os tempos de estabilização e os teores de AEH foi possível determinar o teor de AEH para um determinado período de estabilização.

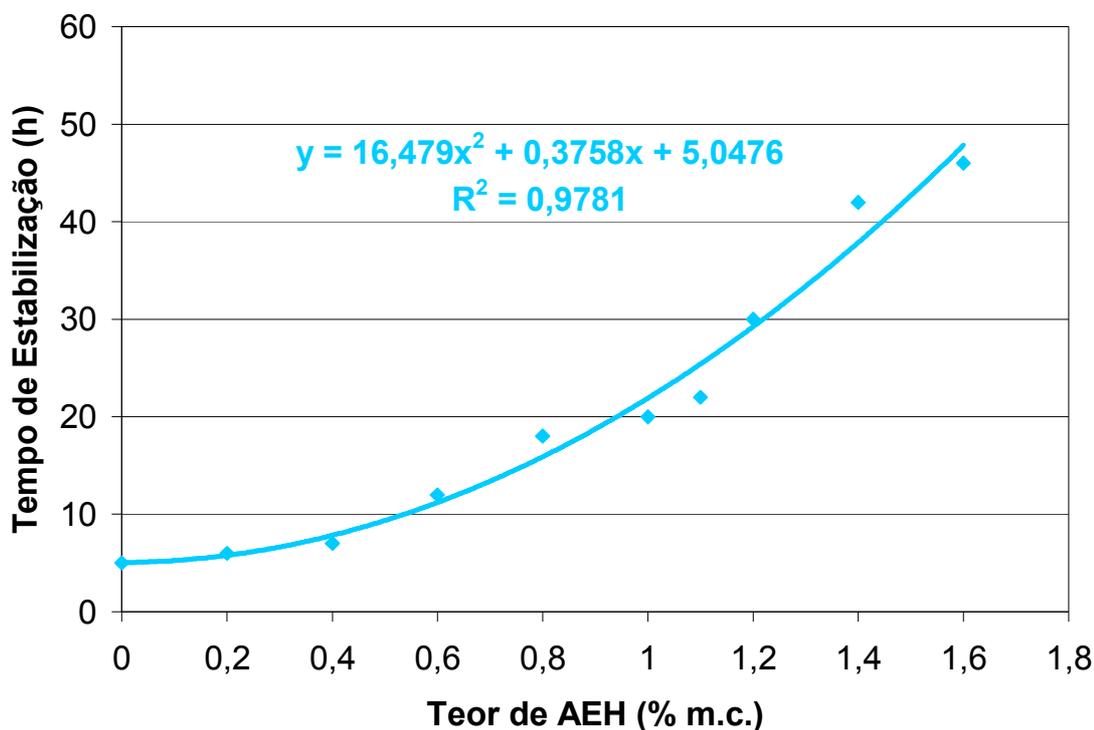


Figura 53 – Relação entre os tempos de estabilização e os teores de AEH.

Por simplificação, a partir do gráfico geral, com os teores de AEH de 0% a 1,6% m.c., localizado na Figura 53, foi extraído um trecho, o qual corresponde a uma regressão linear entre os tempos de estabilização e os teores de AEH de 0,4% a 1,2% m.c., com incrementos de 0,2% m.c. (Figura 54), visando à determinação dos teores mínimo e de segurança, para uma noite de estabilização. O referido intervalo, de variação do AEH, foi empregado por corresponder aos tempos de estabilização próximos ao desejado, o que garante uma maior precisão dos teores desejados. Desta forma, a partir da equação da regressão linear foram obtidos os valores de 0,8% m.c. (teor mínimo) para 16 horas e, 1,1% m.c. (teor de segurança) para 24 horas, tempos correspondentes a uma noite de estabilização. Estes teores representam uma economia de AEH acima de 80% m.c., em relação ao teor do fabricante (5,6% m.c.), determinado conforme o item 5.2.1.

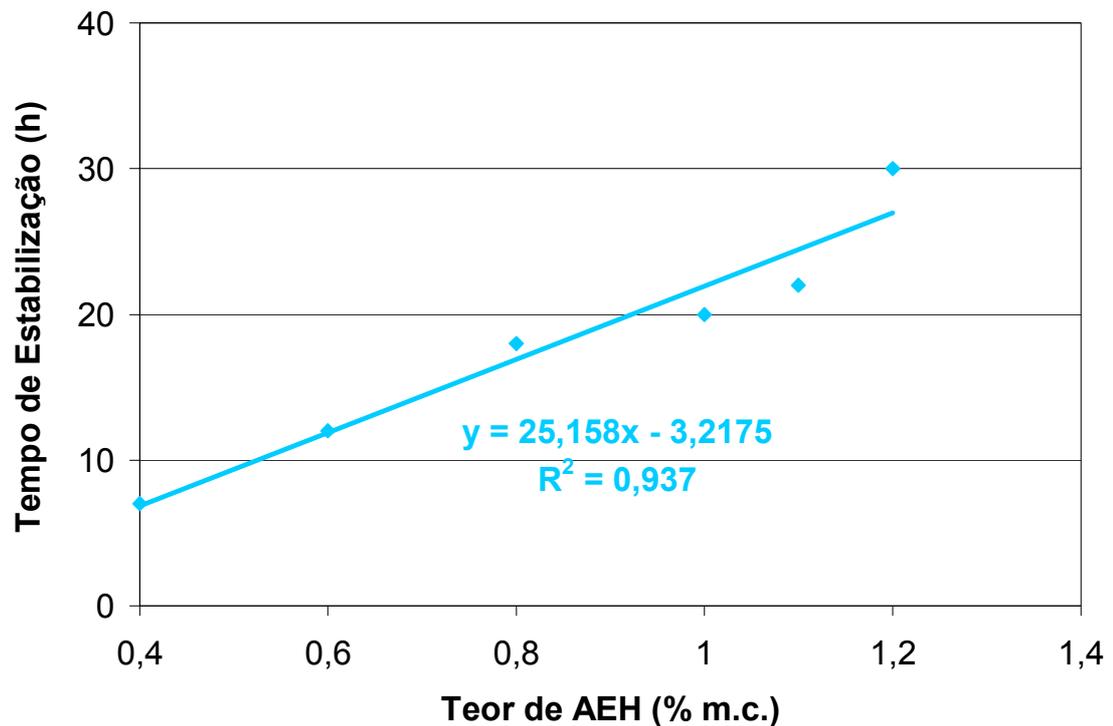


Figura 54 – Tempos de estabilização em função dos teores de AEH entre 0,4% e 1,2% m.c.

Na Figura 55 está representada a regressão linear dos tempos de estabilização para os teores de AEH de 1% a 2,2% m.c., o que representa um trecho extraído do gráfico geral (Figura 53). Não foi possível a determinação dos tempos de estabilização referentes aos teores de 2% e 2,2% m.c. de AEH, pelo ensaio isotérmico, em virtude da diminuição da taxa máxima de calor, em função do aumento do teor de AEH (Figura 51). Portanto, os valores foram baseados no método semi-adiabático, dada a proximidade dos resultados entre ambos os ensaios (conforme item 6.1.3). A forma de determinação dos teores mínimo e de segurança, para um fim de semana de estabilização, foi similar ao período de uma noite. Desta forma, os resultados obtidos foram de 2,2% m.c. (teor mínimo) para 64 horas e, 2,4% m.c. (teor de segurança) para 72 horas. Estes teores correspondem a uma economia de AEH acima de 78% m.c., em relação ao teor do fabricante (11,2% m.c.), determinado conforme o item 5.2.1.

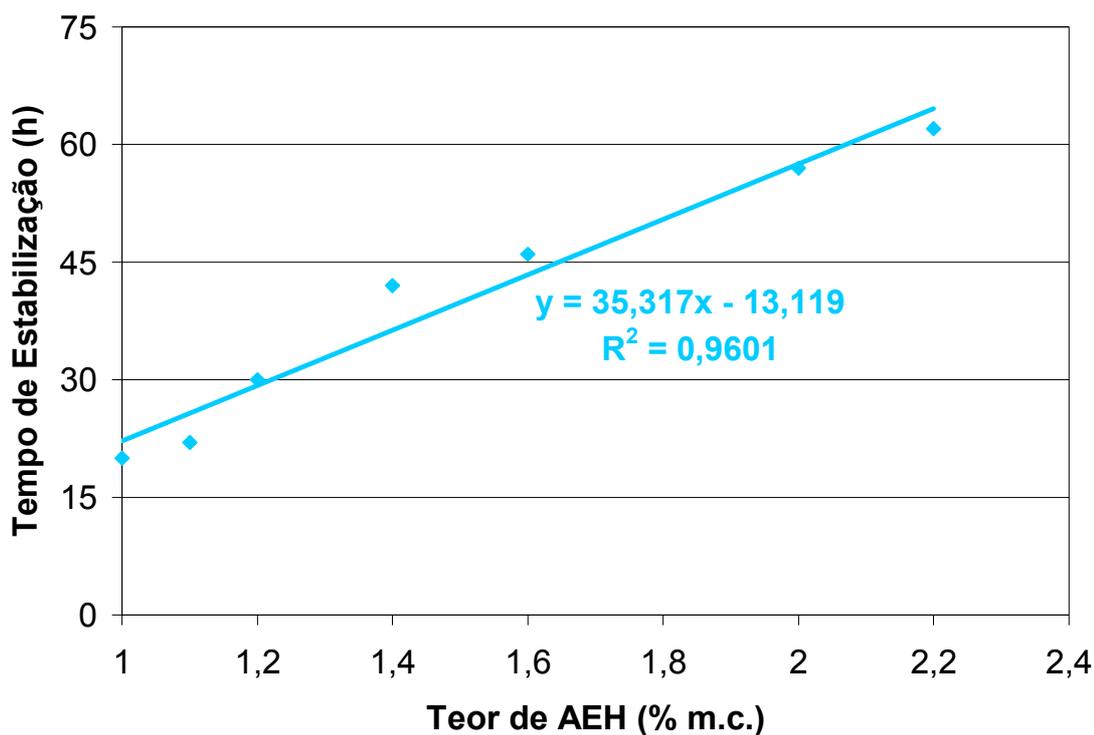


Figura 55 – Tempos de estabilização em função dos teores de AEH entre 1% e 2,2% m.c.

### 6.1.3 Comparação entre calorimetria isotérmica e semi-adiabática

Na Figura 56 estão apresentados os tempos de estabilização em função dos teores de AEH, para os ensaios isotérmico e semi-adiabático. Conforme já mencionado, em virtude da diminuição da taxa máxima de calor com o aumento do teor de AEH, os resultados, para a calorimetria isotérmica, a partir de 1,8% m.c. de AEH não estão plotados na curva. As curvas em ambos os ensaios foram bem ajustadas entre si, o que evidencia a pequena diferença entre os tempos de estabilização obtidos.

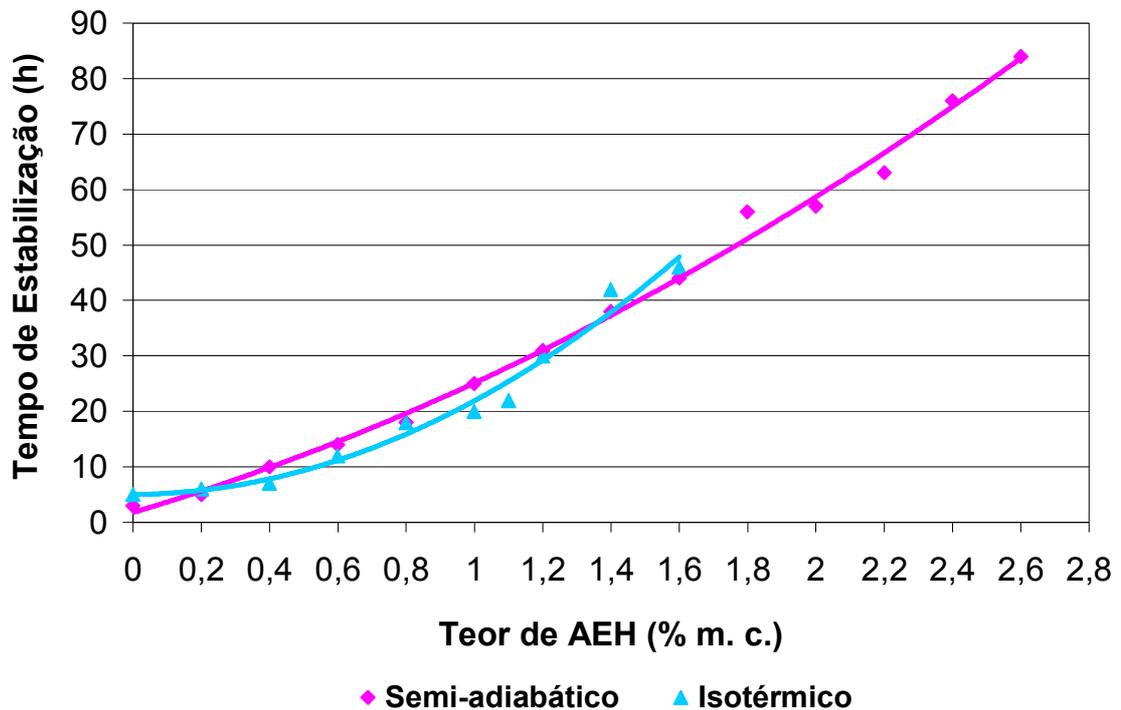


Figura 56 – Relação entre o teor de AEH e o tempo de estabilização, nos dois métodos calorimétricos.

O ensaio de calorimetria semi-adiabática apresentou menor coeficiente de variação, em relação ao isotérmico. No entanto, a menor variabilidade não está relacionada somente ao ensaio, mas também ao critério de definição do tempo de estabilização e com os calorímetros empregados.

Na Tabela 11 estão apresentados os teores mínimo e de segurança determinados em água de lavagem de  $a/c=10$ , para uma noite de estabilização, obtidos pelos ensaios calorimétricos. As equações das retas foram obtidas através da regressão linear dos tempos de estabilização em função dos teores de AEH, variando de 0,4% e 1,2% m.c., com incrementos de 0,2% m.c. Com base nos resultados, os teores mínimo e de segurança, exibidos pelo ensaio semi-adiabático, foram próximos ao isotérmico, indicando que é possível associar o início das reações de hidratação, localizadas nas curvas calorimétricas, com as curvas de evolução de temperatura.

A comparação dos teores mínimo e de segurança não foi realizada para um fim de semana de estabilização, visto não ter sido possível obter os tempos de estabilização a partir de 1,8% m.c. de AEH para o ensaio isotérmico.

Tabela 11 – Comparação entre os teores mínimo e de segurança determinados em água de lavagem de  $a/c=10$ , para uma noite de estabilização, obtidos através da calorimetria isotérmica e semi-adiabática.

Ensaio Calorimétrico	Equações da reta	Uma noite de estabilização	
		Teor Mínimo (para 16h)	Teor de segurança (para 24h)
Isotérmico	$28x-4,6$	0,74	1,02
Semi-adiabático	$26,5x-1,6$	0,66	0,97

A calorimetria isotérmica indicou uma diminuição da taxa máxima de calor com o aumento do teor de AEH para amostras com pouca quantidade de cimento e que não foram succionadas, o que representa uma limitação do método. De acordo com o aparato experimental do ensaio isotérmico, descrito no item 5.4.2.1, a área do trocador de calor e do transdutor foram fatores limitantes para as dimensões dos cubos de EPS, que por sua vez limitou a quantidade de cimento empregada no preparo das amostras (60 g). Contudo, se por um lado o consumo de cimento implicou na limitação do ensaio para teores de AEH acima de 1,8% m.c., por outro, a pequena quantidade de cimento não diminuiu a confiabilidade do ensaio para os menores teores de AEH, já que o ponto de término de estabilização das reações foi plenamente visualizado e os resultados foram coerentes ao semi-adiabático. Além disso, a aquisição direta da taxa de liberação de calor, e o maior controle das reações de hidratação, em virtude da imposição da temperatura durante o ensaio, são vantagens deste método. Entretanto, o custo do aparato experimental, composto por banho termostático, trocador de calor, transdutores, calorímetro e aquisitor de dados, é relativamente elevado, em relação ao método semi-adiabático.

O ensaio semi-adiabático requer a utilização de calorímetros de tamanhos grandes, quando não se procede ao succionamento de amostras que possuem pouca quantidade de cimento. Além disso, não mede diretamente a taxa de calor, e sendo assim, para sua determinação, é necessário o conhecimento da capacidade térmica do calorímetro, o calor específico da amostra e as perdas de calor para o ambiente. A medição da variação de temperatura da amostra e o desconhecimento das perdas de calor para o ambiente podem implicar em insegurança sobre a veracidade dos resultados, pois se as perdas de calor forem elevadas, as reações podem ter iniciado sem que as temperaturas sejam registradas. Contudo, o método semi-adiabático pode ser considerado uma opção confiável para a estimativa do tempo de estabilização de águas de lavagem, dada a proximidade com os resultados obtidos pela calorimetria isotérmica, o que representou uma diferença média nos tempos de estabilização de 3 horas.

## 6.2 Ensaio em concreto

### 6.2.1 Análise técnica

#### 6.2.1.1 Abatimento

Na Figura 57 estão apresentados os abatimentos iniciais dos concretos convencionais de referência e com água estabilizada, para uma noite e um fim de semana de estabilização, juntamente com as temperaturas ambiente e dos concretos. É notável o menor abatimento inicial dos concretos com os teores mínimo e de segurança, para os dois períodos de estabilização, demonstrando, na maioria dos casos, uma queda máxima de 7 cm no abatimento em relação à referência. Esta diminuição pronunciada no abatimento é preocupante para concretos lançados logo após sua produção, pois implica na necessidade de utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes para a correção do abatimento, resultando em aumento no custo final do concreto. No entanto, não foi objeto desta pesquisa quantificar a redosagem de aditivo plastificante necessária para tornar o abatimento dos concretos com os teores mínimo e de segurança compatível ao de referência, pois o tempo de lançamento adotado, para as misturas estudadas neste trabalho, foi após 1 hora.

O aumento considerável do teor de AEH, nos concretos com o teor do fabricante, pode ter provocado o aumento na fluidez em relação à referência, o que representou uma variação máxima no abatimento de 1 cm. De acordo com PAOLINI e KHURANA (1998), este efeito do AEH é compreensível em virtude da sua capacidade de controlar a hidratação de todos os minerais do clínquer, ocorrendo não apenas a diminuição da taxa de dissolução dos silicatos, mas também dos aluminatos, desta forma as propriedades reológicas da mistura são conservadas. Estudos realizados por Caliço (2005) demonstraram que concretos produzidos com águas de lavagem, estabilizadas por três dias, com 16% m.c. de AEH, exibiram maiores abatimentos iniciais em relação à mistura com 2% m.c. de AEH.

Provavelmente, a variação da temperatura dos concretos, de no máximo 2°C, e a temperatura ambiente registrada no momento da produção da mistura, não causou a diminuição acentuada no abatimento dos concretos com o teor mínimo e de segurança. No entanto, a proximidade dos abatimentos, apresentados por essas misturas, pode ter sido devido à pequena diferença na dosagem do AEH. Além disso, em virtude da reduzida quantidade de água de lavagem estabilizada, empregada na produção dos concretos (aproximadamente 14% em substituição à água potável), é possível que o cimento estabilizado, proveniente da água de lavagem, não tenha contribuído para a diminuição da fluidez, já que representa 0,99% em massa do cimento novo empregado na produção do concreto. Os consumos dos materiais empregados na produção do concreto estão detalhados no APÊNDICE 1. Contudo, algumas pesquisas realizadas em concretos e argamassas com águas de lavagem sem AEH apresentaram uma diminuição da fluidez. Borger et al. (1994) observaram a diminuição na consistência das argamassas nos casos em que a água de lavagem possuía maior quantidade de cimento residual ( $a/c=5$ ), em relação às misturas com menor quantidade de cimento residual ( $a/c=10$ ). Segundo os autores, a quantidade de finos ou a presença de aditivos na água de lavagem podem aumentar a demanda por água para atingir um determinado abatimento. Sandrolini e Franco (2000) concluíram que a utilização de água de lavagem em concreto causa uma ligeira redução na fluidez, pois o aumento do teor de partículas residuais resulta na diminuição da relação  $a/c$ . Entretanto, Nan et al. (2002) somente verificaram uma diminuição significativa na fluidez das argamassas produzidas com águas de lavagem com diferentes concentrações de sólidos, quando o resíduo apresentou uma concentração muito alta de partículas sólidas, isto é, quando o total de sólidos variou de 3930 para 7130 ppm. A ASTM C 94 (2004) recomenda concentrações menores que 50.000 ppm. Já Chatveera et al (2006) variaram a porcentagem de substituição da água de lavagem para a produção de concreto e constataram a redução do abatimento. Os pesquisadores explicam que, a grande quantidade de partículas residuais tende a aumentar a quantidade de água a ser adsorvida na superfície e absorvida dentro das partículas, refletindo na diminuição da fluidez.

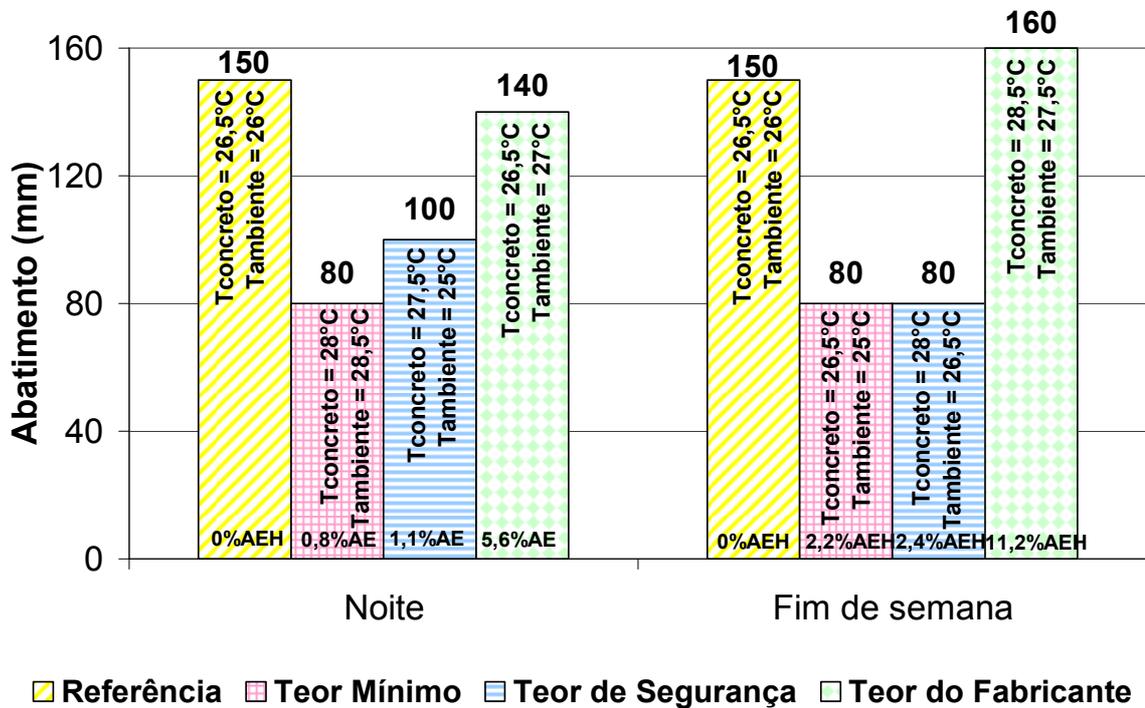


Figura 57 – Abatimento inicial dos concretos convencionais.

Na Figura 58 estão apresentados os abatimentos iniciais dos concretos de maior resistência com água de lavagem estabilizada e de referência. A variação da temperatura ambiente registrada foi de 2°C, além disso, as temperaturas do concreto, não sofreram variação considerável. É evidente o menor abatimento inicial dos concretos com águas de lavagem estabilizada em relação à referência. Desta forma, a mistura com menor teor de AEH exibiu uma queda de 2 cm no abatimento em relação à referência e, a mistura com maior teor de AEH apresentou uma ligeira queda de 1 cm.

Em síntese, os concretos convencionais com menor quantidade de AEH presente nas águas de lavagem (teores mínimo e de segurança), para os dois períodos de estabilização, demonstraram uma diminuição pronunciada do abatimento inicial em relação à referência, indicando a necessidade de utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes para a correção do abatimento. No entanto, os concretos de maior resistência com água de lavagem estabilizada apresentaram abatimentos iniciais equivalentes ao de referência, não havendo necessidade de ajustes no abatimento.

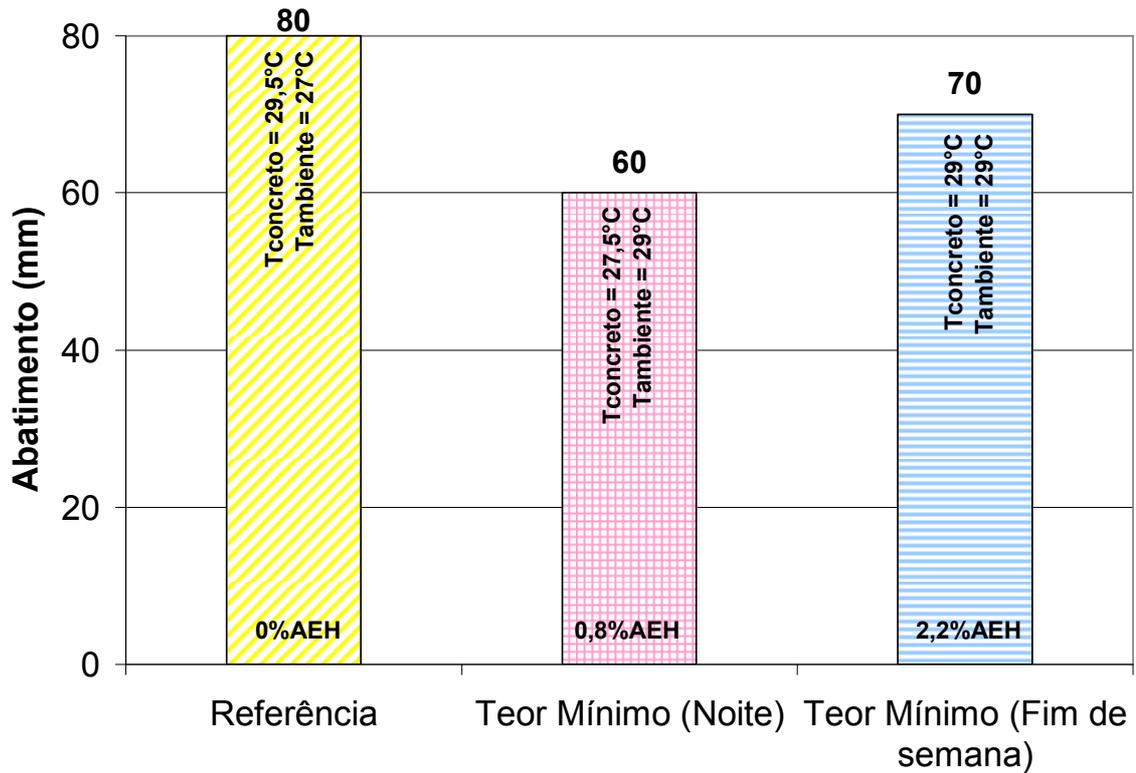


Figura 58 – Abatimento inicial dos concretos de maior resistência.

#### 6.2.1.2 Perda de abatimento

A perda de abatimento dos concretos convencionais de referência e com água estabilizada, para uma noite e um fim de semana de estabilização, é exibida nas Figuras 59 e 60. Os concretos com maior fluidez inicial apresentaram maiores perdas de abatimento nos primeiros 15 minutos, o que representou mais de 33% para os concretos com o teor do fabricante e de referência, para os dois períodos de estabilização. No entanto, os teores mínimo e de segurança demonstraram valores inferiores a 25% para o mesmo intervalo de tempo. A tendência dos concretos com maior abatimento inicial exibirem perdas de abatimento mais acentuadas foi observada por Previte (1977).

Na Tabela 12 são apresentadas as perdas de abatimento total, em uma hora, dos concretos com água de lavagem estabilizada em relação à referência. Embora todos os concretos tenham apresentado variadas perdas de abatimento ao longo do tempo, após uma hora os abatimentos dos concretos com água de lavagem estabilizada foram praticamente iguais ao de referência. Desta forma, mais da metade das misturas exibiram valores de perda de abatimento total em uma hora, acima de 90%, em relação à referência. Os concretos com o teor de segurança, para ambos

os períodos de estabilização, e o teor mínimo, para um fim de semana de estabilização, exibiram um desempenho ligeiramente superior, correspondente a 75%.

Não é possível afirmar que os maiores tempos de estabilização promoveram maiores quedas no abatimento. Perante a tênue diferença na perda de abatimento total em uma hora, exibida pelos concretos, deve ser lembrado que, a dosagem de AEH é consideravelmente baixa, já que foi empregada em relação à massa de cimento estabilizado, que corresponde a uma quantidade de 0,99% em massa do cimento novo empregado na produção do concreto convencional. Contudo, houve uma leve tendência das misturas com menor teor de AEH (teor mínimo e de segurança) apresentarem menores perdas de fluidez, quando comparadas ao concreto com teor do fabricante, para os dois períodos de estabilização.

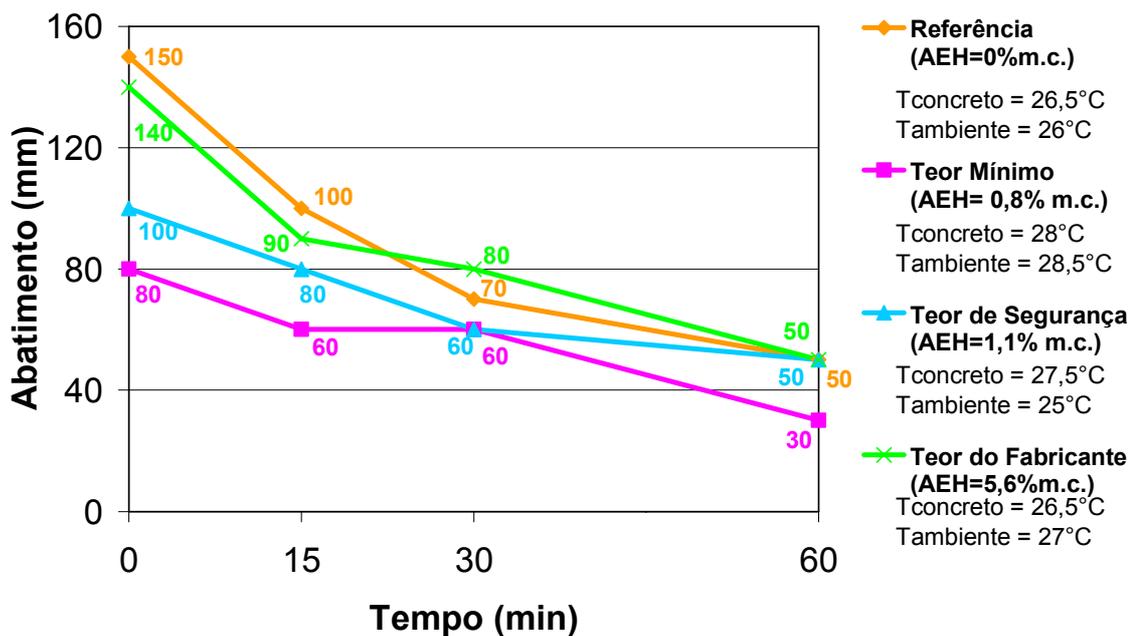


Figura 59 – Perda de abatimento dos concretos convencionais para uma noite de estabilização.

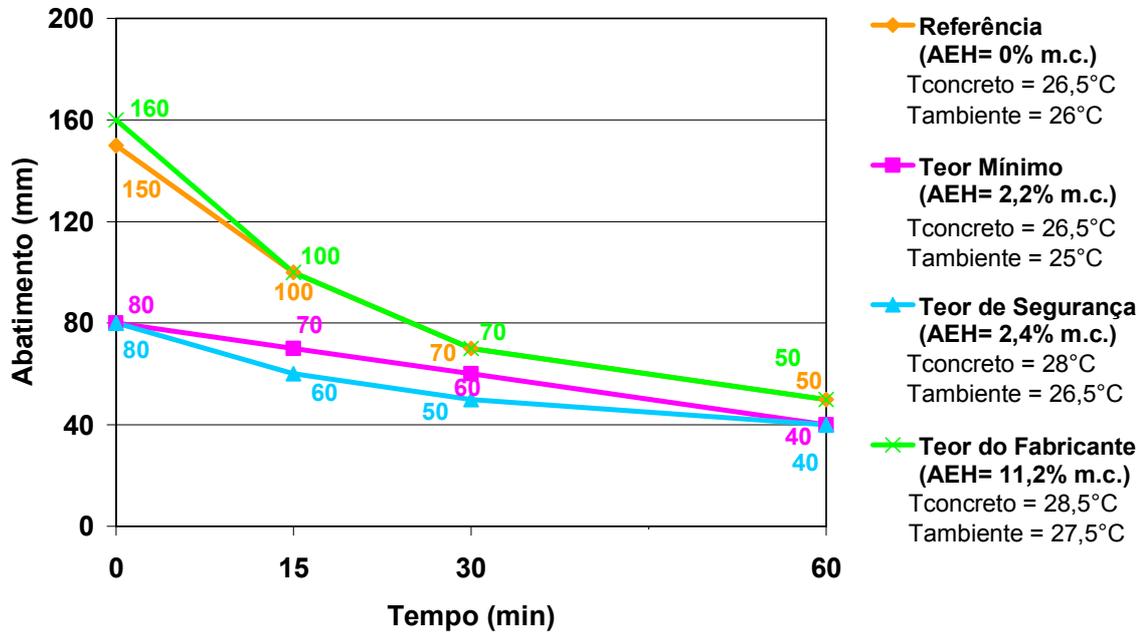


Figura 60 - Perda de abatimento dos concretos convencionais para um fim de semana de estabilização.

Com base nos resultados para o concreto de maior resistência, apresentados na Figura 61, constata-se uma diferença pouco acentuada na fluidez inicial dos concretos, sendo observado um ligeiro acréscimo no abatimento com o aumento do teor de AEH. As misturas com água de lavagem exibiram perda de fluidez total não superior a 79% da referência. No entanto, não houve uma variação expressiva entre os abatimentos finais dos concretos.

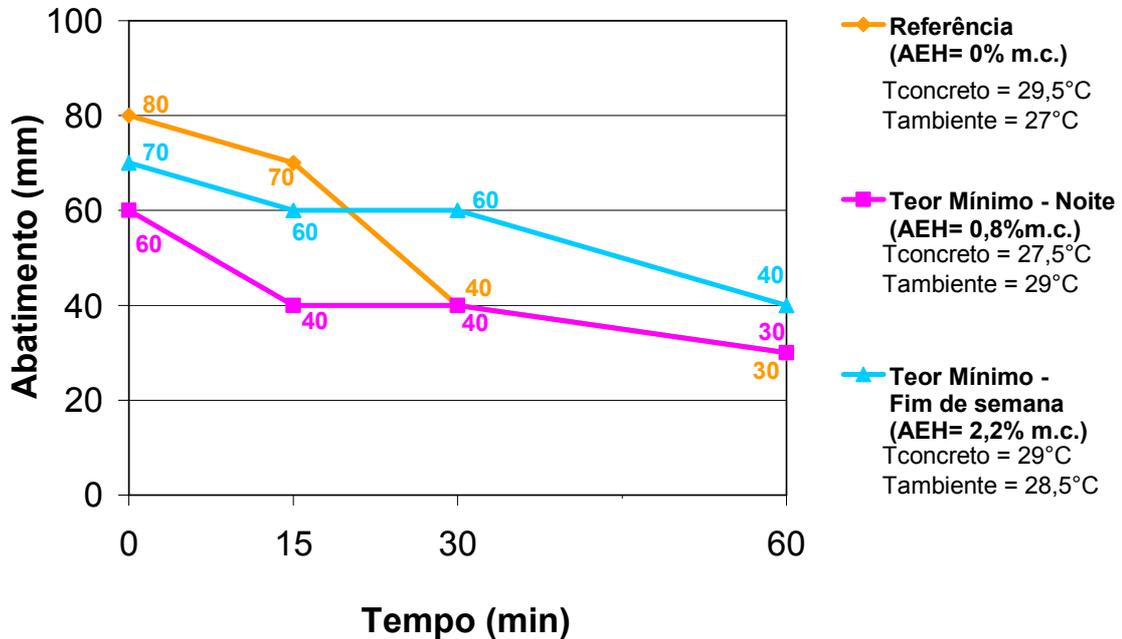


Figura 61 – Perda de abatimento dos concretos de maior resistência para uma noite e um fim de semana de estabilização.

De acordo com Ramachandran (1998), o mecanismo da perda de abatimento está relacionado à coagulação das partículas de cimento, bem como com a reação da fase aluminato com o sulfato e a produção de produtos hidratados. De acordo com a literatura, não há consenso sobre a influência dos retardadores na perda de abatimento. Estudos realizados por Previte (1977) demonstraram que a presença de retardadores não afeta necessariamente a perda de abatimento. Costenaro e Isa (1999) concluíram que a presença de aditivos retardadores pode duplicar o tempo de fluidez em concretos de alto desempenho. Benini (2005) notou que concretos tratados com maiores teores de AEH apresentaram maiores quedas no abatimento, mesmo com a reação de hidratação do cimento estabilizada. O autor sugere que este fenômeno esteja associado aos efeitos sobre o potencial zeta das partículas em suspensão ao longo do tempo, nas misturas em repouso, formando os primeiros contatos por coagulação. Peneirol (2006) verificou que o espalhamento das argamassas geralmente diminuiu com o aumento do teor de AEH presente nas águas de lavagem. Contudo, concluiu que as variações no comportamento reológico das argamassas não foram afetadas de maneira relevante.

Um fator que pode ter contribuído para a alta perda de abatimento, foi o volume de concreto que não permaneceu constante durante o ensaio, já que parte de sua massa foi retirada, para ser submetida ao peneiramento para o ensaio de pega. Portanto, com a diminuição do volume da mistura, a área disponível para evaporação é aumentada. Segundo Neville (1997); Mehta e Monteiro (1994) o enrijecimento do concreto está associado com a perda de água por absorção dos agregados, por evaporação, pelas reações iniciais e pela adsorção da água na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade. No entanto, vale ressaltar que a massa de concreto era retirada após a leitura correspondente a 15 minutos, sendo que a queda no abatimento é constatada desde este intervalo de tempo. Além disso, embora o procedimento ideal de execução do ensaio seja com o volume total de concreto, a variação na massa do material não comprometeu a análise comparativa da perda de abatimento entre as misturas.

A presença de águas de lavagem estabilizada na produção de concretos não afetou o abatimento final, dada a proximidade dos resultados com a referência. No entanto, se o lançamento da mistura for realizado antes de uma hora, correções na composição deverão ser feitas, para aumentar o abatimento do concreto com água estabilizada e torná-lo compatível ao de referência.

Tabela 12 – Perda de abatimento em relação ao concreto de referência em uma hora.

Tipo de Concretos		(%)		
Convencional	Referência (AEH = 0% m.c.)		100	
	Noite	Teor Mínimo (AEH = 0,8% m.c.)	92	
		Teor de Segurança (AEH = 1,1% m.c.)	75	
		Teor de Fabricante (AEH = 5,6% m.c.)	95	
	Fim de semana	Teor Mínimo (AEH = 2,2% m.c.)	75	
		Teor de Segurança (AEH = 2,4% m.c.)	75	
		Teor de Fabricante (AEH = 11,2% m.c.)	103	
	Maior Resistência	Referência (AEH = 0% m.c.)		100
		Teor Mínimo (Noite) (AEH = 0,8% m.c.)		79
Teor Mínimo (Fim de semana) (AEH = 2,2% m.c.)		68		

### 6.2.1.3 Pega

Conforme já mencionado no Capítulo 5, o ensaio de pega está subdividido em duas partes. A primeira apresenta a medição dos tempos de pega através do método de resistência à penetração, visando a verificação do efeito das águas de lavagem em argamassas; a segunda parte apresenta a evolução de temperatura em argamassas, tendo por objetivo saber se é possível relacionar, nas curvas de evolução de temperatura, a variação de temperatura correspondente ao início e fim de pega, com os tempos de início e fim de pega, determinados a partir do ensaio de resistência à penetração. A NBR NM 9 (2003) recomenda que o ensaio de resistência à penetração seja feito em argamassas obtidas a partir do peneiramento do concreto, por isso ambos os ensaios de pega foram realizados em argamassa.

#### a) Resistência à penetração

No APÊNDICE 7 estão apresentadas as regressões lineares do tempo decorrido em função da resistência à penetração das argamassas ensaiadas, para a obtenção dos tempos de pega; todos os coeficientes de correlação linear das curvas foram maiores ou iguais a 0,98. Com base nos resultados, estão descritos na Figura 62, os tempos de início de pega das argamassas convencionais de referência e com água de lavagem, para uma noite e um fim de semana de estabilização. Através dos resultados foi verificado que, mesmo com a presença de AEH nas argamassas com teor mínimo e de segurança, para os dois períodos de estabilização, não foi observado retardo nos tempos de pega em relação à de referência. Ao contrário, através dos dados apresentados na Tabela 13 percebe-se que, para uma noite de estabilização houve uma aceleração de 14 min no início de pega das argamassas com o teor mínimo e, de 44 min com o teor de segurança. Para um fim de semana de estabilização, a aceleração no início de pega foi de 12 min para o teor mínimo e, de 51 min para o teor de segurança. No entanto, em virtude do aumento da dosagem do AEH, as argamassas com o teor do fabricante, para os dois períodos de estabilização, indicaram um ligeiro retardo de início de pega, o que representou o atraso de 23 min para uma noite de estabilização e, 43 min para um fim de semana de estabilização em relação à referência.

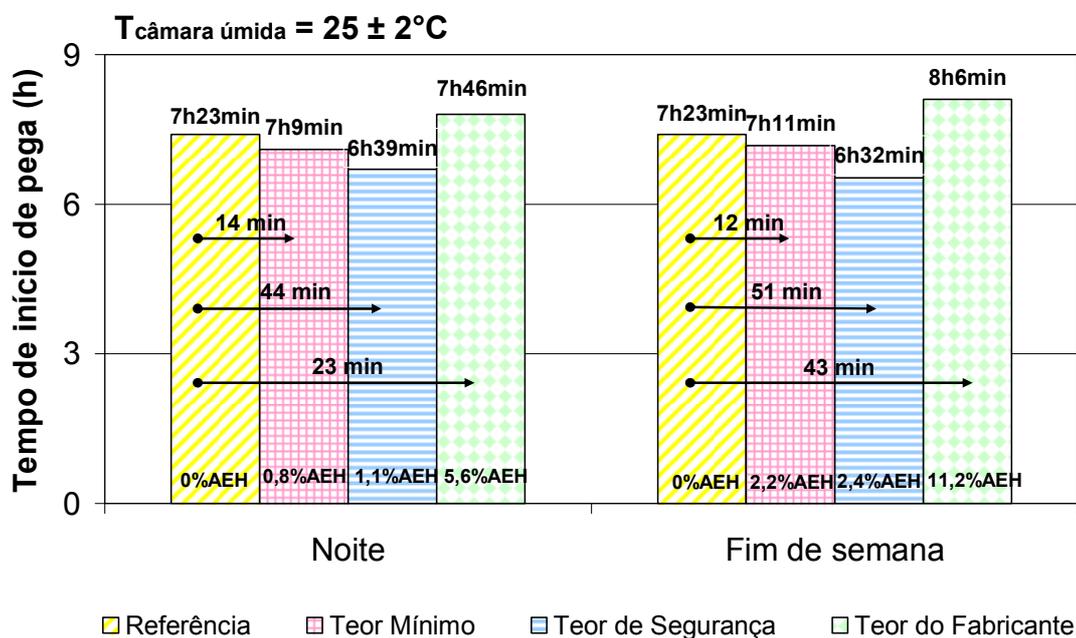


Figura 62 – Tempo de início de pega das argamassas convencionais.

Na Figura 63 são apresentados os tempos de fim de pega das argamassas convencionais. As misturas com o teor mínimo e de segurança demonstraram aceleração nos tempos de fim de pega, em relação à de referência. Novamente, as argamassas com o teor do fabricante exibiram retardo de pega, com relação à de referência.

Embora a argamassa com o teor do fabricante, para o maior período de estabilização, represente o aumento expressivo de 50% m.c. de AEH, o acréscimo não resultou em retardo de pega considerável quando comparado à mistura para uma noite de estabilização. A tendência de aceleração das argamassas com o teor mínimo e de segurança, pode ser atribuída à pequena variação na quantidade de AEH, empregado em função do cimento estabilizado das águas de lavagem aplicadas nos concretos, entretanto o menor abatimento inicial, dessas misturas, teve uma contribuição superior neste comportamento. Além disso, é possível que o menor teor de AEH, presente nas argamassas, tenha exercido uma intervenção diferente nas reações de hidratação, em relação às misturas com maior dosagem de AEH. SU et al. (2002) verificou uma aceleração de pega em argamassas produzidas com águas de lavagem sem AEH e com alta concentração de sólidos e, sugeriu que o comportamento possa ter ocorrido em virtude da maior quantidade de álcalis e devido à presença de cimento parcialmente hidratado e finos.

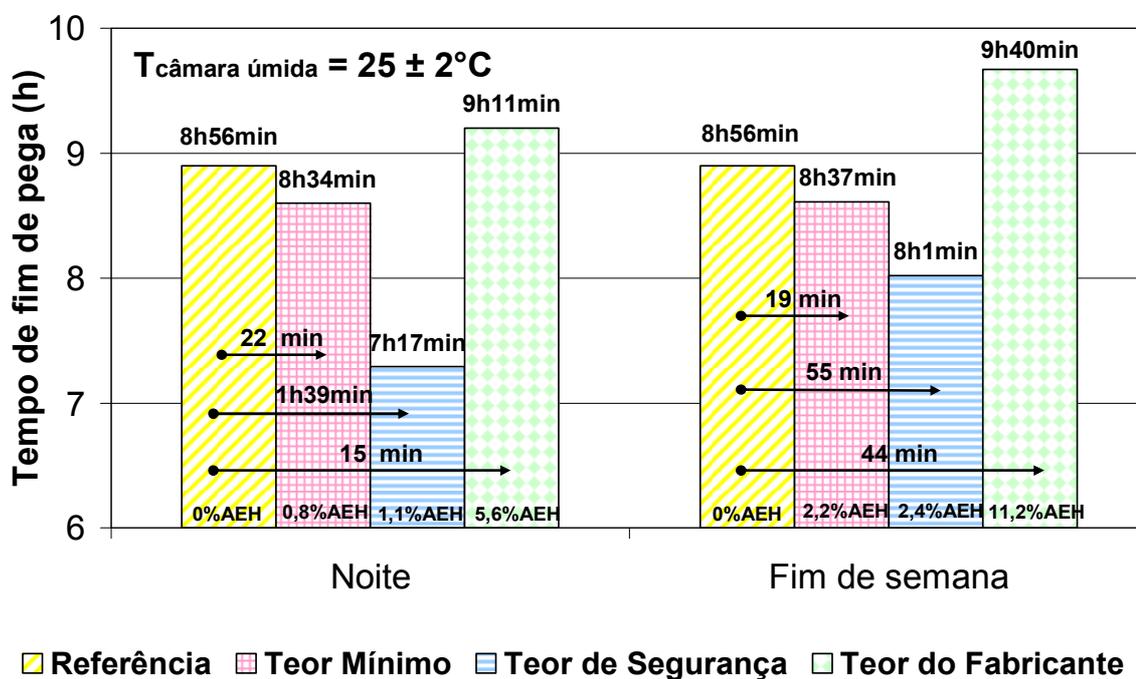


Figura 63 – Tempo de fim de pega das argamassas convencionais.

Não foi observado um comportamento linear entre o teor de AEH e os tempos de pega. Além disso, não foi verificada uma relação entre o prolongamento dos intervalos de início e fim de pega com o aumento da quantidade de AEH. De acordo com os dados apresentados na Tabela 13 constata-se que, as argamassas convencionais com o teor de segurança, para os dois períodos de estabilização, exibiram os menores intervalos entre os tempos de pega, o que representou o valor máximo de 44 min. As demais apresentaram uma média de 1h29min, independente da dosagem de AEH. Granato e Paulon (2003) concluíram que, maiores adições de AEH em concretos proporcionam maiores tempos de início e fim de pega, bem como maiores intervalos entre os tempos de pega. Contudo, vale ressaltar que, a quantidade de AEH empregado para estabilizar concreto, é consideravelmente superior ao teor utilizado para estabilizar águas de lavagem, o que justifica o aumento do efeito do AEH no primeiro caso.

À exceção do tempo de fim de pega, demonstrado pela mistura com o teor de segurança, para uma noite de estabilização, todas as argamassas atenderam ao limite estabelecido pela ASTM C 94 (2004) quando comparadas à referência, que especifica uma tolerância de aceleração em 1 h e, um retardamento de até 1,5 h, nos tempos de pega. Da mesma forma, estudos conduzidos por Chini et al. (2001) em concretos produzidos com águas de lavagem sem AEH, e por Su et al. (2002) em argamassas preparadas com águas de lavagem sem AEH e com diferentes concentrações de sólidos, demonstraram que todas as misturas atenderam ao intervalo requerido pela ASTM C 94.

Na Figura 64 estão exibidos os tempos de início e fim de pega das argamassas de maior resistência. Com base nos resultados, foi constatado que, as argamassas com água de lavagem estabilizada apresentaram maiores tempos de pega em relação às de referência. Entretanto, os tempos de pega e o intervalo entre início e fim de pega não aumentaram proporcionalmente com o teor de AEH.

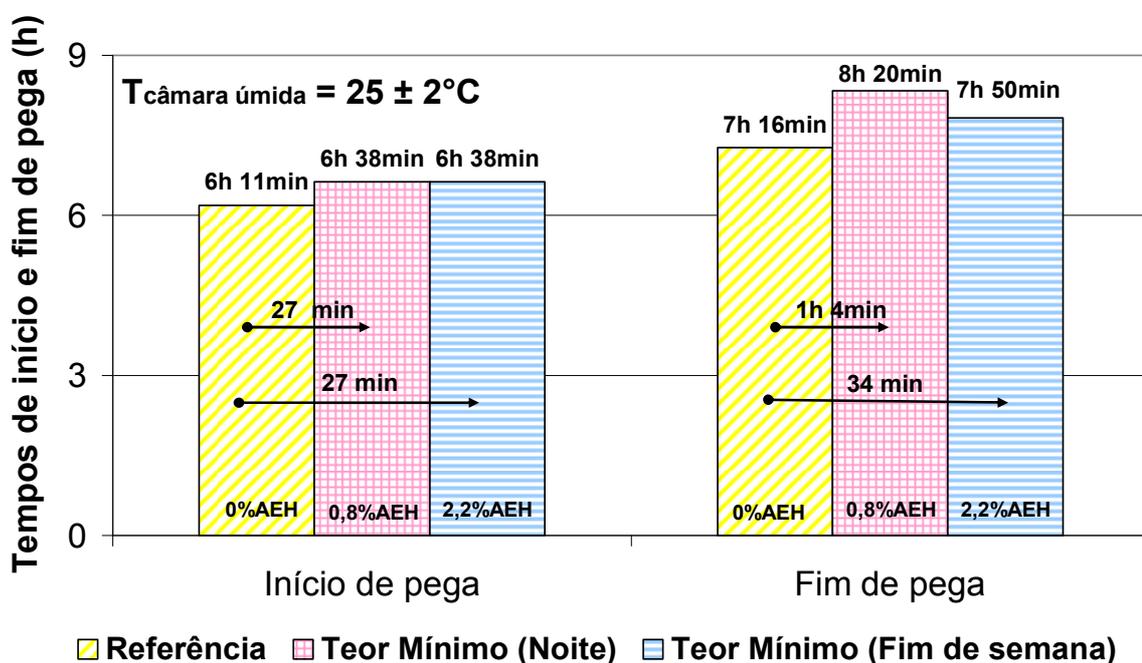


Figura 64 – Tempos de início e fim de pega das argamassas de maior resistência.

Em virtude dos ensaios terem sido realizados em câmara úmida, variáveis como a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar foram controladas e, portanto, estes fatores exerceram a mesma influência sobre todas as misturas.

A elevada finura do cimento e o maior desprendimento do calor de hidratação diminuem os tempos de pega, pois aumentam a velocidade da hidratação. Como a hidratação se inicia na superfície das partículas, é a área total da superfície do cimento que representa o material disponível para a hidratação (NEVILLE, 1997). Embora as argamassas apresentem em sua composição cimento de elevada finura e alto calor de hidratação, do tipo CPV-ARI-RS, todas as misturas apresentaram prolongamento nos tempos de pega, provavelmente devido à presença de aditivo plastificante de base lignosulfonato. Collepardi (1984) justifica que, este aditivo prolonga os tempos de pega porque diminui a taxa de hidratação do cimento durante as primeiras horas, bem como apresenta os principais componentes usados nos retardadores. Por isso muitos retardadores reduzem a água de mistura e muitos redutores retardam o tempo de pega. Como já mencionado na análise em águas de lavagem, Kennerley et al. (1960 apud MILESTONE, 1979) afirma que estes aditivos, em altas dosagens, podem causar retardo de pega, devido a presença de açúcares em sua composição.

Em síntese, não foi observada uma associação entre o prolongamento dos tempos de pega e o aumento do teor de AEH. Os teores de AEH, empregados na estabilização de águas de lavagem de acordo com o limite recomendado pelo fabricante, não causaram retardo significativo nos tempos de pega em comparação à argamassa de referência, ou seja, tecnicamente não há restrição ao seu uso na estabilização de águas de lavagem. Com exceção do tempo de fim de pega exibido pela argamassa com o teor de segurança, para uma noite de estabilização, todas as argamassas apresentaram variações nos tempos de pega dentro do limite estabelecido pela ASTM C 94 (2004).

Tabela 13 – Tempos de pega determinados através da resistência à penetração.

Tipos de Concreto		Tempo de início de pega (h/min)	Varição em relação à referência (h/min)	Tempo de fim de pega (h/min)	Varição em relação à referência (h/min)	Intervalo entre o início e fim de pega (h/min)	Diminuição ou aumento do intervalo entre o início e fim de pega (h/min)	
Concreto Convencional	Referência (AEH = 0% m.c.)	7:23	-	8:56	-	1:33	0:00	
	Noite	Teor Mínimo (AEH = 0,8% m.c.)	7:09	-0:14*	8:34	-0:22	1:25	-0:08
		Teor de Segurança (AEH = 1,1% m.c.)	6:39	-0:44	7:17	-1:39	0:38	-0:55
		Teor de Fabricante (AEH = 5,6% m.c.)	7:46	+0:23	9:11	+0:15	1:25	-0:08
	Fim de semana	Teor Mínimo (AEH = 2,2% m.c.)	7:11	-0:12	8:37	-0:19	1:26	-0:07
		Teor de Segurança (AEH = 2,4% m.c.)	6:32	-0:51	8:01	-0:55	0:44	-0:49
		Teor de Fabricante (AEH = 11,2% m.c.)	8:06	+0:43	9:40	+0:44	1:34	+0:01
	Concreto de Maior Resistência	Referência (AEH = 0% m.c.)	6:11	-	7:16	-	1:05	0:00
		Teor Mínimo (Noite) (AEH = 0,8% m.c.)	6:38	+0:27	8:20	+1:04	1:42	+0:37
		Teor Mínimo (Fim de semana) (AEH = 2,2% m.c.)	6:38	+0:27	7:50	+0:34	1:12	+0:07

\*Sinal negativo indica aceleração de pega, sinal positivo indica atraso de pega.

## b) Evolução de temperatura

Os tempos de pega, obtidos a partir do ensaio de resistência à penetração, foram localizados nas curvas de evolução de temperatura das argamassas com água estabilizada, juntamente com a referência e o ambiente, ao longo de 18 horas. Quando apenas uma temperatura ambiente estiver plotada, significa que ambas as misturas foram produzidas no mesmo dia; caso o gráfico apresente duas temperaturas ambiente, implica que as misturas foram preparadas em dias diferentes, de acordo com a identificação das Figuras 65 a 67.

Todas as misturas convencionais com água de lavagem tenderam a um ligeiro incremento nas temperaturas, correspondentes ao início e fim de pega, em relação à referência, resultando, na grande maioria dos casos, em maior variação de temperatura. Contudo, a utilização de águas de lavagem não afetou, consideravelmente, o aumento de temperatura, havendo inclusive uma diminuição para as misturas de maior resistência, em relação à referência. Chatveera, et al. (2006) verificou um pequeno aumento de temperatura nos concretos com água estabilizada. Ramachandran e Lowery (1992) constataram, através de curvas de condução calorimétrica de pastas com vários tipos de aditivos retardadores, em diferentes dosagens, que a presença de retardador altera, significativamente, o comportamento das curvas. Portanto, a taxa de calor correspondente ao pico máximo, é menor para as misturas contendo retardadores em relação à de referência, sem retardador.

Na Tabela 14 estão descritas as temperaturas das argamassas, obtidas no ensaio de evolução de temperatura, correspondentes aos tempos de início e fim de pega, medidos por resistência à penetração, e as temperaturas mínimas e máximas da curva de evolução de temperatura. Com base nos resultados, não foi possível relacionar a variação de temperatura, correspondente aos tempos de início ou fim de pega, com os tempos de pega identificados nas curvas de evolução de temperatura. Além disso, não foi constatada uma relação entre a variação de temperatura correspondente à temperatura mínima durante o período de dormência e à temperatura máxima localizada no pico da curva de evolução de temperatura. Os intervalos entre o início e o fim de pega foram próximos, provavelmente, por ter sido empregado cimento de elevada finura, do tipo CPV-ARI-RS, resultando no aumento da velocidade das reações e na antecipação, principalmente, do fim de pega, localizado bem antes do pico máximo de evolução de temperatura.

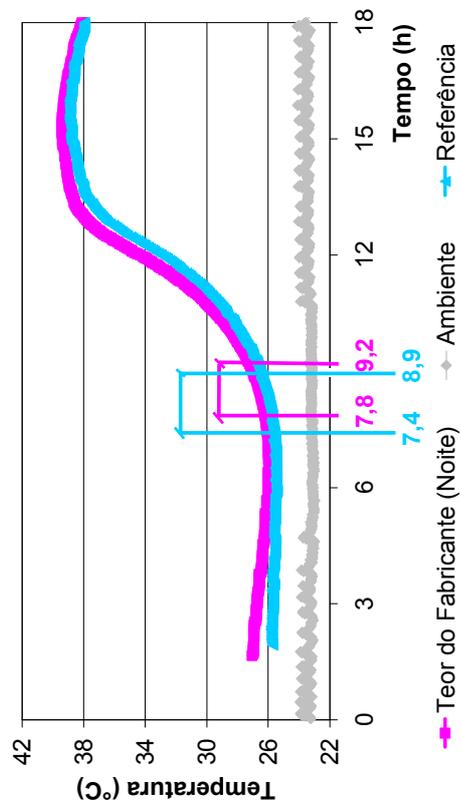
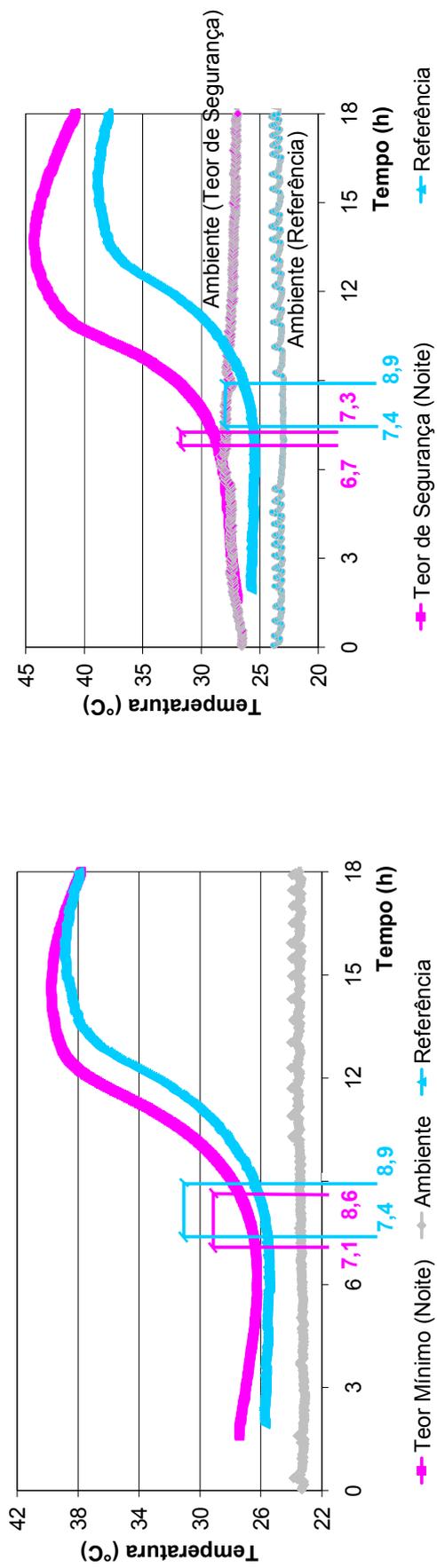


Figura 65 – Intervalo entre o início e fim de pega, localizado na curva de evolução de temperatura das argamassas convencionais com os diferentes teores de AEH, para uma noite de estabilização, em relação à referência. Os tempos de pega apresentados nos gráficos foram medidos através de método de resistência à penetração.

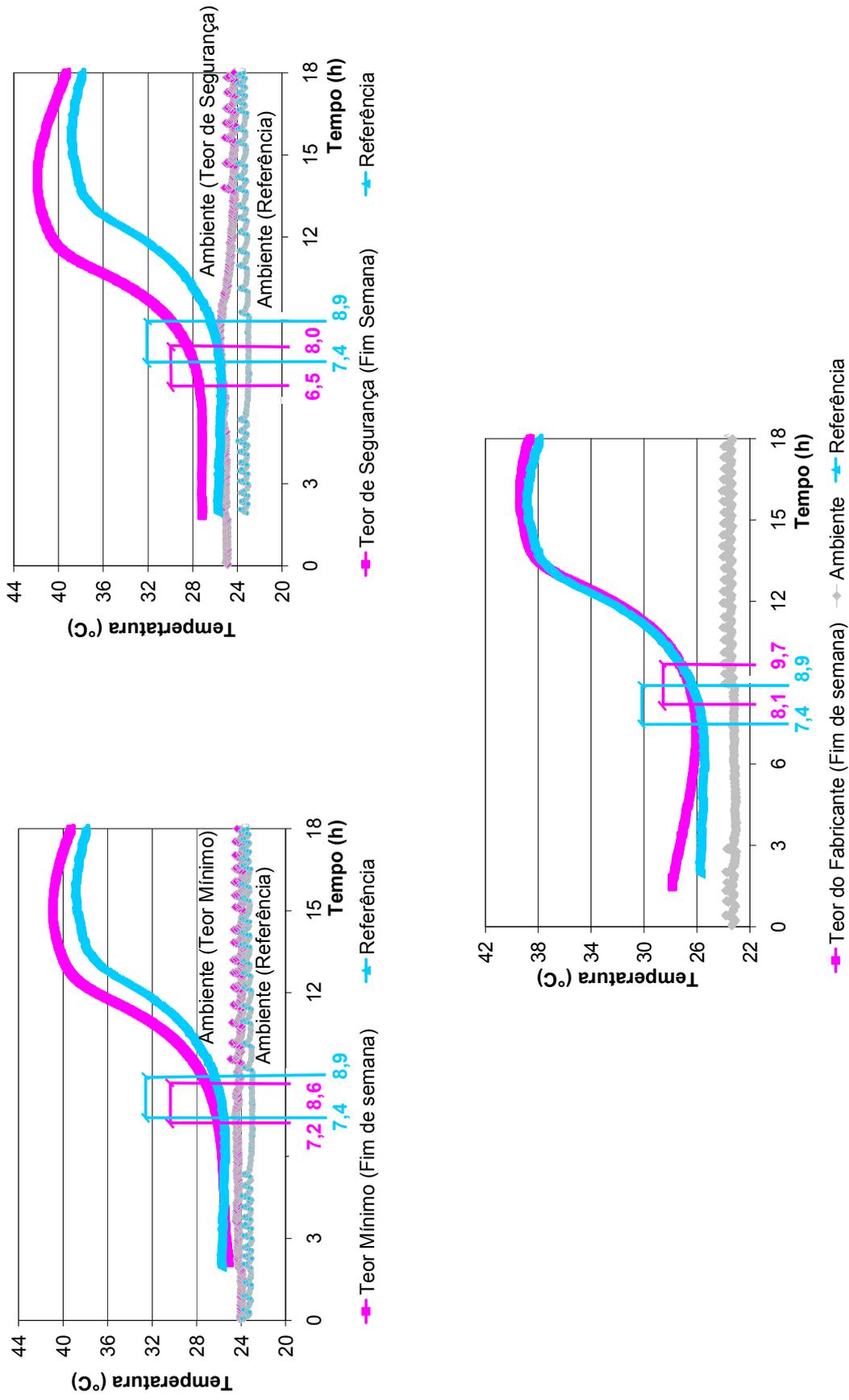


Figura 66 – Intervalo entre o início e fim de pega, localizado na curva de evolução de temperatura das argamassas convencionais com os diferentes teores de AEH, para um fim de semana de estabilização, em relação à referência. Os tempos de pega apresentados nos gráficos foram medidos através de método de resistência à penetração.

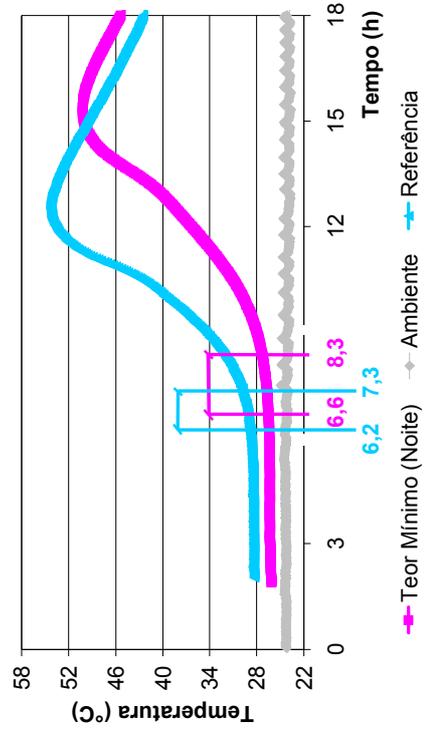
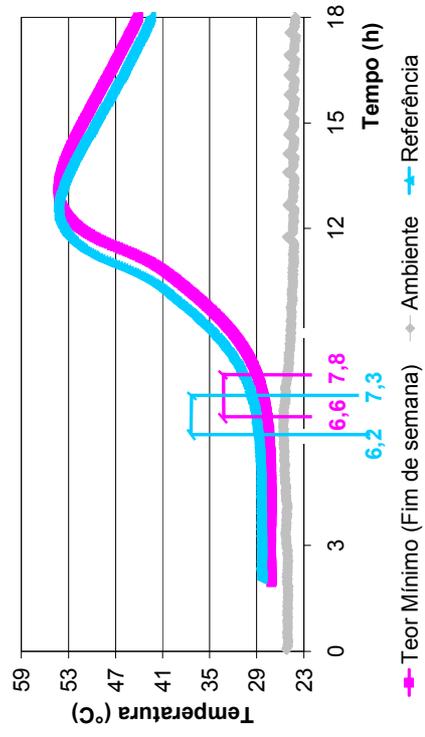


Figura 67 – Intervalo entre o início e fim de pega, localizado na curva de evolução de temperatura das argamassas de maior resistência com diferentes teores de AEH, em relação à referência. Os tempos de pega apresentados nos gráficos foram medidos através de método de resistência à penetração.

Tabela 14 – Temperaturas medidas no ensaio de evolução de temperatura, correspondentes aos tempos de início e fim de pega.

Tipos de Concreto		Temperatura no início de pega (°C)	Temperatura no fim de pega (°C)	Diferença de temperatura no início e no fim de pega (°C)	Temperatura mínima da curva de evolução de temperatura* (°C)	Temperatura máxima da curva de evolução de temperatura** (°C)	Varição de temperatura da curva de evolução de temperatura (°C)	
Concreto Convencional	Referência (AEH=0% m.c.)	25,6	26,5	0,9	25,4	38,8	13,4	
	Noite	Teor Mínimo (AEH=0,8% m.c.)	26,4	27,4	1	26,3	39,7	13,4
		Teor de Segurança (AEH=1,1% m.c.)	28,5	29,2	0,7	26,5	44,3	17,8
		Teor do Fabricante (AEH=5,6% m.c.)	26,2	27,1	0,9	25,9	39,4	13,5
	Fim de semana	Teor Mínimo (AEH=2,2% m.c.)	26,1	27,2	1,1	25	40,9	15,9
		Teor de Segurança (AEH=1,1% m.c.)	27,4	28,6	1,2	27,2	41,9	14,7
Teor do Fabricante (AEH=11,2% m.c.)		26,2	27,3	1,1	26,1	39,4	13,3	
Concreto de Maior Resistência	Referência (AEH=0% m.c.)	28,8	29,9	1,1	28,4	54,2	25,8	
	Teor Mínimo (Noite) (AEH=0,8% m.c.)	26,5	27,3	0,8	26,2	50,2	21,8	
	Teor Mínimo (Fim de semana) (AEH=2,2% m.c.)	27,7	29	1,3	27,1	54,3	27,2	

\*Temperatura mínima medida durante o período de dormência

\*\*Temperatura máxima correspondente ao pico da curva de evolução de temperatura.

#### 6.2.1.4 Teor de ar incorporado

Na Figura 68 estão apresentados os teores de ar incorporado dos concretos convencionais de referência e com água estabilizada, para os dois períodos de estabilização. Com base na grande variação dos resultados, é evidente a falta de relação entre a quantidade de AEH e o teor de ar incorporado no concreto.

No entanto, a exceção do concreto com o teor de segurança para um fim de semana de estabilização, que exibiu uma queda na quantidade de ar superior a 75%, em relação à referência. Não foi verificada uma variação considerável no teor de ar incorporado entre os demais concretos convencionais.

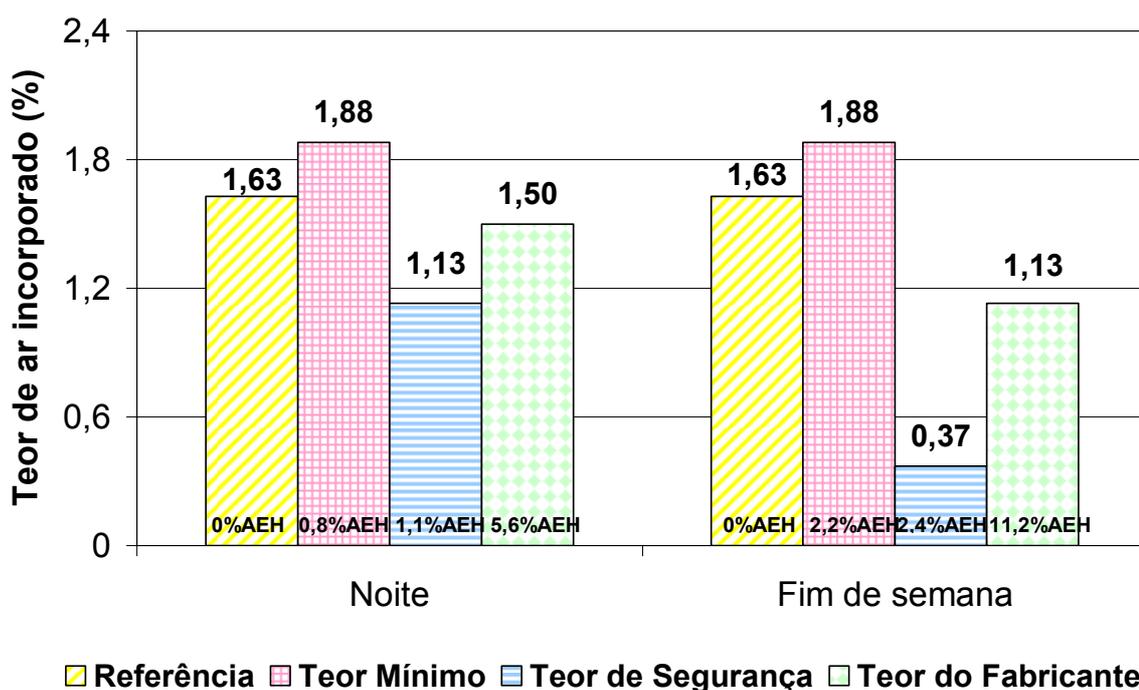


Figura 68 – Teor de ar incorporado dos concretos convencionais.

O teor de ar incorporado dos concretos de maior resistência de referência e com água de lavagem estabilizada estão apresentados na Figura 69. É notável a acentuada queda no teor de ar incorporado exibido pelos concretos com água de lavagem, correspondendo a 73% em relação à referência.

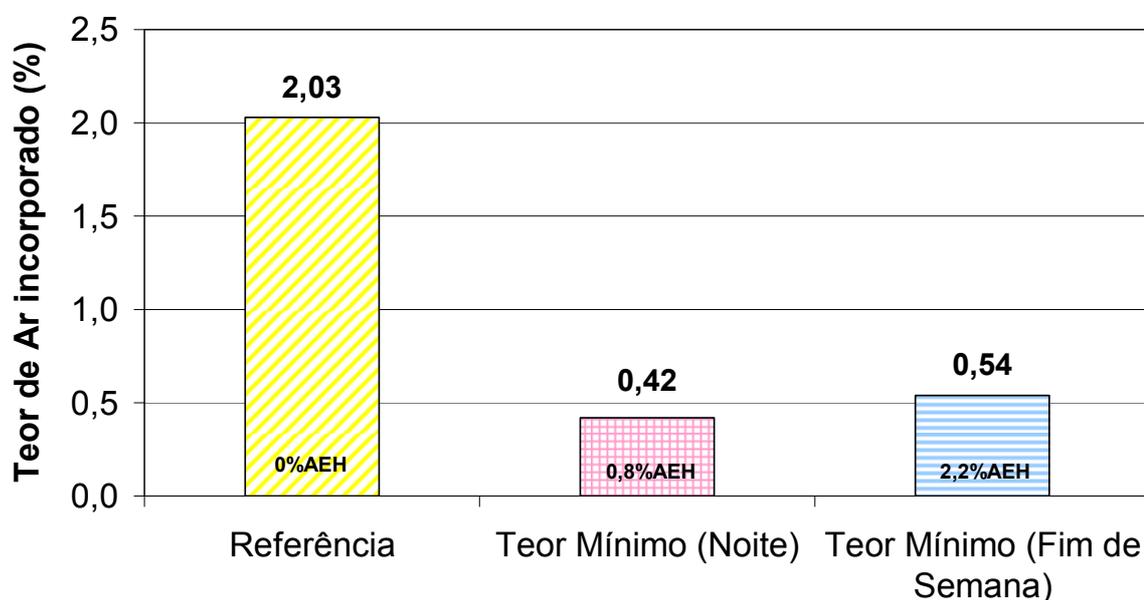


Figura 69 – Teor de ar incorporado dos concretos de maior resistência.

De acordo com Vollick (1960), citado por COLLEPARDI (1984), quando aditivos retardadores são adicionados em concreto com abatimento entre 20-50 mm, a quantidade de teor de ar incorporado não aumenta significativamente. Entretanto, se adicionado em misturas com abatimento entre 70-150 mm, o teor de ar aumenta. De maneira geral, dentre os concretos convencionais, somente a mistura com o teor de segurança, para um fim de semana de estabilização, apresentou uma relação entre o menor abatimento e o menor teor de ar incorporado. No entanto, nos concretos de maior resistência, é possível notar, em todos os casos, a diminuição do teor de ar com o decréscimo do abatimento.

Segundo Tuthill (1960), alguns retardadores em dosagem normais causam uma incorporação do teor de ar de 2 a 3%. Os pesquisadores citados a seguir estabelecem que, a presença de água de lavagem com e sem AEH não aumentou a quantidade de ar incorporado. Assim, Su et al. (2002) indicaram que, o teor de ar no concreto não é consideravelmente afetado pela presença de águas de lavagem com diferentes concentrações de sólidos. Da mesma forma, Peneirol (2006) verificou que, a presença de águas de lavagem com AEH em argamassas não aumentou de forma significativa o teor de vazios da mistura.

De uma forma geral, não é possível associar o efeito das águas estabilizadas com o teor de ar incorporado, nos concretos convencionais (Figura 68). No entanto, os concretos de maior resistência com água de lavagem estabilizada apresentaram, invariavelmente, menor quantidade de ar incorporado em relação à referência (Figura 69).

#### 6.2.1.5 Resistência à compressão

Os dados individuais de resistência à compressão dos concretos, estão apresentados no APÊNDICE 8. Os resultados apresentados na Figura 70, mostram a maior resistência, obtida a partir de três corpos-de-prova, referente às idades de 3, 7 e 28 dias, dos concretos convencionais de referência e com águas de lavagem, para uma noite de estabilização. O concreto com o teor do fabricante exibiu, invariavelmente, a menor resistência à compressão em todas as idades. Nenhum concreto exibiu maior resistência em todas as idades. Aos 3 e 28 dias, os valores de resistência à compressão dos concretos com água de lavagem foram, muitas vezes, levemente superiores à referência, enquanto aos 7 dias, foram ligeiramente inferiores.

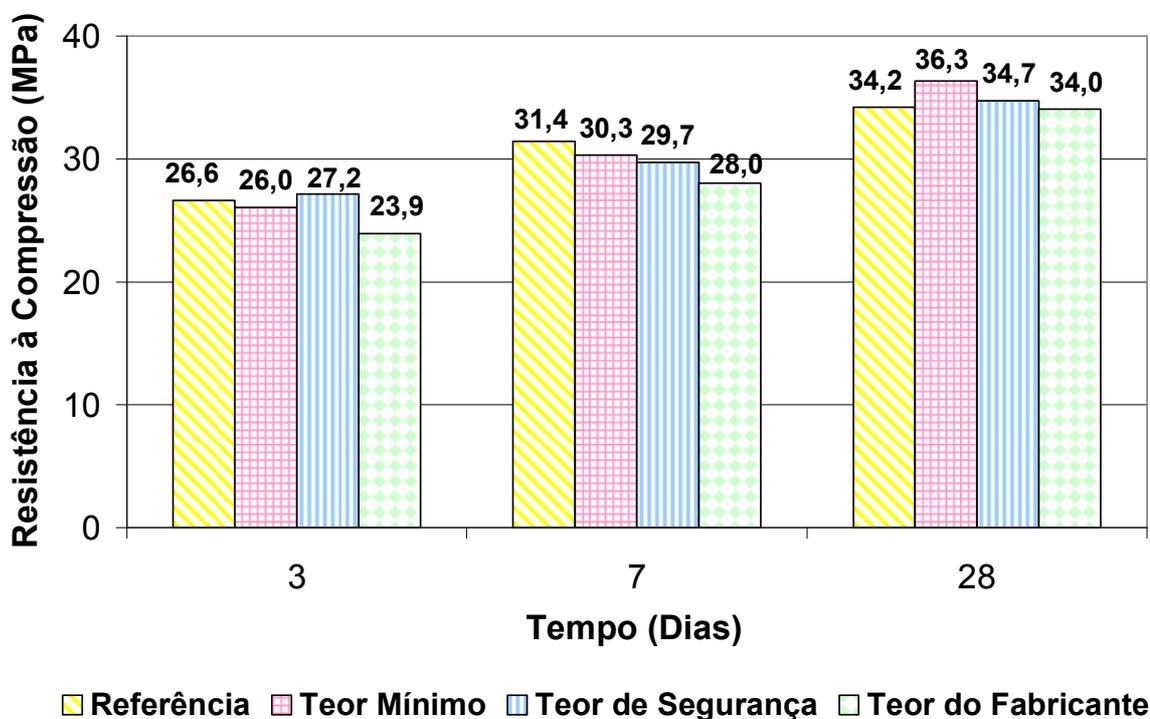


Figura 70 – Resistência à compressão dos concretos convencionais para uma noite de estabilização.

Na Figura 71 estão apresentadas as resistências à compressão dos concretos convencionais de referência e com água de lavagem, para um fim de semana de estabilização. Neste período, o concreto com teor mínimo exibiu a menor resistência à compressão em todas as idades. Aos 3 e 28 dias, os concretos com águas de lavagem apresentaram resistências equivalentes às de referência, sendo que, aos 7 dias, todos os resultados foram levemente inferiores à referência.

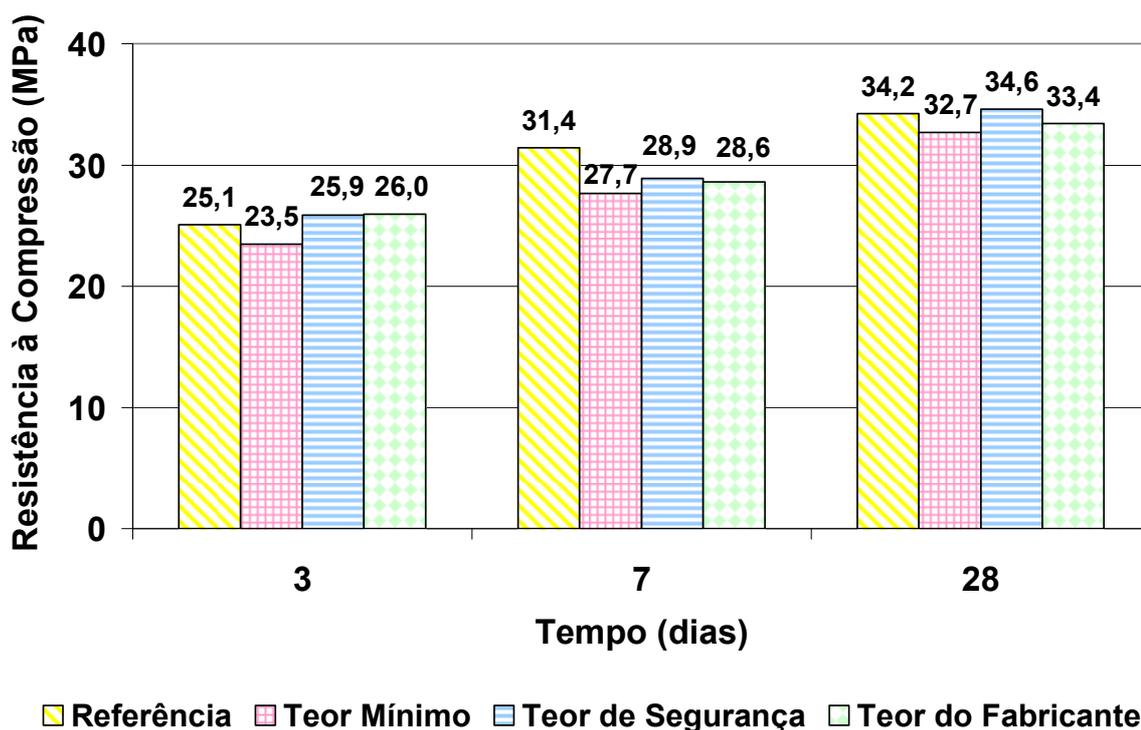


Figura 71 – Resistência à compressão dos concretos convencionais para um fim de semana de estabilização.

Na Figura 72 estão apresentadas as resistências à compressão, referente às idades de 3, 7 e 28 dias, dos concretos de maior resistência de referência e com águas de lavagem, para os dois períodos de estabilização. Embora aos 3 dias, os concretos com água de lavagem tenham demonstrado resistências à compressão inferiores ao de referência, aos 7 e 28 dias apresentaram resistências superiores.

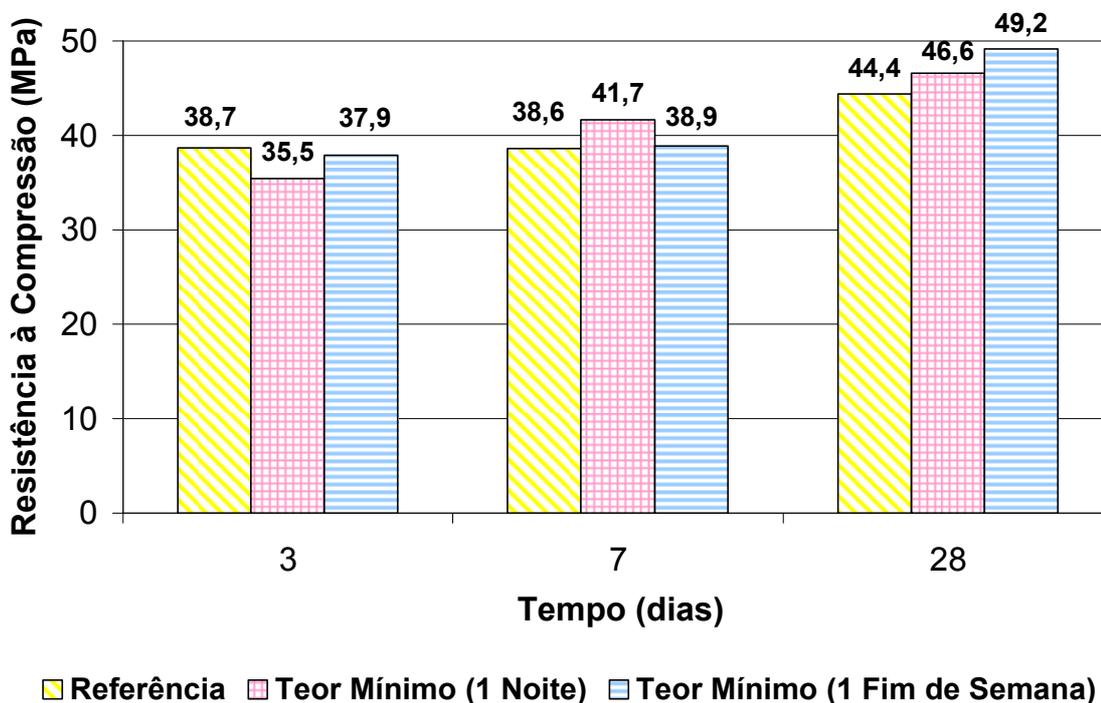


Figura 72 – Resistência à compressão dos concretos de alta resistência para uma noite e um fim de semana de estabilização.

Todos os concretos convencionais com água de lavagem, aos 28 dias, apresentaram resultados comparáveis à referência, com variação máxima de 2 MPa. No entanto, para os concretos de maior resistência com água de lavagem, para uma noite de estabilização, houve um acréscimo de 2 MPa em relação à referência e, de 5 MPa para um fim de semana de estabilização, mudando, portanto, a sua classe de resistência.

Na Tabela 15 estão sumarizados todos os resultados da resistência dos concretos com água de lavagem em relação ao concreto de referência. A ASTM C 94 (2004) estabelece que a resistência à compressão mínima do concreto com água de lavagem deve corresponder pelo menos a 90% da referência. Todos os concretos com água de lavagem, aos 3 dias, exibiram mais de 90% da resistência à compressão em relação à referência e, aos 28 dias mais 96%. Entretanto, aos 7 dias, dois concretos apresentaram um inexpressivo decréscimo em relação ao limite de resistência estabelecido pela ASTM C 94 (2004); o concreto com o teor do fabricante, para uma noite de estabilização, que apresentou 89% da resistência de referência, e o concreto com o teor mínimo, para um fim de semana de estabilização, com 88%. Tendo em vista o descumprimento deste critério de desempenho, em concretos com teores de AEH tão diferentes, é possível que este

comportamento não esteja associado à variação na quantidade de AEH nas águas de lavagem. Contudo, nenhum tipo de concreto produzido com água de lavagem estabilizada apresentou uma diminuição acentuada na resistência à compressão. O intervalo de variação para os concretos convencionais foi de 88 a 106% em relação à referência e, para os concretos de maior resistência foi de 92 a 111%.

Tabela 15 – Resistência à compressão relativa dos diferentes tipos de concreto.

Tipo de Concretos		Resistência relativa (%)				
		3 dias	7 dias	28 dias		
Convencional	Referência (AEH = 0% m.c.)		100	100	100	
	Noite	Teor Mínimo (AEH = 0,8% m.c.)	98	96	106	
		Teor de Segurança (AEH = 1,1% m.c.)	102	95	101	
		Teor de Fabricante (AEH = 5,6% m.c.)	90	89*	99	
	Fim de semana	Teor Mínimo (AEH = 2,2% m.c.)	94	88*	96	
		Teor de Segurança (AEH = 2,4% m.c.)	103	92	101	
		Teor de Fabricante (AEH = 11,2% m.c.)	104	91	98	
	Maior Resistência	Referência (AEH = 0% m.c.)		100	100	100
		Teor Mínimo (Noite) (AEH = 0,8% m.c.)		92	108	105
Teor Mínimo (Fim de semana) (AEH = 2,2% m.c.)		98	101	111		

\* Ligeiro decréscimo em relação à recomendação da ASTM C 94 (2004).

Chatveera et al. (2006) variou a quantidade da água de lavagem (sem AEH) em relação à água potável e verificou que, uma substituição de até 40% atende a recomendação da ASTM C 94 (2004) quanto à resistência à compressão. Para maiores teores de substituição, foi verificada a redução da resistência à compressão, pois segundo o pesquisador, o aumento da alcalinidade da matriz contribui para o aumento da espessura da camada localizada na zona de transição, conseqüentemente, este fenômeno causa o enfraquecimento da ligação entre o agregado e a pasta de cimento, o que resulta na diminuição da resistência à compressão do concreto.

Peneirol (2006) concluiu que, variações de 0,6 a 1% m.c. de AEH em águas de lavagem, não prejudicaram a resistência à compressão das argamassas, já que as misturas exibiram pelo menos 95% da resistência de referência. Caliço (2005) constatou, aos 8 dias, um intervalo de variação de 84 a 109% da resistência dos concretos com água de lavagem estabilizada com teores de 1,8% a 16% m.c. de AEH, em relação à referência, e o intervalo de 98 a 104% aos 28 dias.

### *6.2.2 Análise econômica*

No APÊNDICE 9 estão demonstrados os custos de todos os insumos empregados nos concretos, em R\$/m<sup>3</sup>. Com base nesses valores, estão resumidos na Tabela 16, o custo total dos concretos convencionais e de maior resistência.

É notável que, a presença de AEH não exerceu influência expressiva sobre o custo dos dois tipos de concretos, o que pode ser atribuído à finalidade do uso do aditivo, isto é, ao seu emprego na estabilização de águas de lavagem, o que consiste em uma dosagem muito pequena, já que seu teor é calculado em função do cimento residual presente no balão do caminhão-betoneira, após o descarregamento. Desta forma, a operação para o reaproveitamento de águas de lavagem, através da estabilização das reações de hidratação do cimento pelo uso de AEH, é viável financeiramente para as centrais dosadoras.

No entanto, para concretos em que o lançamento será realizado antes de 1 h, é preciso considerar o menor abatimento inicial exibido pelas misturas com menores teores de AEH (teores mínimo e de segurança), uma vez que o incremento de aditivo plastificante, empregado para ajustar o abatimento em relação à referência, implica no aumento do custo final do concreto. Contudo, conforme já mencionado, não é objeto de estudo desta pesquisa quantificar o teor de aditivo plastificante requerido para tornar o abatimento dos concretos com menor teor de AEH compatível à mistura de referência, já que neste trabalho o tempo de lançamento, das misturas estudadas, foi após 1 h.

Os investimentos financeiros para a adoção de um sistema de reciclagem a partir do emprego AEH é consideravelmente inferior aos custos de descarte do resíduo, pois resulta na eliminação do consumo excedente de água utilizada na lavagem do caminhão, na diminuição da operação de limpeza do balão dos caminhões-betoneira e, na eliminação de locais destinados ao descarte do entulho.

Tabela 16 – Custo dos concretos

Tipos de concreto		(R\$/m³)	
Convencional	Referência (AEH = 0% m.c.)	118,36	
	Noite	Teor Mínimo (AEH = 0,8% m.c.)	118,41
		Teor de Segurança (AEH = 1,1% m.c.)	118,43
		Teor de Fabricante (AEH = 5,6% m.c.)	118,70
	Fim de semana	Teor Mínimo (AEH = 2,2% m.c.)	118,50
		Teor de Segurança (AEH = 2,4% m.c.)	118,51
Teor de Fabricante (AEH = 11,2% m.c.)		119,05	
Maior Resistência	Referência (AEH = 0% m.c.)	178,07	
	Teor Mínimo (Noite) (AEH = 0,8% m.c.)	178,12	
	Teor Mínimo (Fim de semana) (AEH = 2,2% m.c.)	178,20	

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 Águas de Lavagem

Através das propriedades estudadas em águas de lavagem estabilizadas, foram obtidas as seguintes constatações:

#### *Avaliações preliminares*

- O ensaio de calorimetria isotérmica foi realizado em amostra com uma quantidade de cimento inferior ao semi-adiabático. Portanto, embora o método isotérmico possibilite a aquisição de dados com uma quantidade reduzida de material (60 g), o pequeno teor implica em limitação na obtenção dos dados para dosagens de AEH acima de 1,8% m.c., já que a liberação de calor registrada é muito pequena;
- As águas de lavagem íntegras e succionadas apresentaram tempos de término de estabilização bastante próximos. Desta forma, fica a critério do pesquisador a decisão de succionar ou não a água de lavagem, isto é, diminuir ou não, o tamanho dos calorímetros;
- A água de lavagem, com o tempo de adição do AEH fixado em 4 horas, exibiu um encurtamento no tempo de estabilização de aproximadamente 3 horas, em relação a uma mistura com adição imediata de AEH, indicando a diminuição do desempenho do AEH para um maior tempo de adição, devido ao avançado grau de hidratação da mistura. Além disso, as misturas em que o AEH foi adicionado, posteriormente exibiram uma taxa de evolução de temperatura, superior às misturas sem tempo de adição;
- A presença de aditivo redutor de água conduziu ao aumento do período de estabilização, sendo o prolongamento ainda maior para as águas de lavagem com maior dosagem de AEH, indicando o maior efeito do lignosulfonato em misturas com maiores teores de AEH;
- O prolongamento dos tempos de estabilização, para misturas com menores relações a/c, pode ser atribuído à menor quantidade de AEH disperso na água, o que conduz ao aumento efetivo do contato com os grãos de cimento e reflete no aumento da ação do AEH;

- As determinações preliminares contribuíram para o estabelecimento de uma metodologia para a execução dos ensaios calorimétricos em águas de lavagem, podendo ser destacado os seguintes aspectos: a verificação do volume da água de lavagem, o que contribuiu para a determinação da quantidade de cimento empregado nos ensaios calorimétricos; a verificação do succionamento, que demonstrou a flexibilidade que o pesquisador poderá ter de proceder ou não, ao succionamento da amostra, possibilitando a diminuição do tamanho dos calorímetros, quando houver necessidade de espaço físico no local do ensaio; o tempo de adição do AEH ou a presença de aditivo redutor de água, que podem prolongar ou diminuir o período de estabilização das águas de lavagem, e a influência da relação a/c das águas de lavagem, que indicou a diminuição do desempenho do AEH, para maiores quantidades de água presente na amostra.

#### *Determinação dos teores mínimo e de segurança*

- Os teores mínimo e de segurança de AEH, determinados em águas de lavagem de a/c=10 através da técnica de calorimetria isotérmica, foram de 0,8 % e 1,1 % m.c. para uma noite de estabilização (16 h e 24 h) e, de 2,2% e 2,4% m.c. para um fim de semana de estabilização (64 h e 72 h). Estes valores foram expressivamente menores que a dosagem de AEH recomendada pelo fabricante, a qual correspondeu a 5,6% m.c. para uma noite de estabilização e, a 11,2% m.c. para um fim de semana (valores calculados com base no teor de cimento estimado presente nos balões dos caminhões-betoneira de 8 m<sup>3</sup>, após a descarga do concreto). Os teores mínimos, determinados a partir do ensaio de calorimetria isotérmica, indicaram uma economia de AEH superior a 85% m.c., em relação ao teor do fabricante, para uma noite de estabilização e, de aproximadamente 80% m.c., para um fim de semana de estabilização.

## *Comparação entre os métodos calorimétricos*

### *Isotérmico*

- *Vantagem:* medição direta da taxa de liberação de calor, considerando as perdas de calor para o ambiente e, maior controle das reações de hidratação, em virtude da imposição da temperatura durante o ensaio.
- *Desvantagem:* diminuição da taxa máxima de calor com o aumento do teor de AEH, para amostras com pequena quantidade de cimento e, maior custo do aparato experimental, em relação ao semi-adiabático;

### *Semi-adiabático*

- *Vantagem:* menor coeficiente de variação (9,8%) em relação ao isotérmico (11,7%). No entanto, esta variabilidade não está relacionada somente ao ensaio, mas também à definição do tempo de estabilização e com os calorímetros empregados nos ensaios.
- *Desvantagem:* utilização de calorímetros de tamanhos grandes, para materiais com pouca quantidade de cimento em sua composição; medição da variação de temperatura da amostra e desconhecimento das perdas de calor para o ambiente, podendo implicar em insegurança sobre a veracidade dos resultados, uma vez que, se as perdas de calor forem elevadas, as reações podem ter iniciado sem que as temperaturas tenham sido registradas.

Diante disso, o método semi-adiabático pode ser considerado uma opção confiável para a estimativa do tempo de estabilização de águas de lavagem, dada a proximidade com os resultados obtidos pela calorimetria isotérmica, o que representou uma diferença média nos tempos de estabilização de 3 horas.

## 7.2 Concretos

Com base nos efeitos das águas de lavagem estabilizadas nas propriedades do concreto, são feitas algumas considerações:

### *Abatimento inicial*

- Os valores de abatimento inicial dos concretos convencionais, com o teor do fabricante, para os dois períodos de estabilização, indicaram valores bastante próximos ao de referência, o que representou uma variação máxima no abatimento de 1 cm. No entanto, foi verificada uma diminuição significativa na fluidez dos concretos com menores quantidades de AEH (teor mínimo e segurança), para os dois períodos de estabilização, demonstrando, na maioria dos casos, uma queda máxima de 7 cm no abatimento, em relação ao de referência;
- Os concretos de maior resistência com águas de lavagem apresentaram uma discreta diminuição no abatimento, em relação à referência, correspondendo a uma queda de 2 cm para o concreto com menor teor de AEH e, 1 cm para a mistura com maior teor de aditivo;
- A produção de concretos convencionais, com águas de lavagem estabilizadas para baixos teores de AEH, indicou uma queda acentuada do abatimento inicial, em relação à referência, implicando na necessidade de utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes para a correção do abatimento, resultando em aumento no custo final de concretos lançados antes de 1 h. No entanto, para concretos lançados após 1 h, esta diferença no abatimento não é um fator preocupante. Para os concretos de maior resistência com água de lavagem estabilizada os abatimentos iniciais foram equivalentes ao de referência, não havendo necessidade de ajustes.

### *Perda de Abatimento*

- Independente do tipo de concreto, de uma forma geral, as misturas com água de lavagem estabilizada apresentaram menores perdas de abatimento em relação à referência;
- A queda de abatimento total dos concretos convencionais com água de lavagem, somente foi superior à mistura de referência quando o incremento no teor de AEH foi expressivo, como no caso do concreto com o teor do fabricante, para um fim de semana de estabilização, o qual apresentou, em uma hora, a maior perda de abatimento total, correspondente a 103% em

relação à referência. Contudo, esta queda no abatimento não foi consideravelmente expressiva;

- Para os concretos de maior resistência com água de lavagem, as quedas de abatimento total foram, invariavelmente, inferiores à referência, o que correspondeu a resultados não superiores a 79%;
- A presença de águas de lavagem estabilizada nos concretos, não prejudicou o abatimento final, dada a proximidade dos resultados com o concreto de referência.

#### *Tempos de pega por resistência à penetração*

- À exceção do tempo de fim de pega demonstrado pela mistura com o teor de segurança, para uma noite de estabilização (>1h39min em relação à referência), todas as argamassas atenderam as recomendações da ASTM C 94 (2004), ou seja, não houve aceleração superior a 1 hora, nem retardamento maior que 1,5 hora nos tempos de pega das argamassas com água de lavagem, em relação às misturas de referência;
- Apenas as argamassas com o teor do fabricante apresentaram um ligeiro atraso nos tempos de pega; as demais misturas convencionais exibiram uma aceleração em relação ao concreto de controle;
- A presença de águas de lavagem estabilizadas, nas argamassas de maior resistência, prolongou os tempos de pega em relação à referência;

#### *Evolução de Temperatura*

- As argamassas convencionais, com água de lavagem estabilizada, demonstraram acréscimo máximo na temperatura, correspondente ao tempo de início de pega, de aproximadamente 3°C em relação à referência e, para o fim de pega de 2,7°C. Portanto, as variações nas temperaturas, das misturas com e sem água de lavagem estabilizada, não foram expressivas;
- As misturas de maior resistência, com água de lavagem estabilizada, apresentaram menores valores de temperaturas em relação às argamassas de referência, o que representou, para o início de pega, uma variação máxima de 2,3°C e, para o fim de pega o valor de 2,4°C;

- Não foi possível relacionar a variação da temperatura, correspondente aos tempos de início e fim de pega, com os tempos de pega localizados na curva de evolução de temperatura, obtidos a partir do ensaio de resistência à penetração;
- Não foi constatada uma relação entre a variação de temperatura, correspondente à temperatura mínima estimada durante o período de dormência e a temperatura máxima localizada no pico da curva de evolução de temperatura, com os tempos de pega localizados na curva de evolução de temperatura;
- A presença de águas de lavagem nos concretos não afetou consideravelmente o aumento de temperatura, havendo inclusive uma diminuição para as misturas de maior resistência, em relação à referência.

#### *Teor de ar incorporado*

- Não houve uma variação considerável no teor de ar incorporado entre os demais concretos convencionais, a exceção do concreto com o teor de segurança, para um fim de semana de estabilização, que exibiu uma queda na quantidade de ar superior a 75%, em relação à referência;
- Para os concretos de maior resistência com água de lavagem, foi verificada uma queda considerável no teor de ar incorporado, superior a 73% em relação à referência;
- Não é possível associar o efeito das águas estabilizadas nos concretos convencionais com o teor de ar incorporado. No entanto, nos concretos de maior resistência é provável que a presença de águas de lavagem estabilizadas não tenha provocado aumento na quantidade de ar incorporado, em relação à referência.

#### *Resistência à compressão*

- Para uma noite de estabilização, o concreto com o teor do fabricante demonstrou invariavelmente resistências à compressão, inferiores à de referência, para todas as idades. Para um fim de semana de estabilização, este comportamento foi verificado no concreto com o teor mínimo;

- Aos 7 dias, o concreto com o teor do fabricante, para uma noite de estabilização, apresentou 89% da resistência de referência e, o concreto com o teor mínimo, para um fim de semana, exibiu 88%. Portanto, não atenderam ao requisito de resistência à compressão recomendado pela ASTM C 94 (2004) (o concreto com água de lavagem deve apresentar resistência à compressão mínima de 90% do valor da referência);
- As resistências à compressão, em todas as idades, exibidas pelos dois tipos de concreto com água de lavagem estabilizada, foram equivalentes, e muitas vezes superiores, à mistura de referência, merecendo destaque o concreto de maior resistência com maior teor de AEH, o qual demonstrou um acréscimo aos 28 dias de aproximadamente 5 MPa em relação à referência, mudando, portanto, a sua classe de resistência;
- De uma maneira geral, os valores de resistência à compressão, dos concretos com água de lavagem estabilizada, foram equivalentes e muitas vezes superiores ao de referência, portanto a presença das águas de lavagem estabilizadas não prejudicou a resistência dos concretos.

#### *Considerações técnico-financeiras e indicação do teor ótimo de AEH*

Com relação aos aspectos técnicos e econômicos, não há limitação para a utilização do AEH, uma vez que a variação na dosagem, estudada nesta pesquisa, não implicou em prejuízo às propriedades de concretos lançado após 1 h, nem diferenças financeiras acentuadas.

A presença de águas de lavagem estabilizada não prejudicou as propriedades avaliadas nos dois tipos de concreto. Em geral, os resultados obtidos atenderam aos requisitos de desempenho recomendados pela ASTM C 94 (2004), quanto à pega e a resistência à compressão. O incremento no teor do AEH, empregado na estabilização das águas de lavagem, não causou danos às características do concreto no estado fresco e endurecido. Foram observadas somente algumas variações, pouco pronunciadas, como um leve atraso nos tempos de pega e uma ligeira tendência de aumento na perda de fluidez demonstrada pela dosagem de AEH recomendada pelo fabricante. Além disso, os concretos com menores teores de AEH apresentaram uma queda pronunciada no abatimento inicial, o que implica na necessidade de utilização de aditivo plastificante para a correção do abatimento e, aumento no custo final do concreto. No entanto, como o tempo de lançamento, dos concretos estudados nesta pesquisa, foi após 1h, a queda no abatimento não é um fator preocupante. Portanto, tecnicamente não há restrição ao emprego do AEH para a estabilização de águas de lavagem.

O AEH não exerceu influência expressiva sobre o custo dos dois tipos de concretos, pois sua dosagem é muito pequena, já que é calculada em função do cimento residual presente no balão do caminhão-betoneira, após o descarregamento. Esta constatação viabiliza o uso do aditivo pelas centrais dosadoras, na estabilização das águas de lavagem.

Embora nenhum teor de AEH empregado tenha demonstrado o melhor desempenho em todas as propriedades avaliadas do concreto convencional, o teor mínimo pode ser indicado como o teor ótimo, para os dois períodos de estabilização, já que na maioria das vezes apresentou o melhor rendimento técnico e um custo ligeiramente menor.

### 7.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Propor outros métodos de avaliação para determinação dos teores de AEH em águas de lavagem, pois a execução de ensaios através do método de calorimetria semi-adiabática exige a utilização de calorímetros de tamanhos grandes, quando a amostra não é succionada, em virtude do material residual apresentar pouca quantidade de cimento, enquanto que na calorimetria isotérmica o custo do aparato experimental é relativamente alto;
- Estudar com maior profundidade o comportamento do AEH, já que para um intervalo de variação do teor de AEH estudado houve uma aceleração dos tempos de pega, desta forma é possível que sua dosagem possa interferir de maneira diferente o processamento das reações de hidratação;
- Estudar uma dosagem intermediária de AEH entre os teores de segurança e do fabricante, que não provoque uma queda pronunciada no abatimento inicial do concreto e que seja inferior a quantidade de AEH indicada pelo fabricante;
- Aumentar o intervalo de variação dos teores de AEH empregados para a estabilização das águas de lavagem, para que os concretos apresentem diferenças mais pronunciadas em suas características e, desta forma, sejam obtidas informações mais abrangentes sobre o efeito da quantidade de AEH no material residual;
- Estudar a redosagem de aditivo plastificante ou superplastificante, em função da variação do teor de AEH, necessária para os abatimentos dos concretos com águas de lavagem com menores dosagens de AEH serem compatíveis aos de referência;

- Investigar o mecanismo de estabilização das reações de hidratação pelo AEH, analisando a influência deste tipo de aditivo sobre a taxa de dissolução e formação de compostos na solução;
- Conduzir estudos referentes aos efeitos das águas de lavagem em concretos de alta resistência;
- Analisar microscopicamente os fenômenos envolvidos no comportamento do AEH e associar com estudos calorimétricos sobre o processamento das reações de hidratação do cimento.

#### **7.4 Comentários finais**

Os parâmetros de estudo e a metodologia adotada nesta pesquisa foram condizentes com a realidade prática de reciclagem que as centrais dosadoras exercem, ou poderão exercer. O reaproveitamento das águas de lavagem provenientes de caminhões-betoneira é plenamente viável, tanto em relação à simplicidade de execução da operação de reciclagem, que consiste em adicionar uma pequena quantidade de água e AEH no material presente ao balão do caminhão-betoneira, quanto em relação à aplicação do material residual na produção de novos concretos, pois embora haja influência, não há prejuízo de suas propriedades. No entanto, para a implantação ou gerenciamento de um sistema de reciclagem inteiramente viável, são necessárias algumas considerações, tais como:

- O estudo da dosagem de AEH para um desejado período de estabilização, uma vez que há indicação de uma superdosagem. Em se tratando de águas de lavagem, a dosagem de AEH excedente não causa uma elevação considerável do custo do concreto, em virtude da estabilização do cimento residual. Entretanto, deve haver cuidado com a possibilidade de retardo nos tempos de pega e perda de abatimento;
- O controle da quantidade de água adicionada no balão do caminhão é importante para a estimativa adequada da relação a/c real, devido sua influência sobre o período de estabilização do material residual;
- A determinação dos intervalos usuais do período de indução das misturas é necessária, para que não haja o risco de endurecimento do resíduo no balão do caminhão-betoneira;

- A consideração da presença residual de aditivos é importante, já que no caso dos de base lignosulfonato, há uma influência no prolongamento do tempo de estabilização do material a ser reaproveitado.

Finalmente, o método de avaliação calorimétrica fornece dados importantes para a definição dos teores de AEH. Portanto, a metodologia adotada foi adequada para a estabilização das águas de lavagem por 16 h (noite) e 64 h (fim de semana), evitando o endurecimento do resíduo no balão do caminhão.

No aspecto ambiental, esta técnica de reciclagem possibilita a diminuição do consumo de água utilizada na lavagem do caminhão e evita o lançamento do resíduo agressivo no ambiente. Estes benefícios implicam em economia de um recurso natural esgotável e a cada dia mais escasso na natureza, além da preservação das águas para o consumo ou recreação, refletindo no bem estar da população.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo. Ed. PINI, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 403**: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. Philadelphia, 1992.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 494**: Chemical Admixtures for Concrete. Philadelphia, 1999.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 94**: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. Philadelphia, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método Gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 10342**: Concreto – Perda de abatimento. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: Aditivos para concreto. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 10342**: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

BENSTED, J. Aluminium silicate study in cement paste hydration. **Cement and Concrete Research**. 14, 493, 1983.

BENINI, H. **Reaproveitamento de Concreto Fresco Dosado em Central com o Uso de Aditivo Estabilizador de Hidratação**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Construção Civil e Urbana, São Paulo, 2005.

BISHOP, M., BOTT, S. G., BARRON, A. R. A New Mechanism for Cement Hydration Inhibition: Solid-State Chemistry of Calcium Nitrilotris (methylene) triphosphonate. **Chem. Mater.** 15, 3074-3088, 2003.

BO MON KY THUAT XAI DUNG (Department of Civil Engineering). Disponível em: <http://www.ctu.edu.vn/colleges/tech/bomon/ktxd/> Acesso em: Jun.2006.

BORGER, J.; CARRASQUILLO, R. L.; FOWLER, D. W. Use of Recycled Wash Water and Returned Plastic Concrete in the Production of Fresh Concrete. **Advanced Cement Based Materials**. 1, 267-274, 1994

CALIÇO, J. B. N. P. **Reciclagem da água de lavagem dos caminhões-betoneira utilizando um estabilizador de hidratação**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil, Santa Catarina, 2005.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARU, P.; MAKUL, N. Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete. **Cement & Concrete Composites**. 1-10, 2006.

CHEN, Y., ODLER, I. **On the origin of Portland cement setting**. *Cement and Concrete Research*. 22, 1130-1140, 1992.

CHINI, A.; MBWAMBO, W. J. Environmentally friendly solutions for the disposal of the concrete wash water from ready mixed concrete operations. **CIB W89 Beijing International Conference**. 21-24, October, 1996.

CHINI, A. R.; MUSZYNSKI, L. C.; BERGIN, M.; ELLIS B. S. Reuse of wastewater generated at concrete plants in Florida in the production of fresh concrete. **Magazine of Concrete Research**, 53, No. 5, 311-319, October, 2001.

CARVALHO, G. C. **Química moderna**. São Paulo. Ed. Scipione

COLLEPARDI, M., **Concrete Admixtures Handbook - Properties, Science, and Technology**. Ed. por RAMACHANDRAN, V. S.. 2nd, 1984.

COSTENARO, F. L.; ISA M. M. **Influência do aditivo retardador no tempo de fluidez do concreto de alto desempenho**. 5º Congresso Brasileiro de Cimento (CBC), Novembro, 1999.

DALGLEISH, B. J., GHOSE, A., JENNINGS, H. M. e PRATT, P. L. **Science Ceramic**. 11, 297, 1982.

DAUGHERTY, K. E. e KOWALEWSKY, M. J., Jr., Use of admixtures in concrete placed at high temperatures, **Transportation Research Road**, 564, 10-20, 1976.

DIAMOND S. The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer. **Cement & Concrete Composites**. 26, 919-933, 2004.

FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE (FATMA). Disponível em <http://www.fatma.sc.gov.br/default/default.asp> Acesso: Jun.2006.

INCROPERA, F. P. e WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro. 3º edição. Ed. Guanabara Koogan S.A. 1992.

GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, I. R. e PANDOLFELLI, V. C. Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio. *Cerâmica*, 53, 42-56, 2007.

GARTNER, E. M., TANG, F. J. e WEISS, S. J. Saturation Factors for calcium hydroxide e calcium sulfates in fresh Portland cement pastes. **Journal American Ceramic Society**. 68, 667-673, 1985.

GRANATO, G. S.; PAULON, V. A. **Reaproveitamento do concreto através do controle da hidratação do cimento com uso de aditivo estabilizador**. Em Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Cidade, 2003.

GÜTHS, S. **Transdutor de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial**. Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais, Santa Catarina, 1995.

GÜTHS, S.; DOMINGOS, R. H. e OLIVEIRA, R. P. **Análise de incertezas no processo de calibração de transdutores de fluxo de calor**. Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais, Santa Catarina, 1998.

HUKSEFLUX THERMAL SENSORS. Disponível em: <http://www.hukseflux.com/heat%20flux/heatflux.htm> Acesso: Nov.2006.

KIHARA, Y., CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1, cap. 10, p. 295-322.

LOCHER, F. W.; RICHARTTZ, W. e SPRUNG, S. Zem-Kall-Gips (English translation). 29, 445, 1976.

MEHTA, P. K. Scanning electron micrographic studies of ettringite formation. **Cement and Concrete Research**. 6, 169-182, 1976.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo. Ed. PINI, 1994.

MOLLAH, A. M. Y., PALTA, P, HESS, T.R. Chemical and physical effects of sodium lignosulfonato superplasticizer on the hydration of Portland cement and solidification/stabilization consequences. **Cement and Concrete Research**. 25, 671-682, 1995.

NAN, S., MIAO, B., LIU, F. Effect of wash water and underground water on properties of concrete. **Cement and Concrete Research**. 32, 777-782, 2002.

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para Concreto**. Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações, Ed. Isaia, G.C.. IBRACON, vol. 1, cap. 13, pp. 381-406, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo. Ed. PINI, 1997.

MILESTONE N. B. hydration of triclaciun silicate in the presence of lignosulfonates, glucose, e sodium gluconate. **Journal of the American Ceramic Society**. 62, Nº7-8, 321-324, July-August, 1979.

NUNES, S. C. B. **Concreto Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Disponível em <http://www.onu-brasil.org.br/> Acesso: Ago.2006.

ODLER, I. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4th edition, Ed. Peter C. Hewlett, p. 241-271, 1998.

ODLER, I. e DÖRR, H. Early hydration of tricalcium silicate. **Cement and Concrete Research**. 9, 277-284, 1979.

PAOLINI, M.; KHURANA R. Admixtures for Recycling of Waste Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 221-229, 1998.

PENEIROL, N. L. S. **Estudo para Otimização do Uso de Aditivo Estabilizador de Hidratação visando a Reciclagem de Água na Produção de Concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil, Santa Catarina, 2006.

PREVITE, R. W. Concrete slump Loss. **ACI Journal**, Title No. 74-35, 361-366, August, 1977.

RAMACHANDRAN, V. S. e LOWERY, M. S. Conduction calorimetric investigation of the effect of retarders on the hydration of Portland cement. **Thermochimica Acta**, 195, 373-387, 1992.

REPETTE, W. L. **Reciclagem de Água de Lavagem de caminhão-betoneira para produção de concreto**. Formulário para a apresentação de projeto PIBIC/CNPq – BIP/UFSC 2005/2006.

RICKET, J. Influence of retarders on the hydration of clinker and cement. 2000.

SANDROLINI, F.; FRANZONI E. Waste wash water recycling in ready-mixed plants. **Cement and Concrete Research**. 31, 485-489, 2001.

SEALEY, B. J.; PHILLIPS, P. S.; HILL, G. J. Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry. **Resources Conservation & Recycling**. 32, 321-331, 2001.

SCHUKIN, E. D. et AMELINA, E. A. **Adv. In Colloid and interface Science**.11, 235, 1979.

SCRIVENER, K. L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. **Cement & Concrete Composites**. 26, 935-945, 2004.

SILVA, D. A. **Efeito dos Polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Santa Catarina, 2001.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry** . Academic Press, London, 2<sup>nd</sup>, 1990.

TRADOS, M. E., SKALNY, J., KALYONCU, R. S. **J. Am. Ceram. Soc.** 59, 344, 1976

TUTHILL L. H., ADAMS, R. F., HEMME, J. H. Jr. Observations in testing and use of water-reducing retarders. **ASTM Special Technical Publication**. N° 266, 97-117, 1960.

WADSÖ, L., An experimental comparison between isothermal calorimetry, semi-adiabatic calorimetry and solution calorimetry for the study of cement hydration. **NORDTEST REPORT**, 2003.

## APÊNDICE 1

### Consumo dos materiais para 46 litros de concreto

<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
Cimento	2,99
Areia média	2,65
Areia fina	2,65
Brita	2,61

- **Concreto Convencional**

Traço – 1 : 1,9 : 1,52 : 3,66

Relação a/c= 0,71

Teor de Lignosulfonato= 0,6% m.c.

<b>Insumos</b>	<b>Consumo</b>	<b>Unidade</b>
Cimento	12,31	kg
Brita	45,05	
Areia Média	23,39	
Areia Fina	18,71	
Água Total*	8,74	litros
Água Parcial	7,52	
Água de Lavagem	1,22	
Cimento da água de lavagem	122,00	g
Lignosulfonato	73,85	

\* A água total é a soma da água parcial com a água de lavagem.

- **Concreto de maior resistência**

Traço – 1 : 1,18 : 0,94 : 2,27

Relação a/c= 0,71

Teor de Lignosulfonato= 0,6% m.c.

<b>Insumos</b>	<b>Consumo</b>	<b>Unidade</b>
Cimento	18,74	kg
Brita	42,55	
Areia Média	22,12	
Areia Fina	17,62	
Água Total*	8,98	litros
Água Parcial	7,76	
Água de Lavagem	1,22	
Cimento da água de lavagem	122,00	g
Lignosulfonato	112,46	

\* A água total é a soma da água parcial com a água de lavagem.

## APÊNDICE 2

### Obtenção dos teores recomendados pelo fabricante

- **1 noite**

De acordo com a recomendação do fabricante é indicado 1 litro de AEH por caminhão-betoneira, portanto:

$$\mu = \frac{m}{V} \quad \therefore \quad m = \mu \cdot V = 1,12 \cdot 1 = 1,12 \text{ kg}$$

Já que a relação a/c=10 da água de lavagem e o consumo de água na lavagem do caminhão são aproximadamente 200 litros, o cimento residual presente é 20 kg, por isso o teor de AEH obtido é:

$$\text{Teor de AEH} = \frac{1,12}{20} = 0,056 \quad \therefore \quad 5,6\%$$

- **1 final de semana**

De acordo com a recomendação do fabricante é indicado 1 litro de AEH por caminhão, portanto:

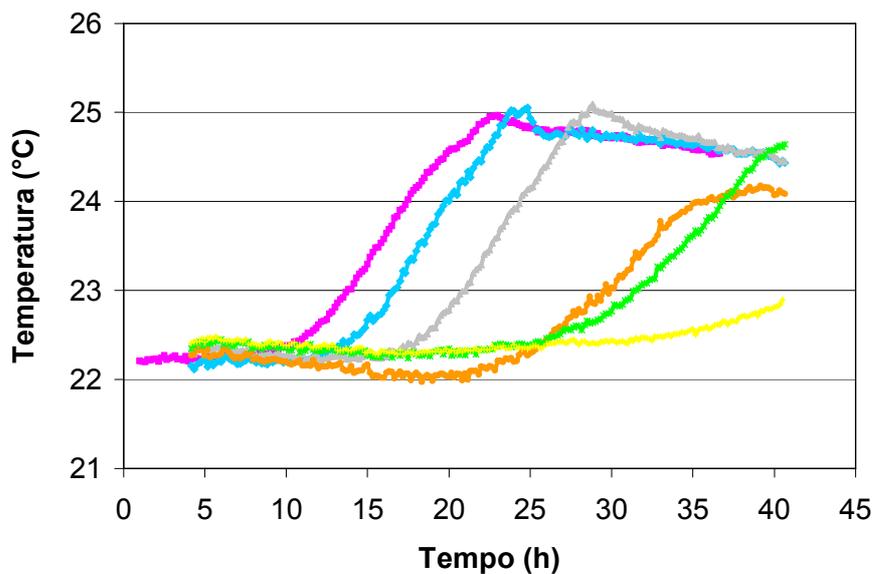
$$\mu = \frac{m}{V} \quad \therefore \quad m = \mu \cdot V = 1,12 \cdot 2 = 2,24 \text{ kg}$$

Já que a relação a/c=10 da água de lavagem e o consumo de água na lavagem do caminhão são aproximadamente 200 litros, o cimento residual presente é 20 kg, por isso o teor de AEH obtido é:

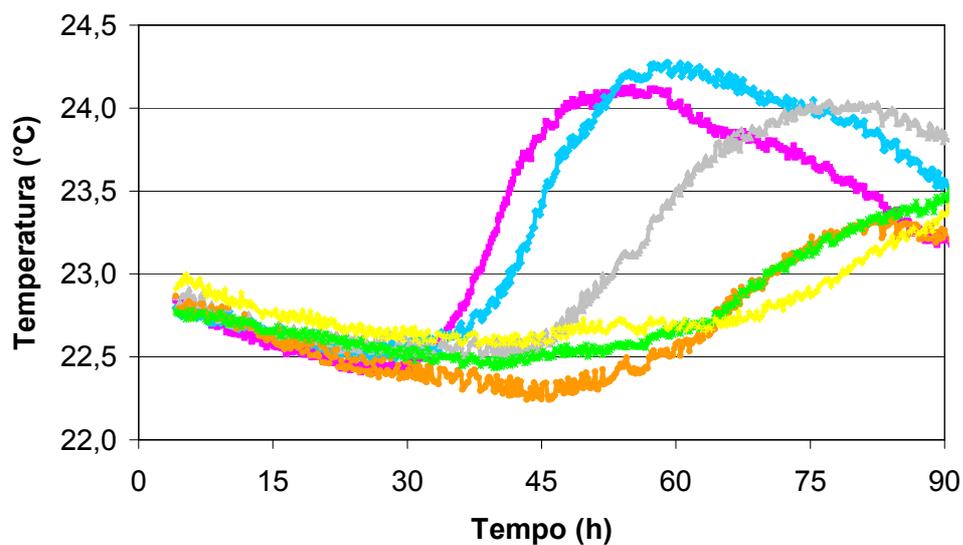
$$\text{Teor de AEH} = \frac{2,24}{20} = 0,112 \quad \therefore \quad 11,2\%$$

### APÊNDICE 3

Resultados dos ensaios de evolução de temperatura para águas de lavagem de  $a/c=10$ , com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 2,2% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%.

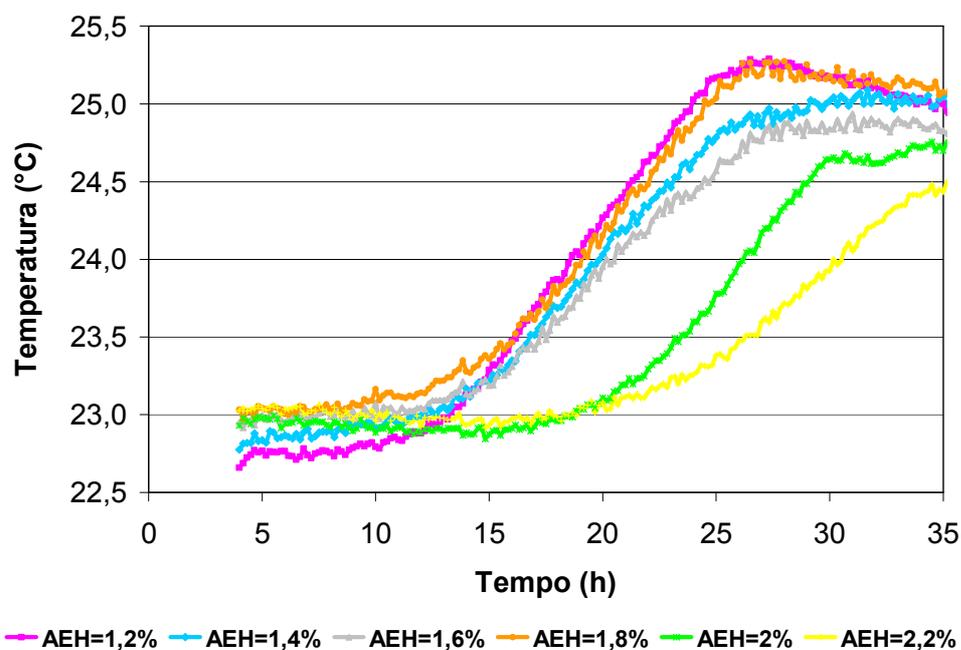
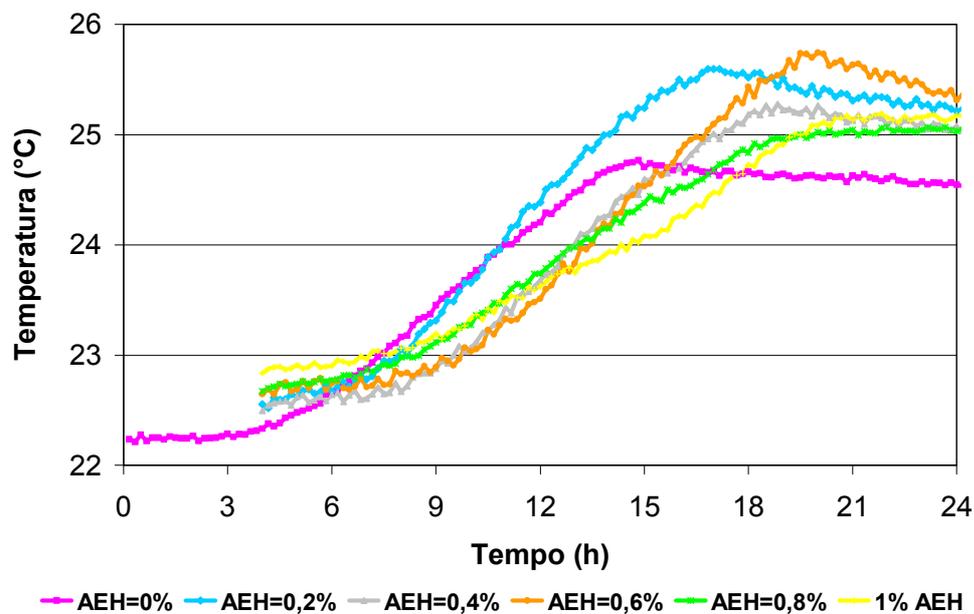


— AEH=0% — AEH=0,2% — AEH=0,4% — AEH=0,6% — AEH=0,8% — 1% AEH



— AEH=1,2% — AEH=1,4% — AEH=1,6% — AEH=1,8% — AEH=2% — 2,2% AEH

Resultados dos ensaios de evolução de temperatura para águas de lavagem de  $a/c=10$ , sem aditivo redutor de água e 0% a 2,2% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%.

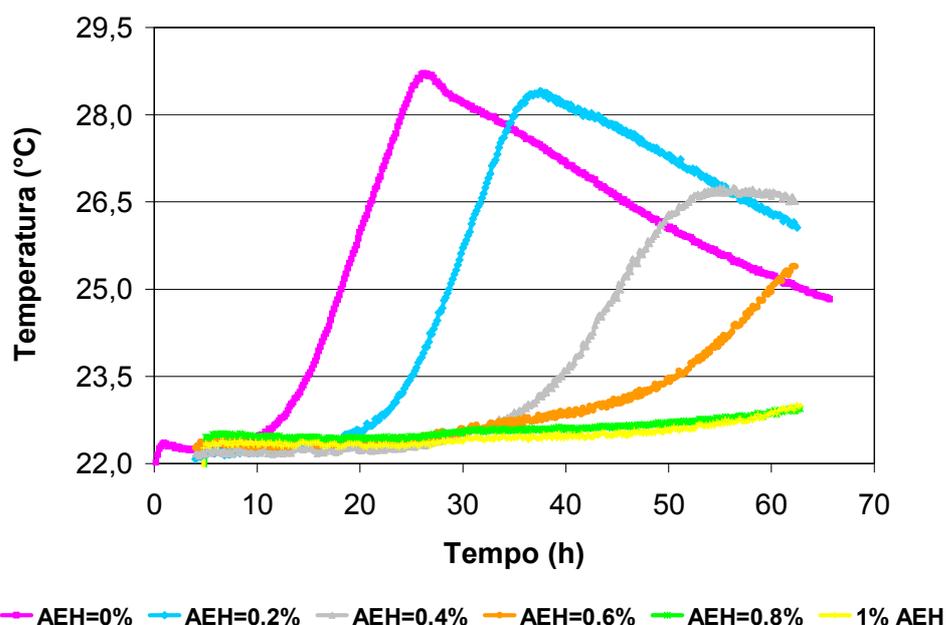


Na Tabela estão apresentados os tempos de estabilização obtidos de acordo com o critério descrito no item 6.1.2, para águas de lavagem com 0% e 0,6% m.c. de aditivo redutor de água, para diversos teores de AEH, com base nos gráficos obtidos a partir do ensaio de evolução de temperatura.

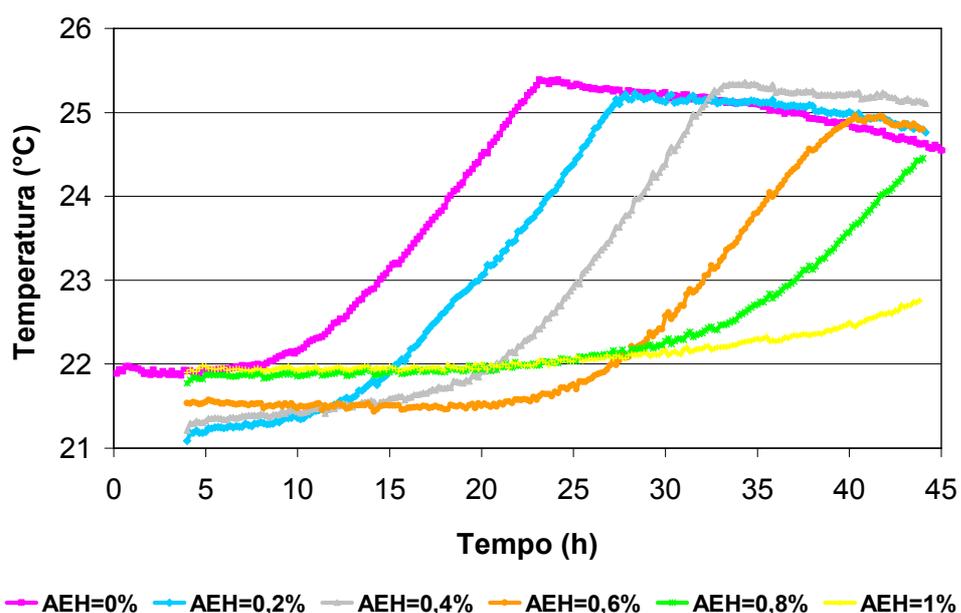
<b>Calorimetria semi-adiabática</b>		
<b>Teor de AEH (% m.c.)</b>	<b>Tempo de estabilização (h)</b>	
	<b>Com aditivo reductor de água</b>	<b>Sem aditivo reductor de água</b>
0	9	4
0,2	12	7
0,4	17	8,5
0,6	21	9
0,8	26	8,5
1	31	8,5
1,2	30	12
1,4	33	12
1,6	43	12
1,8	46	12
2	52	19
2,2	62	19

#### APÊNDICE 4

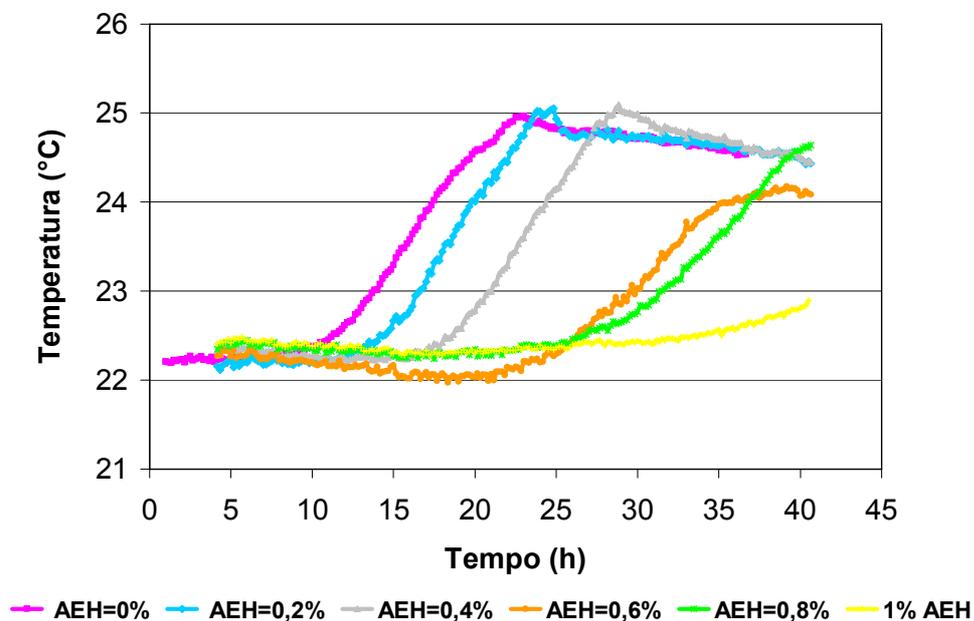
Resultados dos ensaios de evolução de temperatura para águas de lavagem de  $a/c=5$ , com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 1% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%.



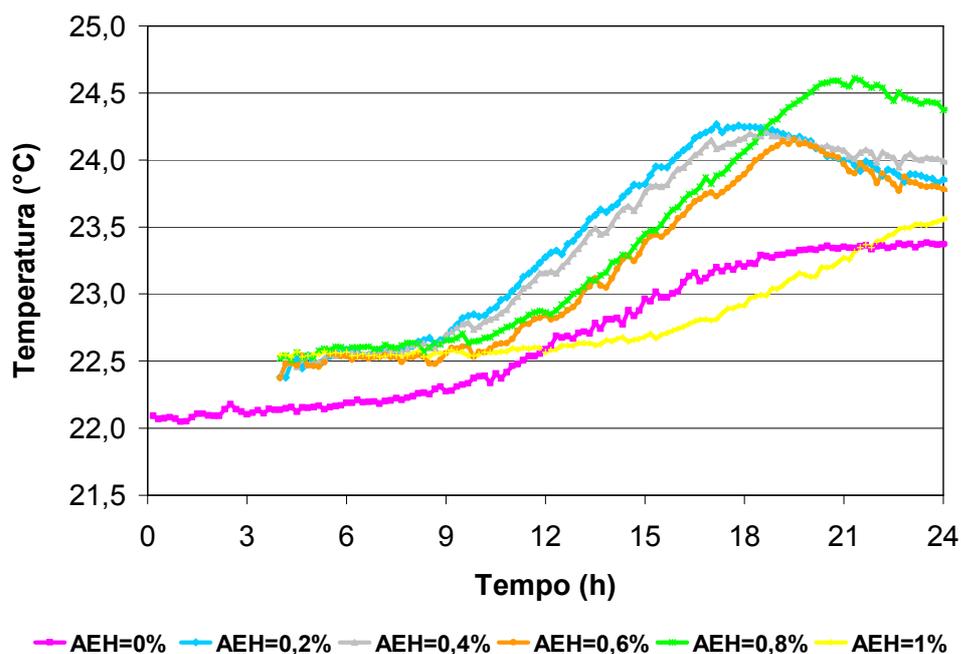
Resultados dos ensaios de evolução de temperatura para águas de lavagem de  $a/c=7,5$ , com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 1% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%.



Resultados dos ensaios de evolução de temperatura para águas de lavagem de  $a/c=10$ , com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 1% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%.



Resultados dos ensaios de evolução de temperatura para águas de lavagem de  $a/c=15$ , com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 1% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%.



Na Tabela estão apresentados os tempos de estabilização obtidos de acordo com o critério descrito no item 6.1.2, para águas de lavagem com diversas relações a/c, a partir dos gráficos obtidos no ensaio de evolução de temperatura.

<b>Calorimetria semi-adiabática</b>				
<b>Teor de AEH (% m.c.)</b>	<b>Tempo de estabilização (h)</b>			
	<b>a/c=5</b>	<b>a/c=7,5</b>	<b>a/c=10</b>	<b>a/c=15</b>
0	10	8,5	9	10
0,2	17	11	12	9
0,4	28	16	17	9
0,6	33	23	21	11
0,8	42	25	26	11
1	47	27	31	12,5

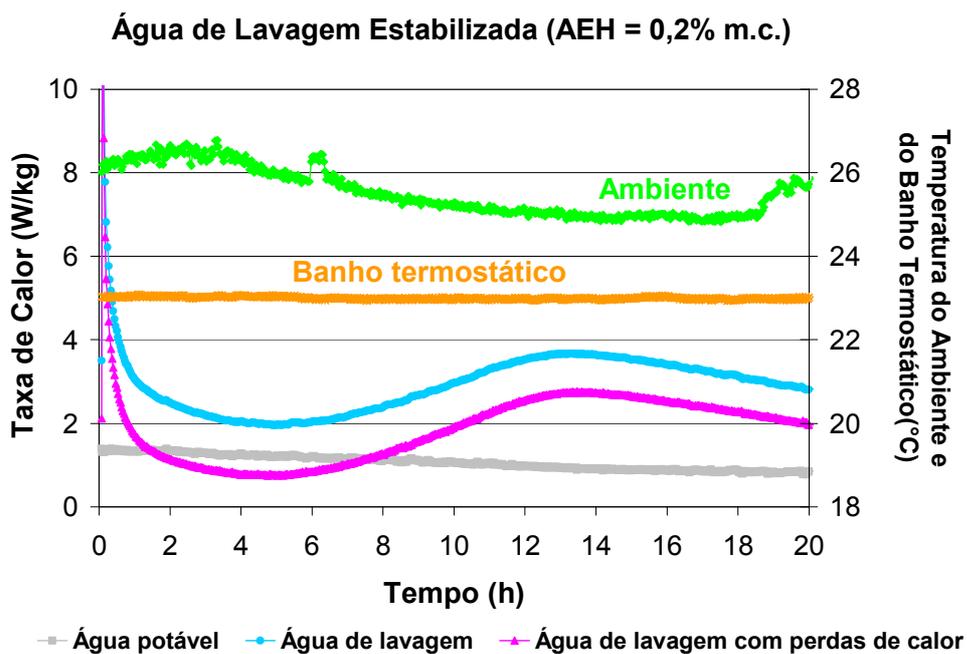
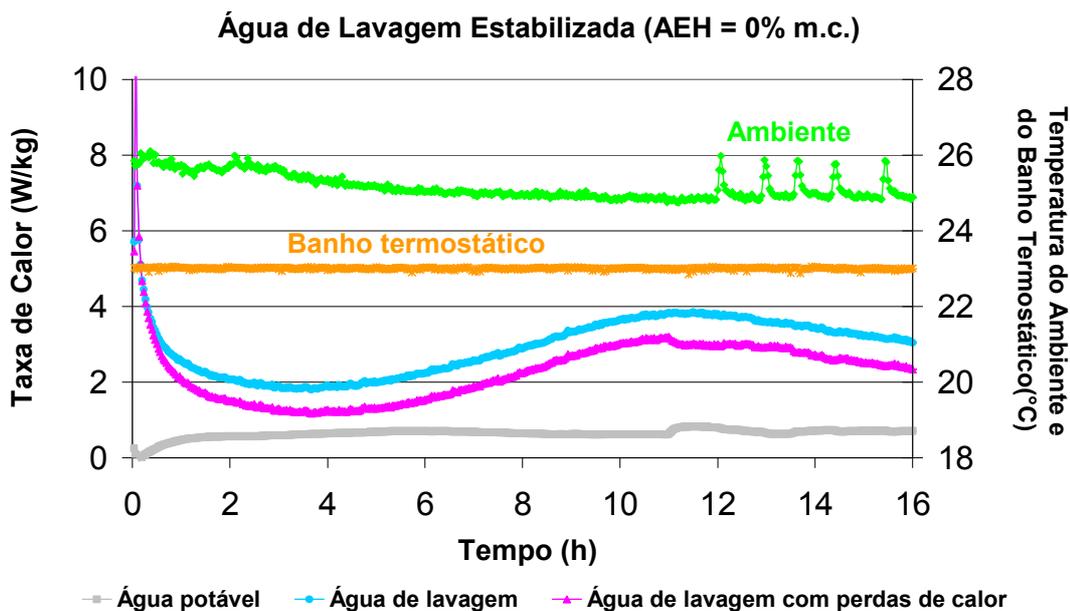
**APÊNDICE 5**

Na Tabela estão apresentados os tempos de estabilização obtidos de acordo com o critério descrito no item 6.1.2, para águas de lavagem, para diversos teores de AEH, com base nos gráficos obtidos a partir do ensaio de evolução de temperatura.

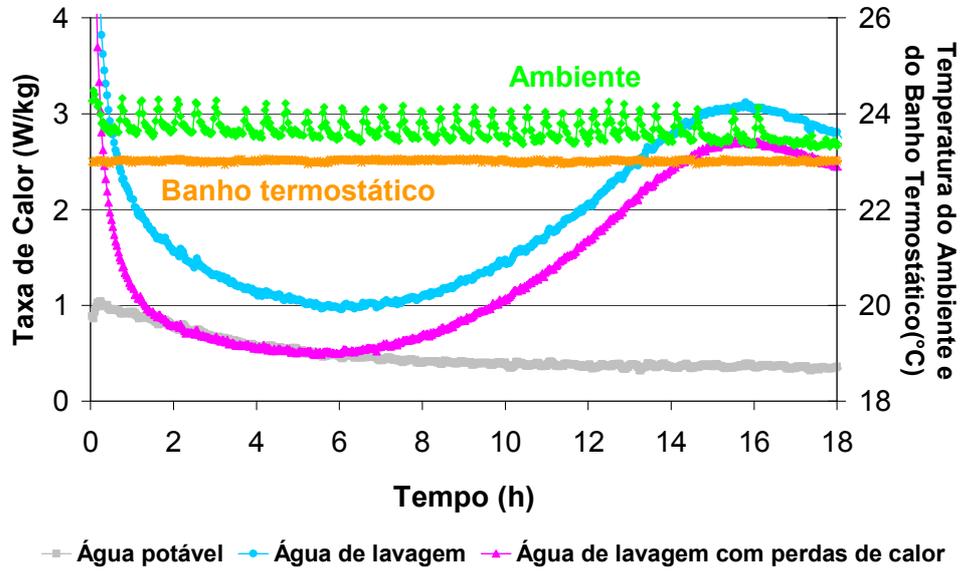
<b>Calorimetria semi-adiabática</b>	
<b>Teor de AEH (% m.c.)</b>	<b>Tempo de estabilização (h)</b>
0	3
0,2	5
0,4	10
0,6	14
0,8	18
1	25
1,2	31
1,4	38
1,6	44
1,8	56
2	57
2,2	63
2,4	76
2,6	84

## APÊNDICE 6

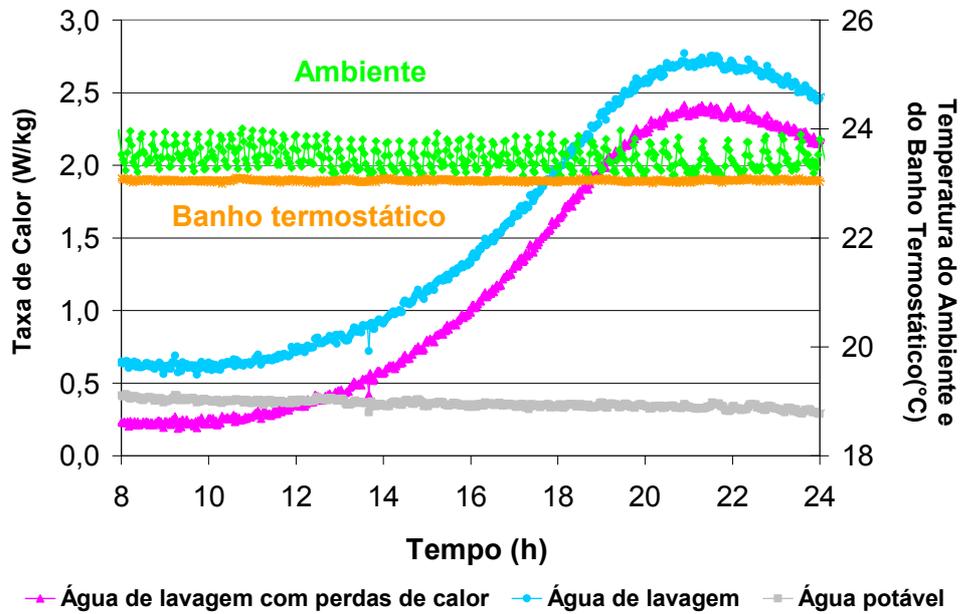
Resultados dos ensaios de calorimetria isotérmica para águas de lavagem de  $a/c=10$ , com 0,6% m.c. de aditivo redutor de água e 0% a 2,2% m.c. de AEH, com incrementos de 0,2%.



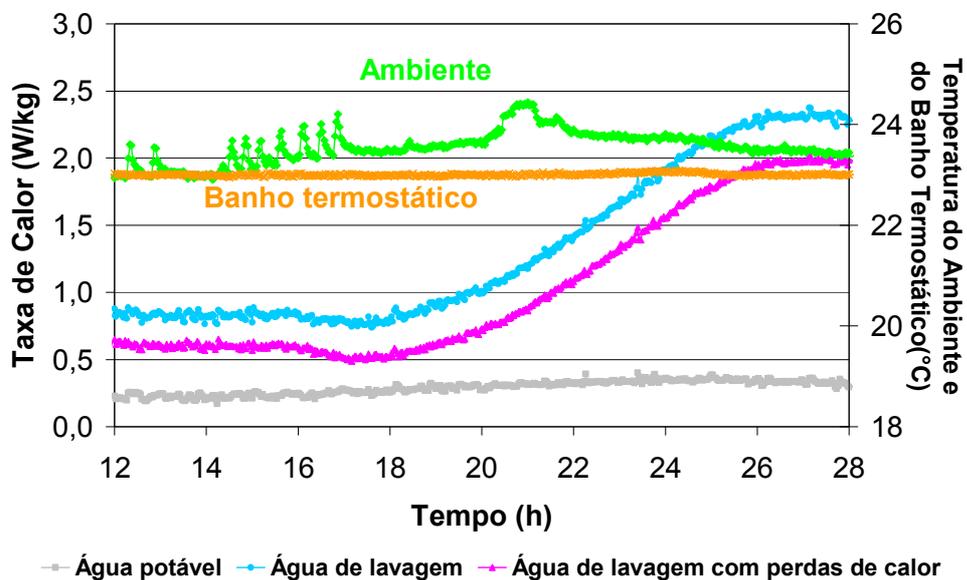
**Água de Lavagem Estabilizada (AEH= 0,4% m.c.)**



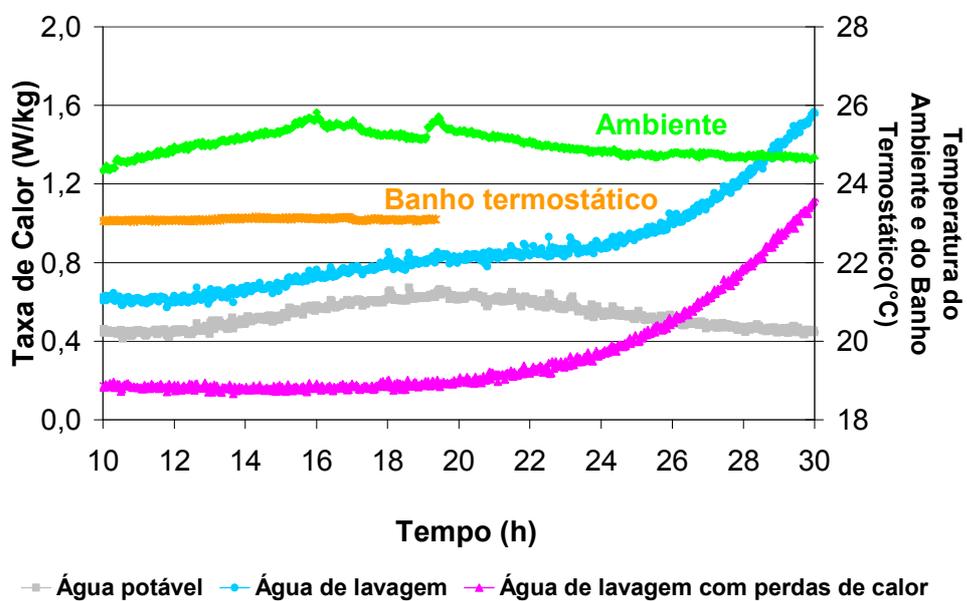
**Água de Lavagem Estabilizada (AEH = 0,6% m.c.)**

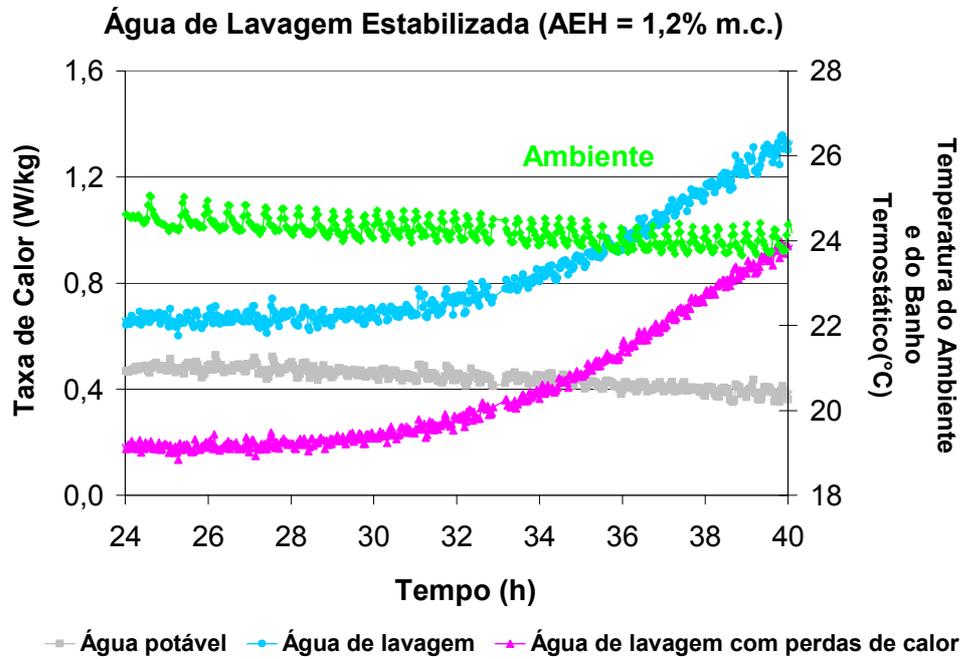
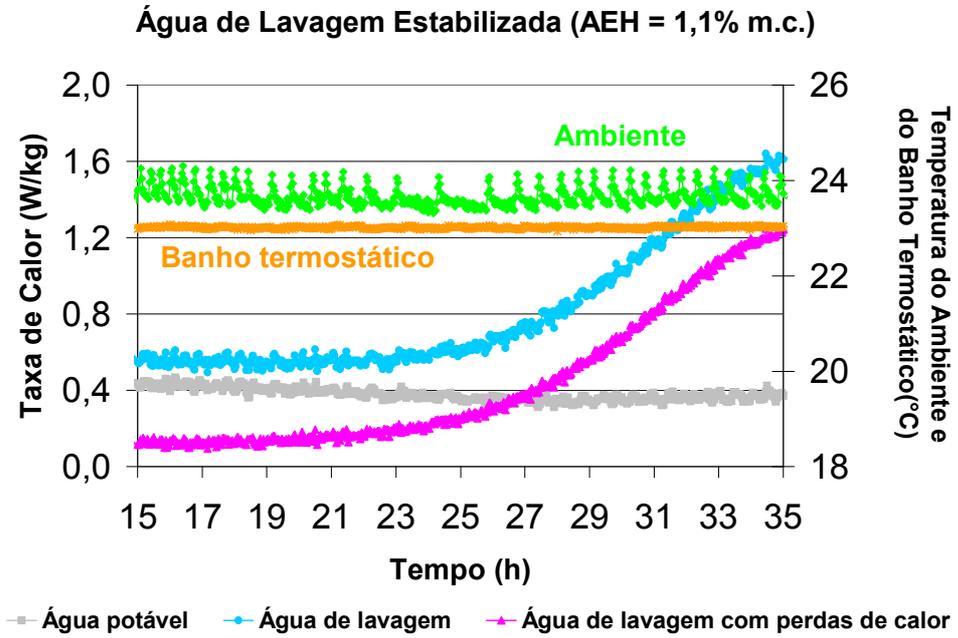


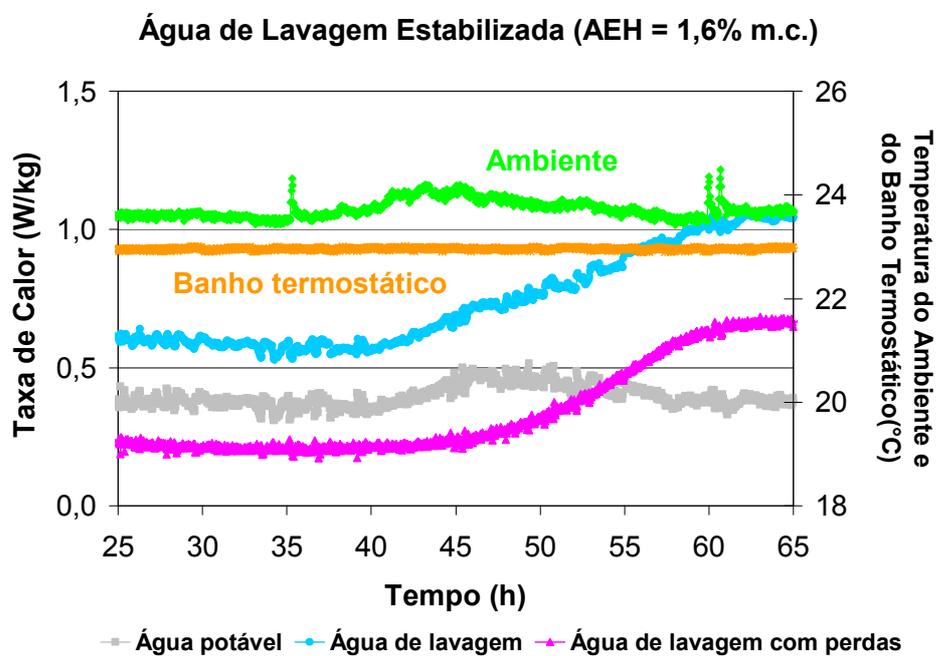
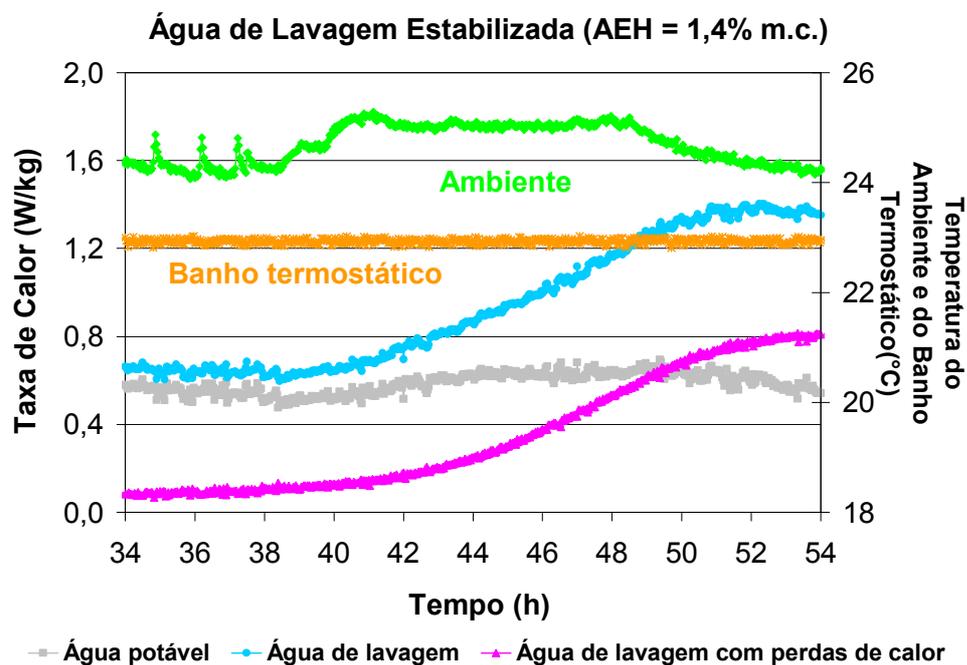
### Água de Lavagem Estabilizada (AEH = 0,8% m.c.)

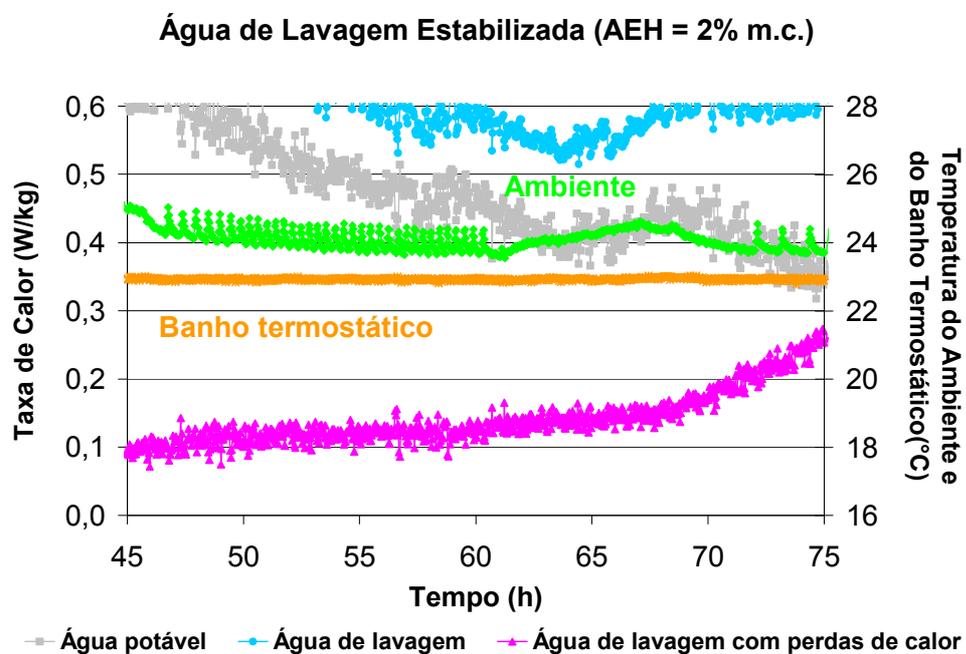
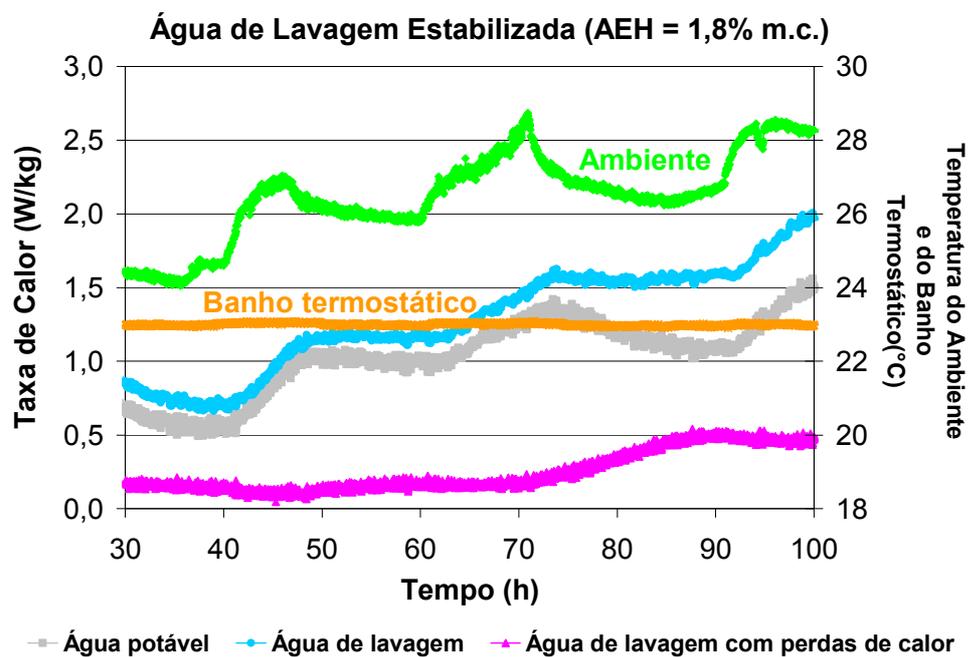


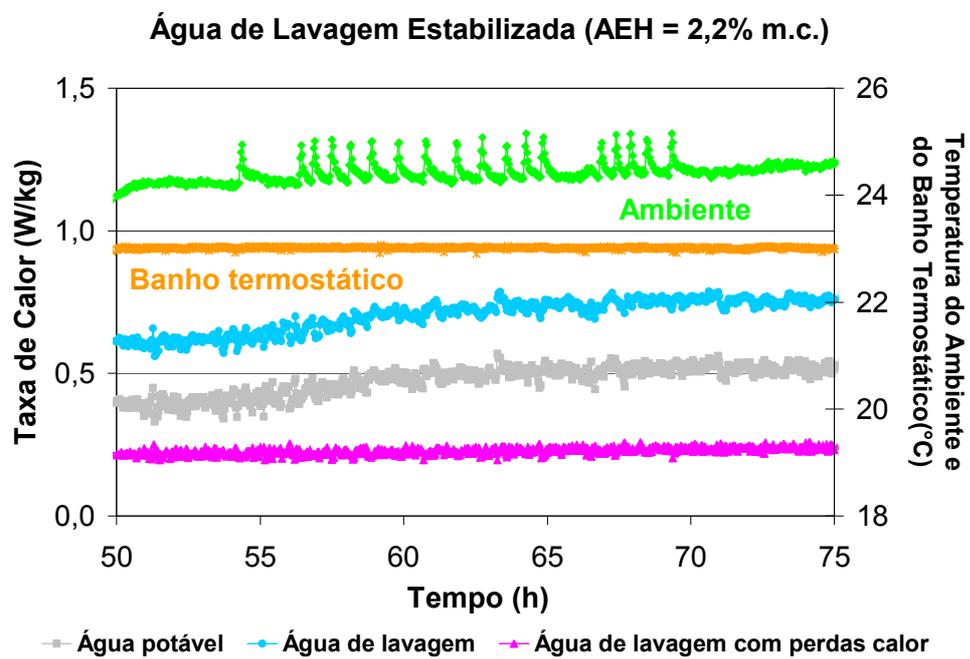
### Água de Lavagem Estabilizada (AEH = 1% m.c.)











Na Tabela estão apresentados os tempos de estabilização obtidos de acordo com o critério descrito no item 6.1.2, para águas de lavagem, para diversos teores de AEH, com base nos gráficos obtidos a partir do ensaio de evolução de temperatura.

<b>Calorimetria isotérmica</b>	
<b>Teor de AEH (% m.c.)</b>	<b>Tempo de estabilização (h)</b>
0	5
0,2	6
0,4	7
0,6	12
0,8	18
1	20
1,1	22
1,2	30
1,4	42
1,6	46
1,8	-
2	-
2,2	-

## APÊNDICE 7

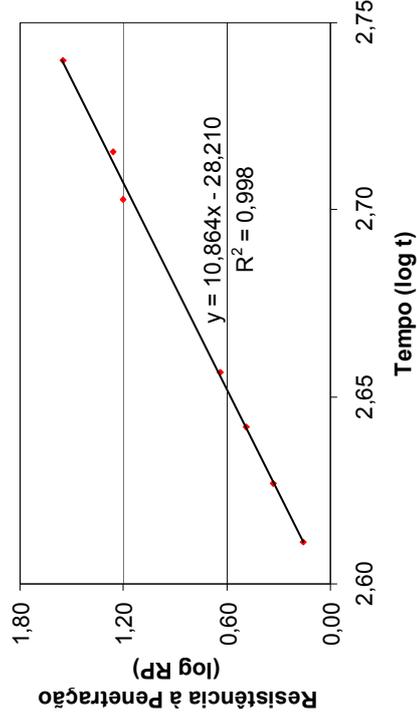
## Resultados do ensaio de pega através da resistência à penetração nas argamassas convencionais.

ARGAMASSA CONVENCIONAL DE REFERÊNCIA															
CP 1					CP 2										
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
16:03	06:47	407,00	2,61	1/5	37	1,431	0,156	16:06	06:50	410,00	2,61	1/5	37	1,431	0,156
16:18	07:02	422,00	2,63	1/5	54	2,088	0,320	16:21	07:05	425,00	2,63	1/5	56,5	2,185	0,339
16:33	07:17	437,00	2,64	1/10	41	3,171	0,501	16:36	07:20	440,00	2,64	1/10	39	3,016	0,479
16:48	07:32	452,00	2,66	1/10	55	4,254	0,629	16:51	07:35	455,00	2,66	1/10	57	4,409	0,644
17:40	08:24	504,00	2,70	1/20	118	18,253	1,261	17:41	08:25	505,00	2,70	1/20	90	13,922	1,144
17:55	08:39	519,00	2,72	1/30	92	21,347	1,329	17:56	08:40	520,00	2,72	1/30	66	15,314	1,185
18:25	09:09	549,00	2,74	1/40	115	35,579	1,551	18:26	09:10	550,00	2,74	1/40	115,5	35,733	1,553

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,61	0,156
2,63	0,330
2,64	0,490
2,66	0,637
2,70	1,203
2,72	1,257
2,74	1,552

## Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$\log (PR) = 10,864x \log (t) - 28,21$

$a_0 = -28,1$

$a_1 = 10,864$

$\log(t)$  início = 2,65

$\log(t)$  fim = 2,73

Tempo de início de pega = 443min (7h23min)

Tempo de início de pega = 536min (8h56min)

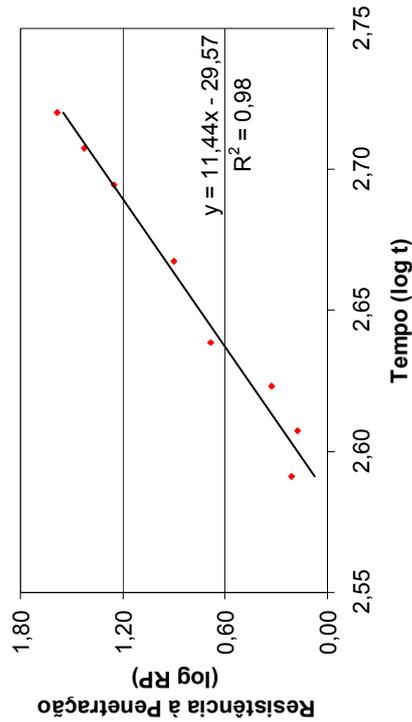
## ARGAMASSA CONVENCIONAL COM TEOR MÍNIMO (NOITE)

CP 1										CP 2					
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
15:30	06:30	390,00	2,59	1/5	35	1,354	0,131	15:30	06:30	390,00	2,59	1/5	51	1,972	0,295
15:45	06:45	405,00	2,61	1/5	48	1,856	0,269	15:45	06:45	405,00	2,61	1/5	31	1,199	0,079
16:00	07:00	420,00	2,62	1/5	69	2,668	0,426	16:00	07:00	420,00	2,62	1/5	44	1,702	0,231
16:15	07:15	435,00	2,64	1/10	65	5,027	0,701	16:15	07:15	435,00	2,64	1/10	60	4,641	0,667
16:45	07:45	465,00	2,67	1/20	53	8,199	0,914	16:45	07:45	465,00	2,67	1/20	50	7,735	0,888
17:15	08:15	495,00	2,69	1/30	89	20,651	1,315	17:15	08:15	495,00	2,69	1/30	66	15,314	1,185
17:30	08:30	510,00	2,71	1/40	92,5	28,618	1,457	17:30	08:30	510,00	2,71	1/40	80	24,750	1,394
17:45	08:45	525,00	2,72	1/40	118	36,507	1,562	17:45	08:45	525,00	2,72	1/40	131	40,529	1,608

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,59	0,213
2,61	0,174
2,62	0,329
2,64	0,684
2,67	0,901
2,69	1,250
2,71	1,425
2,72	1,585

## Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$$\log (PR) = 11,442x \log (t) - 29,574$$

$$a0 = -29,574$$

$$a1 = 11,442$$

$$\text{Log}(t) \text{ início} = 2,63$$

$$\text{Log}(t) \text{ fim} = 2,71$$

Tempo de início de pega = 429min (7h9min)

Tempo de início de pega = 514min (8h34min)

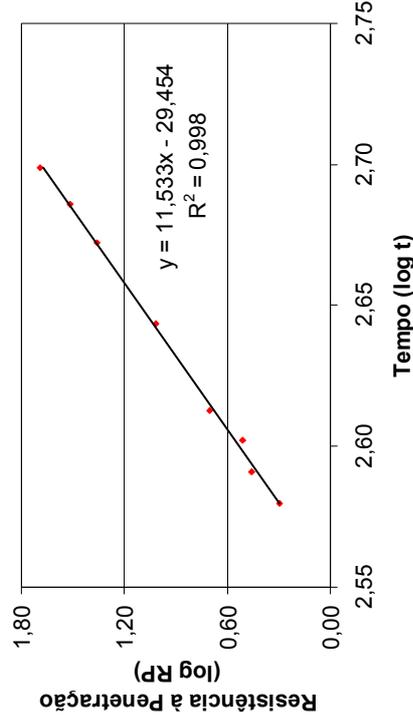
## ARGAMASSA CONVENCIONAL COM TEOR DE SEGURANÇA (NOITE)

CP 1										CP 2					
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
15:20	06:20	380,00	2,58	1/3	91	2,112	0,325	15:20	06:20	380,00	2,58	1/3	80	1,856	0,269
15:30	06:30	390,00	2,59	1/5	83	3,210	0,506	15:30	06:30	390,00	2,59	1/5	67	2,591	0,413
15:40	06:40	400,00	2,60	1/10	50	3,867	0,587	15:40	06:40	400,00	2,60	1/10	35	2,707	0,433
15:50	06:50	410,00	2,61	1/10	68	5,259	0,721	15:50	06:50	410,00	2,61	1/10	62	4,795	0,681
16:20	07:20	440,00	2,64	1/20	68,5	10,596	1,025	16:20	07:20	440,00	2,64	1/20	65	10,055	1,002
16:50	07:50	470,00	2,67	1/30	89,5	20,767	1,317	16:50	07:50	470,00	2,67	1/30	107	24,828	1,395
17:05	08:05	485,00	2,69	1/40	107	33,104	1,520	17:05	08:05	485,00	2,69	1/40	105	32,485	1,512
17:20	08:20	500,00	2,70	1/40	150	46,407	1,667	17:20	08:20	500,00	2,70	1/40	165	51,048	1,708

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,58	0,297
2,59	0,460
2,60	0,510
2,61	0,701
2,64	1,014
2,67	1,356
2,69	1,516
2,70	1,687

## Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa

Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$$\log (PR) = 11,533x \log (t) - 29,454$$

$$a_0 = -29,454$$

$$a_1 = 11,533$$

$$\text{Log}(t) \text{ início} = 2,60$$

$$\text{Log}(t) \text{ fim} = 2,64$$

Tempo de início de pega = 399min (6h39min)

Tempo de início de pega = 437,459min (7h17min)

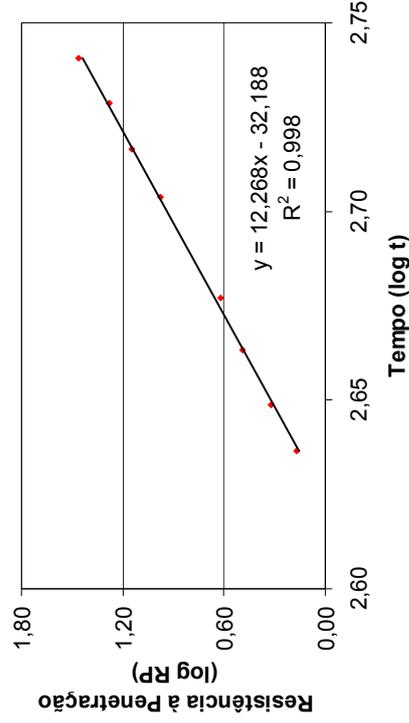
## ARGAMASSA CONVENCIONAL COM TEOR DO FABRICANTE (NOITE)

CP 1										CP 2					
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
								16:15	07:13	433,00	2,64	1/3	64	1,485	0,172
16:25	07:23	443,00	2,65	1/5	55	2,127	0,328	16:30	07:28	448,00	2,65	1/5	53	2,050	0,312
16:40	07:38	458,00	2,66	1/5	76	2,939	0,468	16:45	07:43	463,00	2,67	1/5	84	3,248	0,512
16:55	07:53	473,00	2,67	1/10	52	4,022	0,604	17:00	07:58	478,00	2,68	1/10	55	4,254	0,629
17:25	08:23	503,00	2,70	1/20	62	9,591	0,982	17:30	08:28	508,00	2,71	1/20	60	9,281	0,968
17:40	08:38	518,00	2,71	1/20	86	13,303	1,124	17:45	08:43	523,00	2,72	1/20	94	14,541	1,163
17:55	08:53	533,00	2,73	1/30	74	17,171	1,235	18:00	08:58	538,00	2,73	1/30	90	20,883	1,320
18:10	09:08	548,00	2,74	1/40	92	28,463	1,454	18:15	09:13	553,00	2,74	1/40	95	29,391	1,468

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,64	0,172
2,65	0,320
2,66	0,490
2,68	0,617
2,70	0,975
2,72	1,143
2,73	1,277
2,74	1,461

## Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$\log (PR) = 12,268x \log (t) - 32,188$

$a_0 = -32,188$

$a_1 = 12,268$

$\log(t)$  início = 2,67

$\log(t)$  fim = 2,74

Tempo de início de pega = 466min (7h46min)

Tempo de início de pega = 551min (9h11min)

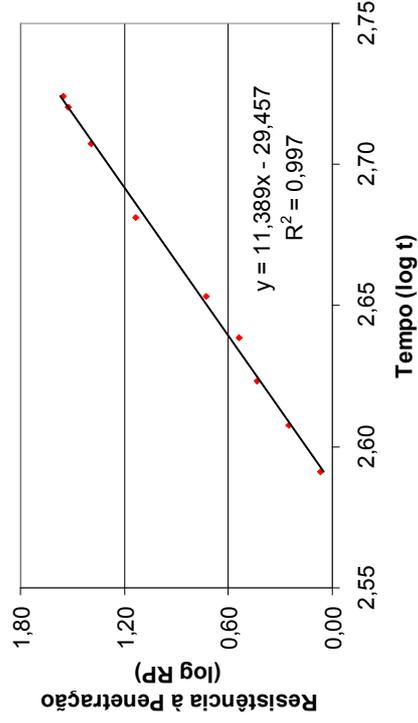
## ARGAMASSA CONVENCIONAL COM TEOR DE MÍNIMO (FIM DE SEMANA)

CP 1										CP 2					
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
15:30	06:30	390,00	2,59	1/3	56	1,299	0,114	15:30	06:30	390,00	2,59	1/3	45	1,044	0,019
15:45	06:45	405,00	2,61	1/5	44	1,702	0,231	15:45	06:45	405,00	2,61	1/5	48	1,856	0,269
16:00	07:00	420,00	2,62	1/10	38	2,939	0,468	16:00	07:00	420,00	2,62	1/10	33	2,552	0,407
16:15	07:15	435,00	2,64	1/10	33,5	2,591	0,413	16:15	07:15	435,00	2,64	1/10	59	4,563	0,659
16:30	07:30	450,00	2,65	1/10	61	4,718	0,674	16:30	07:30	450,00	2,65	1/10	78	6,033	0,781
17:00	08:00	480,00	2,68	1/20	82,5	12,762	1,106	17:00	08:00	480,00	2,68	1/20	94	14,541	1,163
17:30	08:30	510,00	2,71	1/20	165	25,524	1,407	17:30	08:30	510,00	2,71	1/20	155	23,977	1,380
17:45	08:45	525,00	2,72	1/40	99	30,629	1,486	17:45	08:45	525,00	2,72	1/40	118,5	36,662	1,564
17:50	08:50	530,00	2,72	1/40	110	34,032	1,532	17:50	08:50	530,00	2,72	1/40	120	37,126	1,570

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,59	0,066
2,61	0,250
2,62	0,438
2,64	0,536
2,65	0,727
2,68	1,134
2,71	1,393
2,72	1,525
2,72	1,551

## Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$$\log (PR) = 11,389x \log (t) - 29,457$$

$$a0 = -29,457$$

$$a1 = 11,389$$

$$\text{Log}(t) \text{ início} = 2,63$$

$$\text{Log}(t) \text{ fim} = 2,71$$

Tempo de início de pega = 430,739min (7h11min)

Tempo de início de pega = 516,370min (8h37min)

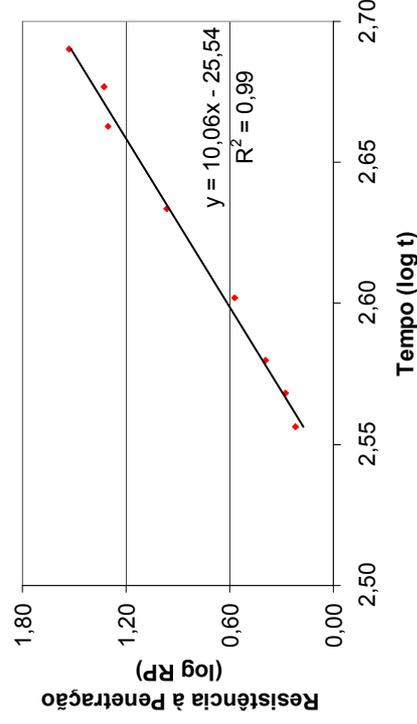
## ARGAMASSA CONVENCIONAL COM TEOR SEGURANÇA (FIM DE SEMANA)

CP 1										CP 2						
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	
15:00	06:00	360,00	2,56	1/3	65	1,508	0,178	15:00	06:00	360,00	2,56	1/3	78	1,810	0,258	
15:10	06:10	370,00	2,57	1/5	43,5	1,682	0,226	15:10	06:10	370,00	2,57	1/5	55	2,127	0,328	
15:20	06:20	380,00	2,58	1/10	32	2,475	0,394	15:20	06:20	380,00	2,58	1/10	32	2,475	0,394	
15:40	06:40	400,00	2,60	1/10	50	3,867	0,587	15:40	06:40	400,00	2,60	1/10	46	3,558	0,551	
16:10	07:10	430,00	2,63	1/20	55	8,508	0,930	16:10	07:10	430,00	2,63	1/20	65	10,055	1,002	
16:40	07:40	460,00	2,66	1/30	92	21,347	1,329	16:40	07:40	460,00	2,66	1/30	82	19,027	1,279	
16:55	07:55	475,00	2,68	1/30	78,5	18,215	1,260	16:55	07:55	475,00	2,68	1/30	106	24,596	1,391	
17:10	08:10	490,00	2,69	1/40	96	29,701	1,473	17:10	08:10	490,00	2,69	1/40	125	38,673	1,587	

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,56	0,218
2,57	0,277
2,58	0,394
2,60	0,569
2,63	0,966
2,66	1,304
2,68	1,326
2,69	1,530

## Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa

Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$\log (PR) = 10,058x \log (t) - 25,54$

$a_0 = -25,54$

$a_1 = 10,058$

Log(t) início= 2,59

Log(t) fim= 2,68

Tempo de início de pega = 392,072min (6h32min)

Tempo de início de pega = 481,429min (8h1min)

## ARGAMASSA CONVENCIONAL COM TEOR FABRICANTE (FIM DE SEMANA)

CP 1										CP 2									
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)				
18:40	07:40	460,00	2,66	1/5	39	1,508	0,178	18:40	07:40	460,00	2,66	1/5	55	2,127	0,328				
18:50	07:50	470,00	2,67	1/5	52	2,011	0,303	18:50	07:50	470,00	2,67	1/5	86	3,326	0,522				
19:00	08:00	480,00	2,68	1/10	30	2,320	0,366	19:00	08:00	480,00	2,68	1/10	39	3,016	0,479				
19:10	08:10	490,00	2,69	1/10	45	3,481	0,542	19:10	08:10	490,00	2,69	1/10	63	4,873	0,688				
19:40	08:40	520,00	2,72	1/20	41	6,342	0,802	19:40	08:40	520,00	2,72	1/20	60	9,281	0,968				
20:10	09:10	550,00	2,74	1/30	58	13,458	1,129	20:10	09:10	550,00	2,74	1/30	72	16,707	1,223				
20:40	09:40	580,00	2,76	1/40	78	24,132	1,383	20:40	09:40	580	2,76	1/40	132	40,838	1,611				
20:55	09:55	595,00	2,77	1/40	105	32,485	1,512												

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,66	0,253
2,67	0,413
2,68	0,423
2,69	0,615
2,72	0,885
2,74	1,176
2,76	1,497
2,77	1,512

Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
 Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$$\log(\text{PR}) = 11,644x \log(t) - 30,739$$

$$a0 = -30,739$$

$$a1 = 11,644$$

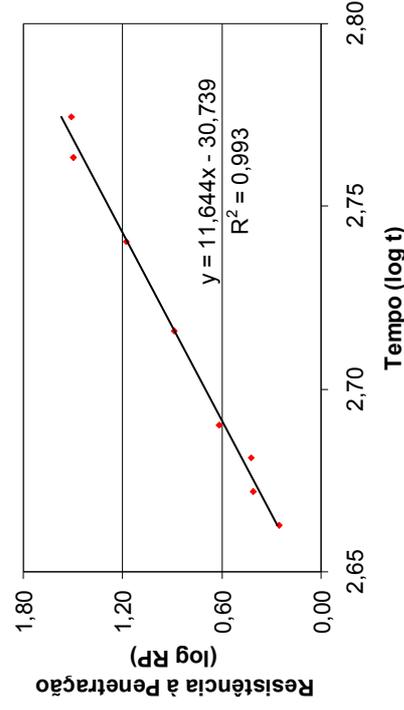
$$\text{Log}(t) \text{ início} = 2,69$$

$$\text{Log}(t) \text{ fim} = 2,76$$

$$\text{Tempo de início de pega} = 485,988 \text{min (8h6min)}$$

$$\text{Tempo de fim de pega} = 580,293 \text{min (9h40min)}$$

Tempos de início e fim de pega

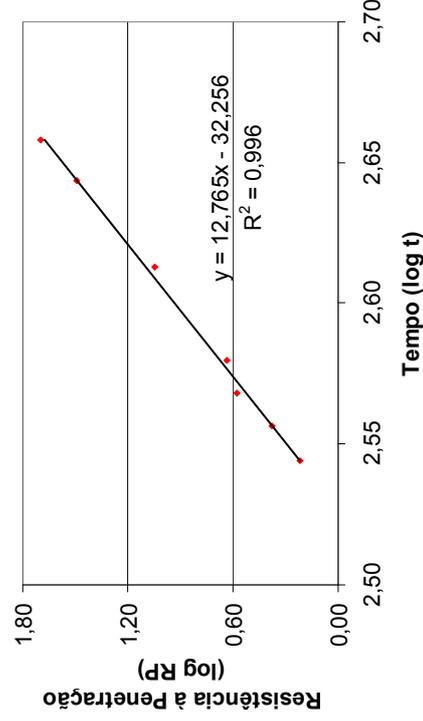


### Resultados do ensaio de pega através da resistência à penetração nas argamassas de maior resistência.

ARGAMASSA DE MAIOR RESISTÊNCIA DE REFERÊNCIA															
CP 1							CP 2								
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
17:52	05:50	350,00	2,54	1/3	78	1,810	0,258	17:52	05:50	350,00	2,54	1/3	65	1,508	0,178
18:02	06:00	360,00	2,56	1/5	56	2,166	0,336	18:02	06:00	360,00	2,56	1/5	68,5	2,649	0,423
18:12	06:10	370,00	2,57	1/10	36	2,784	0,445	18:12	06:10	370,00	2,57	1/10	67	5,182	0,715
18:22	06:20	380,00	2,58	1/10	54	4,177	0,621	18:22	06:20	380,00	2,58	1/10	57	4,409	0,644
18:52	06:50	410,00	2,61	1/20	66	10,210	1,009	18:52	06:50	410,00	2,61	1/20	78,5	12,143	1,084
19:22	07:20	440,00	2,64	1/30	137	31,789	1,502	19:22	07:20	440,00	2,64	1/30	130	30,165	1,479
19:37	07:35	455,00	2,66	1/40	169,5	52,440	1,720	19:37	07:35	455,00	2,66	1/40	154	47,645	1,678

Média	
Log (t)	Log (PR)
2,54	0,218
2,56	0,379
2,57	0,580
2,58	0,633
2,61	1,047
2,64	1,491
2,66	1,699

Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$$\log (PR) = 12,765x \log (t) - 32,256$$

$$a_0 = -32,256$$

$$a_1 = 12,765$$

$$\text{Log}(t) \text{ início} = 2,57$$

$$\text{Log}(t) \text{ fim} = 2,64$$

Tempo de início de pega = 371,135min (6h11min)

Tempo de início de pega = 436,304min (7h16min)

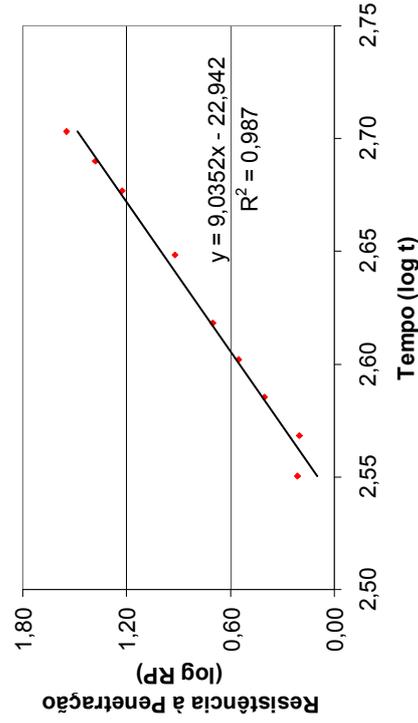
## ARGAMASSA DE MAIOR RESISTÊNCIA COM TEOR MÍNIMO (NOITE)

CP 1										CP 2					
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
17:00	05:55	355,00	2,55	1/5	55,5	2,146	0,332	17:00	05:55	355,00	2,55	1/5	32	1,238	0,093
17:15	06:10	370,00	2,57	1/5	38	1,470	0,167	17:15	06:10	370,00	2,57	1/5	44	1,702	0,231
17:30	06:25	385,00	2,59	1/10	38	2,939	0,468	17:30	06:25	385,00	2,59	1/10	28	2,166	0,336
17:45	06:40	400,00	2,60	1/10	50	3,867	0,587	17:45	06:40	400,00	2,60	1/10	42	3,248	0,512
18:00	06:55	415,00	2,62	1/20	34	5,259	0,721	18:00	06:55	415,00	2,62	1/20	31	4,795	0,681
18:30	07:25	445,00	2,65	1/20	55	8,508	0,930	18:30	07:25	445,00	2,65	1/20	52,5	8,121	0,910
19:00	07:55	475,00	2,68	1/30	85	19,723	1,295	19:00	07:55	475,00	2,68	1/30	62	14,386	1,158
19:15	08:10	490,00	2,69	1/40	80	24,750	1,394	19:15	08:10	490,00	2,69	1/40	75	23,204	1,366
19:30	08:25	505,00	2,70	1/40	113	34,960	1,544	19:30	08:25	505,00	2,70	1/40	115	35,579	1,551

## Média

Log (t)	Log (PR)
2,55	0,212
2,57	0,199
2,59	0,402
2,60	0,550
2,62	0,701
2,65	0,920
2,68	1,226
2,69	1,380
2,70	1,547

## Tempos de início e fim de pega



Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa

$$\log (PR) = 9,0352x \log (t) - 22,942$$

$$a0 = -22,942$$

$$a1 = 9,0352$$

$$\text{Log}(t) \text{ início} = 2,60$$

$$\text{Log}(t) \text{ fim} = 2,70$$

$$\text{Tempo de início de pega} = 397,554 (6h38min)$$

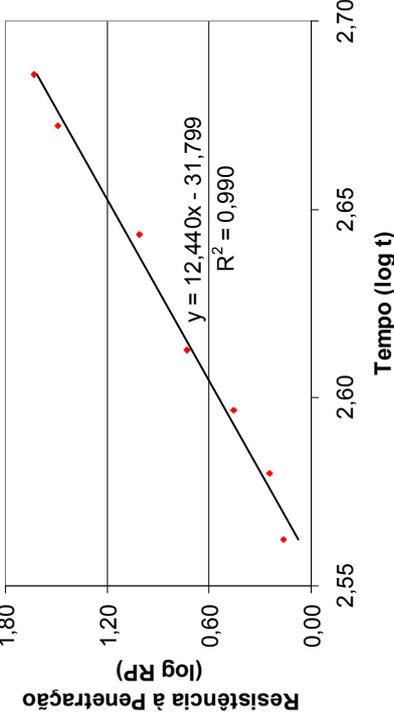
$$\text{Tempo de início de pega} = 499,640min (8h20min)$$

## ARGAMASSA DE MAIOR RESISTÊNCIA COM TEOR MÍNIMO (FIM DE SEMANA)

CP 1										CP 2									
Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	Hora	Tempo	Tempo (min)	Log (t)	Agulha	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)				
17:05	06:05	365,00	2,56	1/3	61	1,415	0,151	17:05	06:05	365,00	2,56	1/3	64	1,485	0,172				
17:20	06:20	380,00	2,58	1/5	41	1,586	0,200	17:20	06:20	380,00	2,58	1/5	50	1,934	0,286				
17:35	06:35	395,00	2,60	1/10	35	2,707	0,433	17:35	06:35	395,00	2,60	1/10	39	3,016	0,479				
17:50	06:50	410,00	2,61	1/10	66	5,105	0,708	17:50	06:50	410,00	2,61	1/10	73	5,646	0,752				
18:20	07:20	440,00	2,64	1/20	65	10,055	1,002	18:20	07:20	440,00	2,64	1/20	67	10,364	1,016				
18:50	07:50	470,00	2,67	1/30	125	29,004	1,462	18:50	07:50	470,00	2,67	1/30	141	32,717	1,515				
19:05	08:05	485,00	2,69	1/40	135	41,766	1,621	19:05	08:05	485,00	2,69	1/40	142,5	44,087	1,644				

Média	
Log (t)	Log (PR)
2,56	0,161
2,58	0,243
2,60	0,456
2,61	0,730
2,64	1,009
2,67	1,489
2,69	1,633

Início de pega → Resistência à penetração = 3,5 MPa  
 Fim de pega → Resistência à penetração = 27,6 MPa



$\log (PR) = 12,44x \log (t) - 31,799$

$a_0 = -31,799$   
 $a_1 = 12,44$

Log(t) início= 2,60  
 Log(t) fim= 2,67

Tempo de início de pega = 398,039min (6h38min)  
 Tempo de início de pega = 469,914min (7h50min)



## APÊNDICE 9

### Custo dos concretos convencionais em R\$/m<sup>3</sup>.

<b>Concreto Convencional de Referência</b>				
Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	267,57	0,32	85,62
Brita	m <sup>3</sup>	0,695	27,00	18,75
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,322	20,00	6,44
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,280	21,00	5,89
Lignosulfonato	litros	1,35	1,23	1,66
AEH	litros	0,00	2,56	0,00
<b>Total:</b>				<b>118,36</b>

<b>Concreto Convencional com o Teor Mínimo (Noite)</b>				
Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	267,57	0,32	85,62
Brita	m <sup>3</sup>	0,695	27,00	18,75
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,322	20,00	6,44
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,280	21,00	5,89
Lignosulfonato	litros	1,35	1,23	1,66
AEH	litros	0,019	2,56	0,05
<b>Total:</b>				<b>118,41</b>

<b>Concreto Convencional com o Teor de Segurança (Noite)</b>				
Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	267,57	0,32	85,62
Brita	m <sup>3</sup>	0,695	27,00	18,75
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,322	20,00	6,44
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,280	21,00	5,89
Lignosulfonato	litros	1,35	1,23	1,66
AEH	litros	0,026	2,56	0,07
<b>Total:</b>				<b>118,43</b>

<b>Concreto Convencional com o Teor do Fabricante (Noite)</b>				
Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	267,57	0,32	85,62
Brita	m <sup>3</sup>	0,695	27,00	18,75
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,322	20,00	6,44
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,280	21,00	5,89
Lignosulfonato	litros	1,35	1,23	1,66
AEH	litros	0,134	2,56	0,34
<b>Total:</b>				<b>118,70</b>

<b>Concreto Convencional com o Teor Mínimo (Fim de semana)</b>				
Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	267,57	0,32	85,62
Brita	m <sup>3</sup>	0,695	27,00	18,75
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,322	20,00	6,44
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,280	21,00	5,89
Lignosulfonato	litros	1,35	1,23	1,66
AEH	litros	0,053	2,56	0,13
<b>Total:</b>				<b>118,50</b>

**Concreto Convencional com o Teor de Segurança (Fim de semana)**

Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	267,57	0,32	85,62
Brita	m <sup>3</sup>	0,695	27,00	18,75
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,322	20,00	6,44
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,280	21,00	5,89
Lignosulfonato	litros	1,35	1,23	1,66
AEH	litros	0,057	2,56	0,15
<b>Total:</b>				<b>118,51</b>

**Concreto Convencional com o Teor do Fabricante (Fim de semana)**

Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	267,57	0,32	85,62
Brita	m <sup>3</sup>	0,695	27,00	18,75
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,322	20,00	6,44
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,280	21,00	5,89
Lignosulfonato	litros	1,35	1,23	1,66
AEH	litros	0,268	2,56	0,68
<b>Total:</b>				<b>119,05</b>

**Custo dos concretos de maior resistência em R\$/m<sup>3</sup>.****Concreto de Maior Resistência de Referência**

Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	402,55	0,32	128,82
Brita	m <sup>3</sup>	1,045	27,00	28,21
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,484	20,00	9,68
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,422	21,00	8,86
Lignosulfonato	litros	2,03	1,23	2,50
AEH	litros	0,000	2,56	0,00
<b>Total:</b>				<b>178,07</b>

**Concreto de Maior Resistência com o Teor Mínimo (Noite)**

Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	402,55	0,32	128,82
Brita	m <sup>3</sup>	1,045	27,00	28,21
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,484	20,00	9,68
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,422	21,00	8,86
Lignosulfonato	litros	2,03	1,23	2,50
AEH	litros	0,019	2,56	0,05
<b>Total:</b>				<b>178,12</b>

**Concreto de Maior Resistência com o Teor Mínimo (Fim de semana)**

Nome do insumo	Unidade	Quantidade	Valor	Total
Cimento	kg	402,55	0,32	128,82
Brita	m <sup>3</sup>	1,045	27,00	28,21
Areia Média	m <sup>3</sup>	0,484	20,00	9,68
Areia Fina	m <sup>3</sup>	0,422	21,00	8,86
Lignosulfonato	litros	2,03	1,23	2,50
AEH	litros	0,051	2,56	0,13
<b>Total:</b>				<b>178,20</b>