



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL**

*Avaliação de propriedades higrotérmicas das argamassas:  
estudo de caso com as cinzas pesadas*

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**FLORA ISABEL GRANDO SANTOS  
ORIENTADORA: JANAÍDE CAVALCANTE ROCHA  
FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2006.**

*Avaliação de propriedades higrotérmicas das argamassas:  
estudo de caso com as cinzas pesadas*

FLORA ISABEL GRANDO SANTOS

Dissertação julgada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Especialidade em ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo  
programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

---

Prof. Dr. GLICÉRIO TRICHÊS – Coordenador da PPGEC

---

Prof.<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup>. JANAÍDE CAVALCANTE ROCHA (UFSC) - Orientadora

**Comissão examinadora:**

---

Prof. Dr. ELTON BAUER (UNB)

---

Prof. Dr. CELSO PERES FERNANDES (UFSC)

---

Prof. Dr. FERNANDO BARTH (UFSC)

---

Prof. IVO JOSÉ PADARATZ, PHd (UFSC)

**“Se você quer os acertos,  
esteja preparado para os erros.”  
(Carl Yastrzemski)**

## AGRADECIMENTOS

À professora Janaíde por ter me introduzido e orientado no mundo da pesquisa desde os meus tempos de iniciação científica até a realização do meu mestrado, sendo que estes totalizam juntos mais de cinco anos.

Ao professor Malik pela indispensável ajuda na montagem do aparato experimental da sonda térmica e pelos ensinamentos.

Ao André Shinji por ter sido um bom companheiro ao longo do desenvolvimento do mestrado e por ter suavizado os momentos mais difíceis.

Ao Fernando Salvador por ter sido um bom ouvinte e por sua habilidade manual que foi bem explorada na montagem do aparato experimental da sonda térmica.

Aos amigos Eduardo Marques e David Pedrozo por terem sempre acreditado no meu potencial e terem se interessado pelo andamento da minha pesquisa.

Ao professor Celso Fernandes por sua disponibilidade para sanar dúvidas pertinentes a pesquisa, por sua presteza em responder e-mails e por seu bom humor.

Ao professor João Cardoso pela valiosa orientação a respeito do uso do Método Rietveld e por ter disponibilizado o equipamento de difração de raio-x para análise da composição mineralógica da cinza pesada.

Aos professores Elton, Celso, Ivo e Fernando Barth por terem aceitado o convite de participar da minha banca examinadora e contribuírem para a melhoria da presente dissertação.

Ao funcionário Roque pelas dicas de cunho prático na utilização de equipamentos do Laboratório de Materiais de Construção Civil.

À minha avó Zeny e à minha tia Neusa pelo apoio prestado durante a realização da pesquisa.

Ao meu pai por ter me incentivado a seguir na área da pesquisa.

Às amigas Carol, Márcia e Graci por terem compartilhado comigo a experiência de fazer mestrado.

Aos colegas do Grupo Valores: Caroline, Cecília, Gilmene, Jaime, Leonardo, Marcelo e Niubis pela rica convivência.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

À todos que contribuíram de alguma forma para a realização da presente pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xx</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xxi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Resultados esperados .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Delimitações da pesquisa .....</b>	<b>8</b>
<b>1.5 Hipóteses de trabalho.....</b>	<b>8</b>
<b>1.6 Estrutura da dissertação .....</b>	<b>9</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Propriedades higrotérmicas.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Mecanismos Fundamentais de Transferência de Umidade .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1 Adsorção.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2 Condensação.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.3 Capilaridade.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Modelo teórico de transferência de umidade e calor em meios porosos .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Propriedades físicas e higrotérmicas .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.1 Massa seca .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.2 Massa específica aparente.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.3 Porosidade aberta.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.4 Distribuição do tamanho de poros .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4.5 Cinética de absorção capilar .....</b>	<b>22</b>

2.4.6	Molhabilidade .....	25
2.4.7	Adsorção e dessorção.....	27
2.4.8	Cinética de secagem.....	34
2.4.9	Condutividade térmica .....	36
2.4.9.1	Método da sonda térmica.....	38
2.5	Grau de hidratação das argamassas.....	40
2.6	Ação do aditivo incorporador de ar.....	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	46
3.1	Materiais utilizados .....	46
3.1.1	Cimento.....	46
3.1.2	Cal.....	47
3.1.3	Agregados .....	48
3.1.3.1	Ensaio para a caracterização dos agregados .....	48
3.1.3.2	Areia.....	49
3.1.3.3	Cinza pesada.....	51
3.1.3.4	Composição dos agregados .....	56
3.1.4	Incorporador de ar .....	57
3.1.5	Água .....	58
3.2	Programa experimental .....	58
3.2.1	Produção das argamassas.....	59
3.2.2	Ensaio nas argamassas .....	62
3.2.2.1	Propriedades das argamassas no estado fresco .....	63
3.2.2.2	Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido .....	63
3.2.2.3	Propriedades higrotérmicas das argamassas.....	64
3.2.2.3.1	<i>Secagem da água de cura.....</i>	65
3.2.2.3.2	<i>Absorção de água por imersão.....</i>	65
3.2.2.3.3	<i>Absorção de água por capilaridade .....</i>	66
3.2.2.3.4	<i>Ângulo de molhamento .....</i>	67
3.2.2.3.5	<i>Secagem ao ar.....</i>	67
3.2.2.3.6	<i>Adsorção.....</i>	68

3.2.2.3.7	<i>Condutividade térmica</i> .....	68
3.2.2.4	Grau de hidratação.....	77
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>78</b>
4.1	Propriedades das argamassas no estado fresco.....	78
4.2	Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido .....	80
4.3	Propriedades higrotérmicas das argamassas.....	82
4.3.1	Secagem da água de cura .....	82
4.3.2	Absorção de água por imersão .....	84
4.3.3	Absorção de água por capilaridade .....	86
4.3.4	Ângulo de molhamento aparente .....	94
4.3.5	Secagem ao ar.....	99
4.3.6	Adsorção.....	104
4.3.7	Condutividade térmica .....	108
4.4	Grau de hidratação.....	114
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>117</b>
5.1	Conclusões .....	117
5.2	Sugestões para pesquisas futuras .....	123
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>124</b>
	<b>ANEXO 1: Dados dos ensaio de massa específica aparente</b> .....	<b>132</b>
	<b>ANEXO 2: Dados do ensaio de absorção de água por imersão</b> .....	<b>133</b>
	<b>ANEXO 3: Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade</b> .....	<b>134</b>
	<b>ANEXO 4: Dados do ensaio de ângulo de molhamento aparente</b> .....	<b>146</b>
	<b>ANEXO 5: Dados do ensaio de secagem ao ar</b> .....	<b>150</b>
	<b>ANEXO 6: Dados do ensaio de condutividade térmica</b> .....	<b>151</b>
	<b>ANEXO 7: Análise de variância dos resultados</b> .....	<b>154</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	<b>Fluxo da cinza do carvão mineral no Complexo de Jorge Lacerda.....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 2:</b>	<b>Formação de alvéolos não interligados ao longo dos capilares promovida pelo aditivo .....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 3:</b>	<b>Modos de condensação: água adsorvida e água capilar, respectivamente</b>	<b>11</b>
<b>Figura 4:</b>	<b>Sucessão de modos de condensação em um poro isolado.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 5:</b>	<b>Curva de sucção capilar .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 6:</b>	<b>Diferentes condições de exposição de uma amostra de material poroso ao transporte de água unidirecional .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 7:</b>	<b>Dimensão dos poros/transporte de massa .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 8:</b>	<b>Faixa de aplicação dos principais métodos para caracterização de espaços porosos .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 9:</b>	<b>Influência das condições de limite da amostra.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 10:</b>	<b>Esquemática do ângulo de molhamento .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 11:</b>	<b>Fenômeno da histerese das isotermas de adsorção e dessorção .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 12:</b>	<b>Pontos de transição da isoterma de adsorção .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 13:</b>	<b>Conteúdo de umidade de equilíbrio da areia e das cenosferas.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 14:</b>	<b>Curvas características da secagem de diferentes materiais.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 15:</b>	<b>Conteúdo de umidade em função do tempo de secagem das cenosferas a 23 C e UR=45% .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 16:</b>	<b>Evolução da temperatura na sonda com o tempo.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 17:</b>	<b>Representação de uma molécula de tensoativo aniônico .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 18:</b>	<b>Representação da adsorção da molécula do tensoativo na interface ar /líquido, satisfazendo à sua dupla natureza .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 19:</b>	<b>Representação esquemática dos mecanismos de atuação dos aditivos incorporadores de ar .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 20:</b>	<b>Distribuição granulométrica da areia.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 21:</b>	<b>Vista da coleta de cinza da esteira da Unidade C .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 22:</b>	<b>Distribuição granulométrica da CZP .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 23:</b>	<b>Espectro por energia dispersiva da cinza pesada .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 24:</b>	<b>Difratogramas da cinza pesada de carvão mineral: experimental e simulado pelo método de Rietveld.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 25:</b>	<b>Imagem da cinza pesada obtida no MEV – aumento de 50 vezes .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 26:</b>	<b>Distribuição granulométrica dos agregados das argamassas.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 27:</b>	<b>Infravermelho do incorporador de ar .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 28:</b>	<b>Esquema geral do programa experimental.....</b>	<b>59</b>

<b>Figura 29:</b>	<b>Aparato utilizado no ensaio de retenção de água .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 30:</b>	<b>Aparato utilizado para a determinação da massa específica das amostras .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 31:</b>	<b>Ensaio de absorção de água por imersão .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 32:</b>	<b>Aparato utilizado no ensaio de absorção capilar .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 33:</b>	<b>Aparato experimental do ensaio de adsorção .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 34:</b>	<b>Aparato experimental para determinação da condutividade térmica..</b>	<b>69</b>
<b>Figura 35:</b>	<b>Sonda utilizada para a determinação da condutividade térmica.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 36:</b>	<b>Detalhes da sonda térmica com dimensões dadas em mm.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 37:</b>	<b>Aparato para calibração do termopar.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 38:</b>	<b>Esquema de ligação do termopar .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 39:</b>	<b>Curva de calibração do termopar da sonda.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 40:</b>	<b>Determinação da variação da tensão com a corrente elétrica para um fio com 39 cm de comprimento.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 41:</b>	<b>Aparato utilizado para umedecer as amostras para a calibração da sonda .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 42:</b>	<b>Exemplo de dados brutos obtidos da aquisição para uma amostra de argamassa .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 43:</b>	<b>Exemplo típico da obtenção do coeficiente A para determinação da condutividade térmica .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 44:</b>	<b>Consistência das argamassas .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 45:</b>	<b>Retenção de água das argamassas.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 46:</b>	<b>Massa específica das argamassas no estado fresco .....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 47:</b>	<b>Massa específica aparente das argamassas no estado endurecido.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 48:</b>	<b>Porosidade aberta das argamassas .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 49:</b>	<b>Volume de água de cura perdido por volume de amostra durante a secagem .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 50:</b>	<b>Conteúdo de umidade mássico em função do teor de CZP .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 51:</b>	<b>Curva de água absorvida por imersão em função do tempo .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 52:</b>	<b>Quantidade de água absorvida por imersão em função do tempo.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 53:</b>	<b>Geral: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo .....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 54:</b>	<b>Volume de água absorvida nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 55:</b>	<b>Geral: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 56:</b>	<b>Absorção total de água (72 horas) obtida através de leitura no tubo e medida de massa, respectivamente .....</b>	<b>91</b>

<b>Figura 57:</b>	<b>Variação do volume total de água absorvida em função do teor de cinza pesada .....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 58:</b>	<b>Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo – Determinação da sorptividade.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 59:</b>	<b>Variação do coeficiente de sorptividade em função do teor de cinza pesada .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 60:</b>	<b>Argamassa 0% CZP: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 61:</b>	<b>Argamassa 50% CZP: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 62:</b>	<b>Argamassa 100% CZP: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 63:</b>	<b>Argamassa 0% CZP+IA: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 64:</b>	<b>Argamassa 50% CZP+IA: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 65:</b>	<b>Argamassa 100% CZP+IA: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 66:</b>	<b>Ângulo de molhamento aparente em função do teor de CZP.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 67:</b>	<b>Variação de massa em função do tempo no ensaio de secagem .....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 68:</b>	<b>Conteúdo de umidade mássico em função do tempo.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 69:</b>	<b>Fluxo de secagem em função do conteúdo de umidade mássico .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 70:</b>	<b>Fluxo de secagem em função do tempo.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 71:</b>	<b>Fluxo de absorção de água por capilaridade em função do tempo.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 72:</b>	<b>Curva para determinação dos coeficientes A, B e C do modelo GAB</b>	<b>104</b>
<b>Figura 73:</b>	<b>Ajuste dos dados experimentais das argamassas sem IA ao modelo GAB .....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 74:</b>	<b>Ajuste dos dados experimentais das argamassas com IA ao modelo GAB .....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 75:</b>	<b>Curvas do ajuste através do modelo GAB das diferentes argamassas</b>	<b>107</b>
<b>Figura 76:</b>	<b>Superfície específica das argamassas em função do teor de CZP .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 77:</b>	<b>Condutividade térmica das argamassas em função do conteúdo de umidade mássico .....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 78:</b>	<b>Variação do coeficiente angular da reta que relaciona a condutividade térmica com “W” em função do teor de CZP .....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 79:</b>	<b>Variação do coeficiente angular com a porosidade aberta das argamassas .....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 80:</b>	<b>Coefficiente linear em função do teor de CZP .....</b>	<b>112</b>

<b>Figura 81:</b>	<b>Varição da condutividade térmica com a massa específica aparente das argamassas.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 82:</b>	<b>Varição da condutividade térmica com a porosidade aberta das argamassas .....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 83:</b>	<b>Análise térmica diferencial das argamassas.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 84:</b>	<b>Água quimicamente ligada .....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 85:</b>	<b>Água quimicamente ligada em função do teor de CZP.....</b>	<b>116</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b>	<b>Características dos líquidos molhantes à temperatura de 20°C.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 2:</b>	<b>Diferentes variações de massa durante a análise termogravimétrica...</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 3:</b>	<b>Alteração das propriedades das argamassas por incorporador de ar..</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 4:</b>	<b>Laudo técnico do CP-II-F 32, marca Itambé, lote 06/2001 .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 5:</b>	<b>Laudo técnico da cal CH-III, marca Minercal, lote 05/2002 .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 6:</b>	<b>Caracterização da cal .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 7:</b>	<b>Ensaio realizados para a caracterização dos agregados.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 8:</b>	<b>Análise granulométrica da areia .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 9:</b>	<b>Características da areia .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 10:</b>	<b>Análise granulométrica da cinza pesada .....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 11:</b>	<b>Características da cinza pesada .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 12:</b>	<b>Composição química da cinza pesada.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 13:</b>	<b>Análise granulométrica das composições dos agregados .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabela 14:</b>	<b>Traço das argamassas, em massa.....</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 15:</b>	<b>Traço das argamassas, em volume.....</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 16:</b>	<b>Relação dos materiais em massa e em volume .....</b>	<b>61</b>
<b>Tabela 17:</b>	<b>Propriedades das argamassas e ensaios realizados .....</b>	<b>62</b>
<b>Tabela 18:</b>	<b>Propriedades das argamassas no estado fresco .....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 19:</b>	<b>Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido .....</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 20:</b>	<b>Resultados da secagem da água de cura.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 21:</b>	<b>Resultados do ensaio de absorção de água por imersão .....</b>	<b>85</b>
<b>Tabela 22:</b>	<b>Valores médios obtidos no ensaio de absorção de água para as argamassas SEM IA .....</b>	<b>87</b>
<b>Tabela 23:</b>	<b>Valores médios obtidos no ensaio de absorção de água para as argamassas COM IA .....</b>	<b>87</b>
<b>Tabela 24:</b>	<b>Ocorrência do fenômeno de evaporação de água no ensaio de absorção de água por capilaridade.....</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 25:</b>	<b>Coefficiente de sorptividade (S) das argamassas .....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 26:</b>	<b>Dados para determinação do ângulo de molhamento aparente das argamassas sem IA .....</b>	<b>94</b>
<b>Tabela 27:</b>	<b>Dados para determinação do ângulo de molhamento aparente das argamassas com IA.....</b>	<b>94</b>
<b>Tabela 28:</b>	<b>Estoques de líquido infiltrado e ângulo de molhamento aparente.....</b>	<b>98</b>
<b>Tabela 29:</b>	<b>Varição de massa, fluxo de secagem e conteúdo de umidade mássico em função do tempo das argamassas sem IA.....</b>	<b>99</b>

<b>Tabela 30:</b>	<b>Varição de massa, fluxo de secagem e conteúdo de umidade mássico em função do tempo das argamassas com IA .....</b>	<b>100</b>
<b>Tabela 31:</b>	<b>Conteúdo de umidade mássico em função da umidade relativa .....</b>	<b>104</b>
<b>Tabela 32:</b>	<b>Raio crítico em função da umidade relativa (T=50°C).....</b>	<b>106</b>
<b>Tabela 33:</b>	<b>Coefficientes, parâmetros e superfície específica determinados através do modelo GAB.....</b>	<b>107</b>
<b>Tabela 34:</b>	<b>Condutividade térmica em função do conteúdo de umidade mássico das argamassas sem IA .....</b>	<b>109</b>
<b>Tabela 35:</b>	<b>Condutividade térmica em função do conteúdo de umidade mássico das argamassas com IA.....</b>	<b>109</b>
<b>Tabela 36:</b>	<b>Dados da reta que relaciona a condutividade térmica com o conteúdo de umidade .....</b>	<b>110</b>
<b>Tabela 37:</b>	<b>Perda de massa ao fogo total e a atribuída a água quimicamente ligada .....</b>	<b>115</b>
<b>Tabela 38:</b>	<b>Resumo dos parâmetros que influem significativamente nas propriedades das argamassas e seus efeitos .....</b>	<b>118</b>

## LISTA DE ABREVIações

0%CZP	Argamassa com 0% de cinza pesada em substituição a areia
0%CZP+IA	Argamassa com 0% de cinza pesada em substituição a areia e com aditivo incorporador de ar
100%CZP	Argamassa com 100% de cinza pesada em substituição a areia
100%CZP+IA	Argamassa com 100% de cinza pesada em substituição a areia e com aditivo incorporador de ar
50%CZP	Argamassa com 50% de cinza pesada em substituição a areia
50%CZP+IA	Argamassa com 50% de cinza pesada em substituição a areia e com aditivo incorporador de ar
a/c	Relação a/c
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Modelo desenvolvido por Brunauer, Emmet e Teller em 1938
BJH	Modelo desenvolvido por Barret, Joyner Halenda em 1951
BJH	Modelo desenvolvido por Barret, Joyner Halenda para a adsorção
CASAN	Companhia de Saneamento
CSTC	Centre Scientifique et Technique de la Construction
CV	Coefficiente de variação
CZP	Cinza pesada
DOE	Department of Energy
EDX	Espectometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva
GAB	Modelo desenvolvido por Guggenheim, Anderson e De Boer
HP	Hewlett-Packard
IA	Aditivo incorporador de ar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IRC	Institute for Research Construction
JL.CZPCE	Cinza pesada oriunda da Unidade C da Usina de Jorge Lacerda e coletada na esteira
MEWS	Moisture Management for Exterior Walls
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NBR	Norma Brasileira de Referência
NF	Norme Française
NMR	Ressonância Nuclear Magnética
NRCC	National Research Council of Canada
$R^2$	Coefficiente de correlação
RILEM	Réunion International des Laboratoires D'Essais et Matériaux
SC	Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ValoRes	Valorização de Sub-Produtos Industriais e Desenvolvimento de Novos Materiais na Construção Civil

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{J}_{ic}$	Densidade de fluxo de massa transportada por convecção
$\vec{J}_{id}$	Densidade de fluxo de massa transportada por difusão
$\vec{J}_q$	Densidade de fluxo de calor transportado por condução
$\theta$	Teor de umidade
$I_i$	Termo traduzindo a condensação – evaporação
$h_i, h_s$	Entalpias mássicas
$\vec{J}_v$	Fluxo de vapor (kg/m <sup>2</sup> .s)
$D_{atm}$	Coefficiente de difusividade molecular livre do vapor de água no ar (m <sup>2</sup> /s)
$\nu$	Coefficiente de difusão do vapor no ar
$\tau$	Fator de tortuosidade do meio
$p_v$	Pressão parcial do vapor
$\sigma$	Tensão superficial água-ar (N/m)
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido (Nxs/m <sup>2</sup> )
$\mu_a$	Viscosidade dinâmica da água
$\mu_{al}$	Viscosidade dinâmica do álcool
$\sigma_{al}$	Tensão superficial álcool-ar
$A$	Área da seção transversal do corpo-de-prova
$A'$	Inclinação da reta que relaciona a temperatura com o logaritmo neperiano do tempo entre os instantes $t_1$ e $t_2$
$A_m$	Área de recobrimento de uma molécula adsorvida – para água $A_m = 10,5 (\text{Å})^2$ .
$C$	Calor específico (J/kg.K)
$c'$	Constante de GAB
$D$	Diâmetro do poro (m)

$E_1$	Calor de adsorção da primeira camada de moléculas ( $\text{j.mol}^{-1}$ )
$e_a$	Espessura da camada de água adsorvida ( $\text{Å}$ )
$E_l$	Calor latente de vaporização do adsorbato ( $\text{j.mol}^{-1}$ )
$E_m$	Calor de adsorção das multicamadas ( $\text{j.mol}^{-1}$ )
$g$	Aceleração da gravidade ( $\text{m x s}^{-2}$ )
$h$	Umidade relativa
$H$	Altura da mancha capilar (cm)
$i$	Intensidade da corrente elétrica (A)
$K$	Permeabilidade intrínseca ( $\text{m}^2$ )
$k$	Coefficiente de capilaridade
$k'$	Parâmetro GAB
$M$	Massa molecular da água (g/mol)
$m$	Massa
$m_h$	Massa úmida
$m_s$	Massa seca
$n$	Porosidade aberta
$N$	Número de camadas adsorvidas
$N_{\text{AVG}}$	Número de avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$ )
$P$	Pressão ( $\text{N/m}^2$ )
$P_c$	Pressão capilar ( $\text{N/m}^2$ )
$p_h$	Pressão de equilíbrio ( $\text{N/m}^2$ )
$Q$	Potência emitida por unidade de comprimento (W/m)
$Q''$	Fluxo de calor (J/s)
$Q_l$	Fluxo de líquido ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$R$	Constante universal dos gases ( $\text{J/mol x K}$ )
$r$	Raio do poro (m)

$r_c$	Raio crítico (m)
$R_m$	Resistência elétrica por unidade de comprimento ( $\Omega/m$ )
$R_x$	Raios de curvatura principal (m)
$s$	Geração de calor por unidade de volume ( $W/m^3$ )
$S$	Sorptividade ( $cm^3/cm^2 \times min^{1/2}$ )
$S_a$	Inclinação da reta que relaciona o estoque de água infiltrado com a raiz do tempo
$S_{al}$	Inclinação da reta que relaciona o estoque de álcool infiltrado com a raiz do tempo
$S_e$	Superfície específica ( $m^2/g$ )
$St$	Estoque de líquido infiltrado (cm)
$S(r)$	Superfície acumulada dos poros com raio maior que $r$ ( $m^2/m^3$ )
$S_w$	Grau de saturação
$T$	Temperatura
$t$	Tempo
$T_s$	Temperatura na sonda em função do tempo ( $^{\circ}C$ )
$UR$	Umidade relativa (%)
$V_m$	Volume molar do adsorvato
$V_w$	Volume de água absorvido por capilaridade ( $cm^3$ )
$W$	Conteúdo de umidade mássico (%)
$W_m$	Conteúdo de umidade mássico correspondente a formação de uma camada molecular sobre a parede do poro ( $Kg/Kg$ )
$W_{sat}$	Conteúdo de umidade mássico na saturação
$X$	Volume do líquido absorvido por área da seção transversal do corpo-de-prova ( $cm^3/cm^2$ )
$\alpha$	Ângulo de contacto entre a água e a superfície do poro ou ângulo de molhamento aparente
$\Delta P/L$	Pressão hidráulica ( $N/m^3$ )
$\eta$	coeficiente de viscosidade dinâmica [ $N.s/m^2$ ]

$\lambda$	Condutividade térmica (W/m.K)
$\rho_l$	Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	Massa específica aparente do material seco
$\psi$	Sucção capilar (m.c.a)

## RESUMO

As propriedades higrotérmicas são as propriedades relacionadas com a transferência de calor e umidade, e revestem-se da maior importância para a caracterização do comportamento das argamassas notoriamente no que se refere à durabilidade, à estanqueidade, à degradação de aspecto e ao desempenho térmico. No entanto, as pesquisas que abordam propriedades relacionados aos mecanismos de transferência de umidade e calor apresentam resultados válidos apenas para argamassas convencionais. Em contrapartida, o uso de resíduos sólidos industriais e o emprego de aditivos têm sido cada vez mais intenso na construção civil. Dentre os resíduos industriais gerados na região sul do Brasil destacam-se as cinzas pesadas provenientes da combustão do carvão mineral, devido a sua grande disponibilidade e a sua característica peculiar de apresentar conteúdo de umidade de equilíbrio bastante superior ao da areia em função da sua natureza porosa. Já tratando-se de aditivos merece destaque o aditivo incorporador de ar em função de atuar na formação de alvéolos não interligados ao longo dos capilares e promover a redução da massa específica aparente. Assim sendo, a presente pesquisa avalia as propriedades higrotérmicas não somente de argamassas convencionais, mas também de argamassas confeccionadas com cinzas pesadas em substituição ao agregado natural e com aditivo incorporador de ar. Foram avaliadas as propriedades higrotérmicas das argamassas: absorção de água por imersão e por capilaridade, secagem ao ar, isotermas de adsorção, ângulo de molhamento aparente e condutividade térmica em função do conteúdo de umidade. Os resultados mostram que o teor de cinza pesada e o emprego de aditivo incorporador de ar são parâmetros que afetam significativamente as propriedades higrotérmicas. Mostram ainda que o emprego conjunto da cinza pesada e do incorporador de ar é bastante interessante, pois em certas propriedades, como por exemplo, a absorção de água por capilaridade, a adsorção de água para umidades relativas elevadas, o tempo necessário para a secagem e a porosidade aberta, a cinza pesada provoca um aumento indesejado, que é minimizado através do emprego do aditivo.

**Palavras-chave:** argamassa, cinza pesada, incorporador de ar, umidade, propriedades higrotérmicas.

## ABSTRACT

The hygrothermal properties are heat and moisture transfer related properties and have great importance for the characterization of the behavior of mortars in that if it related to durability, waterproofing, degradation and the thermal performance. However, the researches that deal with properties related to the mechanisms of heat and moisture transfer present applicable results only for conventional mortars. On the other hand, the use of industrial solid residues and admixtures increase in the civil construction activities. The bottom ash from thermoelectric power station is a residue that has great availability in the south region of Brazil and its equilibrium moisture content is higher than that of sand, reflecting its porous. In mortars, in relation to the admixture to cement-based materials, air-entraining agent deserves prominence because it increase the disconnection of the capillary network and decrease the specific gravity. Thus, the present research evaluates of the hygrothermal properties of not only conventional mortars, but also of mortars with natural sand replaced by bottom ashes and with air-entraining agent. The evaluated hygrothermal properties had been: water absorption by immersion, water absorption by capillarity, air drying, water vapor sorption isotherms, apparent wetting angle and thermal conductivity as a function of moisture content. The results show that the percentage of bottom ash and the air-entraining agent are parameters that significantly affect the hygrothermal properties. It also shows that the use of bottom ash and air-entraining agent together is very interesting, because in some properties, for example, water absorption by capillarity, water vapor sorption for higher humidity, time to dry and open porosity, bottom ash causes an undesirable increase that is minimized through the use of air-entraining agent.

**Keywords:** mortar, bottom ash, air-entraining, moisture, hygrothermal properties.

# 1 INTRODUÇÃO

As propriedades higrotérmicas são as propriedades relacionadas com a transferência de calor e umidade, sendo que o estudo destes mecanismos de transferência reveste-se da maior importância para a caracterização do comportamento dos materiais de construção. Notoriamente no que se refere à durabilidade, à estanqueidade, à degradação de aspecto e ao desempenho térmico.

Baroghel et al. (1999) comentam que as transferências de umidade ocorrem durante a vida inteira dos materiais. No caso mais simples, ocorre com o processo de secagem do material, quando é submetido a um ambiente cuja umidade relativa é mais baixa do que sua umidade interna, sendo que este fenômeno afeta a zona de superfície de muitas estruturas de engenharia civil. Além disso, estes processos são combinados freqüentemente com outros processos maciços de transporte ou com as reações químicas que ocorrem em condições não saturadas, tais como a carbonatação e a penetração de agentes agressivos. Todos estes fatos indicam a necessidade de compreender perfeitamente e poder simular transferências da umidade.

Tratando-se de argamassa, devido à sua estrutura porosa, quando exposta às condições climáticas é capaz de fixar e transferir umidade tanto na fase líquida como na fase de vapor. A umidade na forma de vapor, é fixada nos poros da argamassa através dos processos de adsorção física e condensação capilar. Em condições isotérmicas, a água fixada é transportada para o interior do material através de mecanismos que dependem principalmente das dimensões do poro e da umidade relativa. Na fase líquida a água é transferida para o interior do material predominantemente pelo processo denominado de capilaridade, situação que ocorre por exemplo, quando um material está sujeito à infiltração de água do solo, exposto a prolongados períodos de chuva ou mesmo em condições de uso específicas como é o caso de sistemas de armazenamento de água.

Ainda no que concerne aos mecanismos de transferência de umidade e calor, Kumaran et al. (2004) ressaltam a importância dos modelos computacionais higrotérmicos, mencionando que com o advento de computadores cada vez mais poderosos é possível construir tanto modelos físicos como experimentais, sendo que recentemente muitos modelos têm sido desenvolvidos por investigadores da área de análises higrotérmicas. No entanto, todos estes modelos requerem uma grande confiabilidade dos dados de entrada para que se obtenha resultados significativos. Entre estas entradas estão incluídas as propriedades dos materiais de construção, tais como: porosidade, massa específica, condutividade térmica, conteúdo de umidade de equilíbrio, permeabilidade ao vapor de água, coeficiente de absorção de água, difusividade de umidade e permeabilidade ao ar.

Atualmente os valores mais usados para estas propriedades são os divulgados em Kumaran (1996), sendo que estes fazem parte de um anexo da “International Energy Agency” (IEA). Porém, como os materiais de construção evoluem há uma necessidade de atualizar continuamente as informações sobre suas propriedades higrotérmicas.

Dentro deste contexto tem-se o seguinte histórico de estudos de transferência de umidade e calor em meios porosos:

- Van der Kooi (1971) estudou a migração de umidade em função de gradientes de conteúdo de umidade e temperatura no concreto celular;
- Perrin (1985) estudou a transferência de umidade no tijolo terracota e em uma argamassa de cimento;
- Daian (1986) realizou um estudo experimental em uma argamassa de cimento;
- Merouani (1987) fez a comparação entre uma argamassa comum e uma argamassa com aditivos impermeabilizantes utilizada no revestimento de fachadas, sendo que as diferenças do comportamento hídrico entre estes dois materiais são explicadas com base na estrutura porosa;
- Fernandes (1990) realizou estudo experimental em uma argamassa de cal e cimento;
- Freitas, Abrantes, Crausse (1996) estudaram a transferência de umidade em paredes de edifício analisando o fenômeno de interface entre a argamassa e o bloco de concreto;

- Kumaran et al. (2002) através de um projeto chamado MEWS (“Moisture Management for Exterior Walls”) que foi concluído recentemente no “Institute for Research Construction” (IRC) pertencente ao “National Research Council of Canada” (NRCC) determinaram as propriedades higrotérmicas de mais de 70 materiais de construção atualmente utilizados no Canadá e nos Estados Unidos, dos quais fazem parte as argamassas de cimento, cal e areia;

- DOE (“Department of Energy”) (2004) pertencente aos Estados Unidos vem realizando medições das propriedades higrotérmicas de amostras de materiais de construção estocadas por um longo período de tempo e em condições ambientais controladas. O objetivo do DOE é desenvolver um laboratório mundial com capacidade de medir as propriedades higrotérmicas de materiais de construção requeridas na modelagem do transporte de umidade em edificações. As propriedades a serem medidas incluem a capacidade da umidade em função da temperatura e da umidade relativa (isotermas de adsorção e dessorção), permeabilidade ao vapor de água, difusividade de água, absorção de água e distribuições de umidade.

- Paes (2004) realizou a avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação, sendo que para isto foi desenvolvida instrumentação para monitoramento da umidade.

Como verifica-se através dos estudos anteriormente mencionados, as pesquisas que abordam requisitos de desempenho relacionados aos mecanismos de transferência de umidade em argamassas apresentam resultados válidos apenas para argamassas convencionais. Consequentemente, para argamassas obtidas através de materiais não convencionais não tem-se informações referentes as propriedades higrotérmicas.

No entanto, o uso de resíduos sólidos industriais e aditivos têm sido cada vez mais intenso na construção civil em virtude destes, muitas vezes, possibilitarem ganhos de ordem econômica, ambiental e tecnológica.

Dentre os resíduos industriais gerados na região sul do Brasil destacam-se as cinzas pesadas provenientes da combustão do carvão mineral, pois nesta região estão situadas as principais jazidas carboníferas do país e o maior parque termelétrico da América Latina.

Já tratando-se de aditivos merece destaque o incorporador de ar em função deste atuar na formação de alvéolos não interligados ao longo dos capilares e promover a redução da massa específica.

Assim sendo, a presente pesquisa apresenta como proposta avaliar as propriedades higrotérmicas não somente de argamassas convencionais, mas também em argamassas confeccionadas com cinzas pesadas em substituição ao agregado natural e/ou com o emprego de aditivo incorporador de ar.

Foram confeccionadas argamassas com três teores diferentes de substituição, em volume, de areia por cinza pesada que são 0, 50 e 100%. Para cada um destes teores foram confeccionadas uma série de argamassas contendo aditivo e outra sem aditivo incorporador de ar.

Para cada uma destas séries de argamassas foram avaliadas as seguintes propriedades higrotérmicas: absorção de água por imersão e por capilaridade, secagem ao ar, adsorção, ângulo de molhamento aparente e condutividade térmica.

A importância deste estudo pode ser atribuída ao fato de não ser conhecido o efeito das cinzas e do aditivo incorporador de ar nos mecanismos de transferência de umidade e calor nas argamassas, sendo que o conhecimento destes é indispensável já que afetam a durabilidade, a impermeabilidade, a degradação e o desempenho térmico dos materiais.

## **1.1 Justificativa**

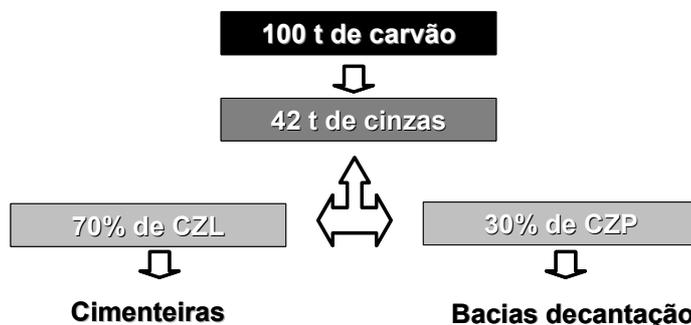
A disposição de resíduos, principalmente em regiões com produção industrial, é um problema de complexidade crescente, que oferece elevados custos e expõe o meio ambiente a riscos de contaminação pela concentração de um grande número de substâncias potencialmente nocivas em um mesmo local (HADDAD; ANUATI; LOPES, 1997).

Dentre os resíduos industriais gerados merecem destaque às cinzas provenientes da combustão do carvão mineral, já que na região sul do Brasil estão localizadas as principais jazidas carboníferas do país e um parque termelétrico com 846MWde potência instalada.

Segundo Cheriaf & Rocha (1997) no Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo (SC), são geradas anualmente 818 mil toneladas de cinzas. Sendo que destas 70% são cinzas leves, que são extraídas por via seca, e 30% são cinzas pesadas, que são extraídas por via úmida.

A cinza leve produzida no Complexo de Jorge Lacerda tem sido aproveitada pela cadeia produtiva do cimento, enquanto que para a cinza pesada a comercialização é inexistente sendo então depositada em bacias de decantação que despendem grandes áreas.

O fluxo da cinza do carvão mineral proveniente do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda anteriormente comentado está sintetizado na *Figura 1*.



**Figura 1: Fluxo da cinza do carvão mineral no Complexo de Jorge Lacerda**

Em contrapartida ao problema da inexistência de emprego das cinzas pesadas resultantes da queima do carvão temos que a construção civil demanda grande volume de recursos naturais para a produção dos materiais e processos produtivos, sendo muitos deles não renováveis e passíveis de esgotamento. E que no Brasil em função do déficit habitacional ser segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2000) de 6 milhões, acredita-se que em virtude da necessidade de sanar este déficit serão consumidas grandes quantidades de recursos para a produção de materiais.

Mediante a esta problemática Haddad; Anuati; Lopes (1997) mencionam que a incorporação dos resíduos na construção habitacional, desde que tomadas às devidas medidas de controle dos riscos à saúde, tanto dos trabalhadores envolvidos na sua produção quanto dos usuários finais, inertiza estes elementos nocivos, evitando o contato direto de tais produtos com a água, eliminando quase que totalmente os riscos de contaminação.

Seguindo esta proposta, trabalhos realizados a nível nacional por Andrade (2004), Santos et al. (2003); Mustelier (2002), Kreuz (2002), Margon (2001), Lenzi (2000), Pozzobon (1999) e por Piazza; Rui (1999) propõem o emprego da cinza pesada em substituição a areia quartzosa para a confecção de argamassas ou concretos.

Trabalhos internacionais realizados por Kula et al. (2002), Malhotra; Valimbe; Wright (2002), Hanerara et al (2001), Pandey; Sharma (2000), Ranganath; Bhattacharjee; Krishnamoorthy (1998) e Manz (1997) tratam a respeito do emprego de cinzas em bases ou materiais cimentícios.

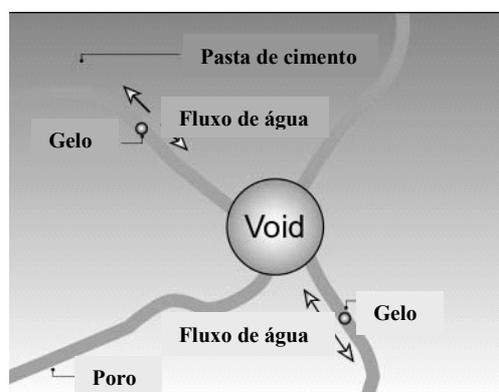
Dentre estes trabalhos os que se referem ao emprego da cinza pesada em substituição parcial ou total do agregado natural em argamassas apresentam resultados satisfatórios no que diz respeito às propriedades no estado fresco e endurecido, porém não são realizados estudos suficientes referentes ao comportamento higrotérmico.

No entanto, o conhecimento do comportamento higrotérmico dos materiais que compõem a alvenaria é importante para o estabelecimento de estratégias que minorem os problemas de degradação desses materiais, além de melhorar as condições de conforto e higiene aos usuários da habitação.

Além disso, a determinação das propriedades higrotérmicas é fundamental para que se possa prever a durabilidade das argamassas confeccionadas com ou sem cinza pesada por meio de modelos computacionais disponibilizados por diversos pesquisadores.

O interesse em trabalhar-se com as cinzas da queima de carvão mineral deve-se ao fato do conteúdo de umidade de equilíbrio destas ser bastante superior ao da areia em função da sua natureza porosa. Assim sendo, deve ser investigada a influência da porosidade das cinzas no comportamento hídrico do material polifásico que é a argamassa.

Ainda tem-se que, quando aborda-se o emprego de resíduos em argamassas deve-se buscar o emprego de aditivos para sanar eventuais deficiências nas propriedades destas. Dentro deste contexto e mediante o uso corrente de aditivos em argamassas industrializadas realizou-se também a avaliação do efeito do aditivo incorporador de ar nas propriedades higrotérmicas das argamassas estudadas. A escolha deste tipo de aditivo deve-se ao fato deste alterar significativamente a estrutura porosa através da formação de alvéolos não interligados ao longo dos capilares e a massa específica dos materiais cimentícios, conforme esquematizado na *Figura 2*.



**Figura 2: Formação de alvéolos não interligados ao longo dos capilares promovida pelo aditivo**

Fonte: adaptado de MONTEIRO (2005)

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

A pesquisa tem como objetivo avaliar as propriedades higrotérmicas das argamassas contendo ou não cinzas pesadas oriundas da queima do carvão em substituição ao agregado natural, bem como com ou sem emprego de aditivo incorporador de ar.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Avaliar o efeito do teor de cinza pesada em substituição a areia natural no comportamento higrotérmico das argamassas;
- Avaliar o efeito do aditivo incorporador de ar no comportamento higrotérmico das argamassas para um mesmo teor de CZP;
- Avaliar a possível ação combinada do aditivo incorporador de ar e do teor de cinza pesada nas propriedades higrotérmicas das argamassas;
- Identificar para cada propriedade higrotérmica quais dos parâmetros possuem ação mais significativa: teor de cinza pesada ou emprego de incorporador de ar;
- A partir dos resultados dos estudos experimentais realizar considerações a respeito da estrutura porosa com base nos resultados obtidos para as propriedades higrotérmicas;
- Montar bancadas experimentais para avaliação da capilaridade, da condutividade térmica e da adsorção de argamassas.

## **1.3 Resultados esperados**

Os resultados esperados são:

- obter dados com boa confiabilidade e reprodutibilidade das propriedades higrotérmicas das argamassas;
- comprovar que o teor de cinza pesada é um parâmetro que afeta significativamente as propriedades higrotérmicas das argamassas;
- comprovar que o emprego de aditivo incorporador de ar é um parâmetro que afeta significativamente as propriedades higrotérmicas das argamassas;

- comprovar a existência de inter-relações entre os parâmetros teor de cinza pesada e emprego de aditivo incorporador de ar nas propriedades higrotérmicas;
- verificar o comportamento higrotérmico satisfatório das argamassas confeccionadas com cinzas em substituição ao agregado natural;
- verificar o comportamento higrotérmico satisfatório das argamassas confeccionadas com aditivo incorporador de ar;
- contribuir de um modo geral para a pesquisa relacionada ao comportamento higrotérmico dos materiais de construção civil.

#### **1.4 Delimitações da pesquisa**

Este estudo limitar-se-á às características dos lotes de materiais utilizados (cimento, areia, cal, aditivo), de forma especial às características da cinza pesada empregada, pois segundo Rocha et al. (1999) as cinzas apresentam características variáveis em função da composição, grau de moagem e beneficiamento do carvão; tipo, projeto e operação da caldeira; e do sistema e local empregado para a extração e manuseio das cinzas.

Além disso, a determinação de algumas das propriedades higrotérmicas das argamassas serão dadas em função de um intervalo de tempo pré-estabelecido, em virtude de limitações temporais.

#### **1.5 Hipóteses de trabalho**

As seguintes hipóteses foram levantadas na elaboração desta pesquisa:

- o emprego do aditivo incorporador de ar e da cinza pesada afetam significativamente as propriedades higrotérmicas das argamassas;
- o uso de cinzas pesadas em substituição à areia natural conduz a argamassas com maiores teores de umidade de equilíbrio e melhor comportamento higrotérmicas;
- a fixação e perda de água das cinzas afetam as características de molhagem e secagem das argamassas produzidas com estas;
- o efeito do incorporador de ar não é afetado pelo emprego de cinzas pesadas em substituição ao agregado natural.

## 1.6 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Análise dos Resultados e Considerações Finais, além destes fazem parte as Referências Bibliográficas e os Anexos.

Na Introdução, além da introdução do tema de trabalho que é: “Avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas e com o incorporador de ar”, são apresentados a justificativa, os objetivos, as hipóteses, os resultados esperados e as delimitações da pesquisa.

A Revisão Bibliográfica aborda os mecanismos de transferência de umidade (adsorção, condensação e capilaridade), o modelo teórico de transferência de umidade e calor proposto por Philip-De Vries, as propriedades físicas de interesse (massa específica aparente, porosidade aberta e distribuição do tamanho de poros) e as propriedades higrotérmicas de interesse (molhabilidade, adsorção e dessorção, cinética de absorção, cinética de secagem e condutividade térmica).

O capítulo denominado Materiais e Métodos apresenta as características dos materiais utilizados na confecção das argamassas que são: cimento, cal hidratada, areia, cinza pesada, aditivo e água, além de descrever o traço e os procedimentos empregados para a determinação das propriedades das argamassas.

No capítulo referente a Análise dos Resultados são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas sendo que estes estão divididos em propriedades no estado fresco, propriedades físicas no estado endurecido e propriedades higrotérmicas. Além disso, como sugerido pelo nome do capítulo, é apresentada a análise dos resultados.

O último capítulo que é o denominado de Considerações Finais apresenta as principais conclusões obtidas através da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros que também visem abordar aspectos relacionados com a transferência de calor e umidade em materiais cimentícios.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Propriedades higrotérmicas**

As propriedades higrotérmicas são as propriedades relacionadas com a transferência de umidade e calor, sendo que a compreensão destas é o primeiro passo para evitar-se danos provocados pela presença de umidade e deficiências energéticas nas construções.

A utilização destas propriedades como dados de entrada de modelos computacionais de transferência de calor e umidade permite realizar a predição do comportamento higrotérmico de paredes de edificações com várias camadas quando submetidas a qualquer tipo de condição de exposição.

Em virtude da importância da realização da predição do comportamento higrotérmico de materiais de construção, o IRC (Canadá) em parceria com o NIST (“National Institute of Standards and Technology”), e o DOE (USA) têm realizado esforços para o levantamento das propriedades higrotérmicas.

Destas propriedades tem-se que as mais usualmente abordadas, de acordo com o levantado na bibliografia pertinente, são: adsorção e dessorção, permeabilidade ao vapor de água, difusividade hídrica, condutividade térmica, calor específico, permeabilidade ao ar e sorptividade. Tendo-se propriedades físicas relevantes: massa específica aparente, porosidade aberta e distribuição do tamanho de poros.

### **2.2 Mecanismos Fundamentais de Transferência de Umidade**

Os mecanismos que regem o transporte de umidade em materiais de construção são complexos e atuam simultaneamente (CSTC, 1982 apud FREITAS):

- na fase vapor: a difusão e os movimentos convectivos no interior dos poros condicionam o transporte;
- na fase líquida: a capilaridade, a gravidade e o efeito dos gradientes de pressão externa comandam a transferência de umidade.

Sintetizando, do ponto de vista físico pode-se considerar que há três mecanismos fundamentais de fixação de umidade: adsorção, condensação e capilaridade.

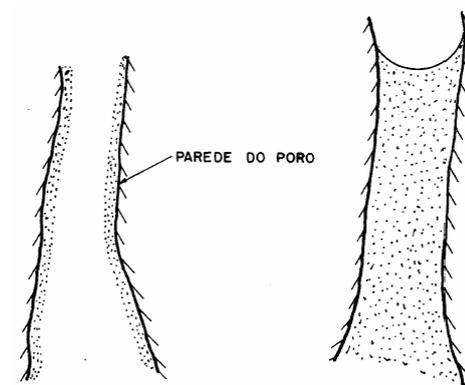
### 2.2.1 Adsorção

O fenômeno de adsorção abordado na presente pesquisa consiste no processo físico de ligação ou retenção de moléculas na superfície de partículas sólidas regido pelas forças de Van der Waals.

Como efeito macroscópico desta adsorção tem-se que um material poroso varia o seu conteúdo de umidade em função de uma variação da umidade relativa. Quando há um aumento do conteúdo de umidade do material trata-se do fenômeno de adsorção, quando ocorre a diminuição trata-se do fenômeno de dessorção.

### 2.2.2 Condensação

Existem dois modos de condensação da água que são: água adsorvida e água capilar que estão ilustrados na *Figura 3*.



**Figura 3: Modos de condensação: água adsorvida e água capilar, respectivamente**

Fonte: FERNANDES (1990)

A água adsorvida é composta por camadas de moléculas que condensam sobre a superfície dos poros. Sua quantidade no equilíbrio é função da superfície específica do meio poroso, da afinidade entre o vapor de água e a matriz sólida e as condições higrotérmicas reinantes.

A água capilar representa uma fase contínua de líquido que preenche totalmente certos poros do material. Existe uma descontinuidade de pressão na interface da curva que separa a água capilar da fase sólida.

De acordo com a lei de Kelvin-Laplace, a condensação capilar ocorre nos poros de raios menores que o raio crítico, cujo valor é calculado pela seguinte equação (DAN et al.,1988):

$$r_c = - \frac{2 \times M \times \sigma \times \cos \alpha}{\rho_l \times R \times T \times \ln(UR)} \quad [2.1]$$

onde:

$r_c$  é o raio crítico (m);

$M$  é a massa molecular da água (g/mol);

$\sigma$  é a tensão superficial da água (N/m);

$\alpha$  é o ângulo de contacto entre a água e a superfície do poro (rad);

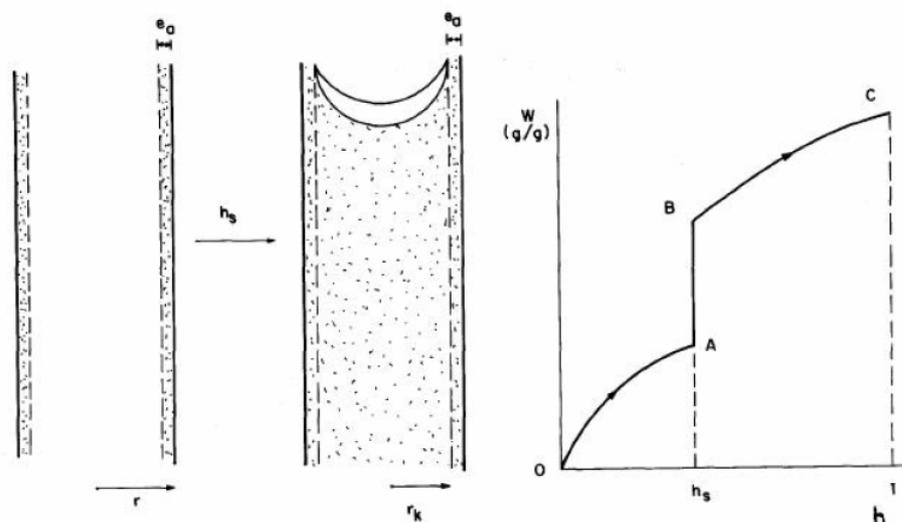
$\rho_l$  é a densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);

$R$  é a constante universal dos gases (J/(mol x K));

$T$  é a temperatura (K);

$UR$  é a umidade relativa ( $0 < UR < 1$ ).

Para explicar esta sucessão dos dois modos de condensação: por capilaridade e por adsorção, considera-se um poro isolado cilíndrico e com perfeita molhabilidade conforme esquematizado na *Figura 4*. Nesta figura  $r$  é o raio do poro,  $r_k$  é o raio do núcleo do centro do poro considerando a camada adsorvida,  $e_a$  é a espessura da camada adsorvida,  $W$  é o conteúdo de umidade mássico,  $h$  é a umidade relativa e  $h_s$  é a umidade limite na qual ocorre a condensação capilar.



**Figura 4: Sucessão de modos de condensação em um poro isolado**

Fonte: FERNANDES (1990)

Na *Figura 4* tem-se que: partindo-se da umidade ( $h$ ) nula (ponto O) e aumentando-a progressivamente, os fenômenos ocorrerão como segue:

- do aumento da umidade de O até A há um aumento da camada adsorvida;
- em A, a espessura da camada adsorvida ( $e_a$ ) é tal, que o núcleo no centro do poro de raio  $r_k$  é capaz de conter um menisco esférico, ou seja, ocorre a condensação capilar.
- de B até C ocorre o aplainamento do menisco;
- em C, o menisco é plano e o poro está saturado ( $h=1$ ).

Fernandes (1990) através da análise destes dois modos de condensação em argamassas verificou que a presença de poros com dimensões tais que permitam a condensação capilar a partir de valores médios de umidade relativa, implicam em um aumento sensível do conteúdo de umidade, conferindo à argamassa uma grande capacidade de retenção de água no estado endurecido.

Para separar quantitativamente a água adsorvida da água capilar que compõe o conteúdo total a uma dada umidade relativa foi desenvolvido o modelo BJH (Barret, E.P., Joyner, L.G. e Halenda, P.P). Este modelo considera um meio poroso constituído de poros cilíndricos onde são adotadas as seguintes hipóteses:

- não existem formações do tipo de garganta, o meio poroso é assumido como um feixe de poros cilíndricos de raios variados, não existindo conexão entre eles;
- existe concordância tangencial das interfaces capilares com a camada adsorvida no limite da condensação capilar.

Assim sendo, se o meio poroso é submetido a um incremento de umidade ( $h+\Delta h$ ) tem-se uma classe de raios  $r$  a  $r+\Delta r$  que se preencherá com água capilar. Assim sendo, existirá no interior do poro um núcleo com raio  $r-e_a$  capaz de conter um poro capilar com umidade relativa  $h+\Delta h$ . Os poros com raio superior a essa classe terão apenas um aumento na camada adsorvida, pois  $h+\Delta h$  não é suficiente para provocar a condensação capilar.

Desta maneira, o conteúdo total de água associado a um incremento de  $\Delta h$  é:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{cap} + \Delta\theta_{abs} = \frac{\Delta S_r}{2} \times (r - e_a) + S(r) \times \Delta e_a \quad [2.2]$$

onde:

$\Delta S_r$  é superfície lateral desta classe de poros ( $m^2/m^3$ );

$e_a$  é a espessura da camada de água adsorvida ( $\text{Å}$ );

$S(r)$  é a superfície acumulada dos poros com raio maior do que  $r$  ( $m^2/m^3$ );

Este modelo foi utilizado por Fernandes (1990) para a investigação do espectro poroso de raios menores que 240 Å através do cálculo das superfícies acumuladas de poros através da seguinte equação:

$$\Delta S_r = \frac{2}{r - e_a} \times [\Delta \theta - S(r) \times \Delta e_a] \quad [2.3]$$

### 2.2.3 Capilaridade

A ação capilar dos líquidos se deve à tendência dos líquidos de subir pelas paredes de tubos capilares (tubos muito finos) e é uma consequência da tensão superficial.

O fenômeno da capilaridade gera interfaces curvas entre o fluido (água) e o ar contido no interior dos poros. Na interface líquido-gás estabelece-se um gradiente de pressões designado por pressão capilar que é função da tensão superficial líquido-ar ( $\sigma$ ), dos raios de curvatura principal ( $R_x$ ) e do ângulo de molhamento ( $\alpha$ ). Logo a pressão capilar é função da temperatura e da umidade, dado que  $\sigma$  varia com a temperatura e  $R_x$  com o teor de umidade conforme apresentado pela seguinte equação:

$$P_c = P_{ar} - P_{\text{água}} = \sigma \times \cos \alpha \times \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad [2.4]$$

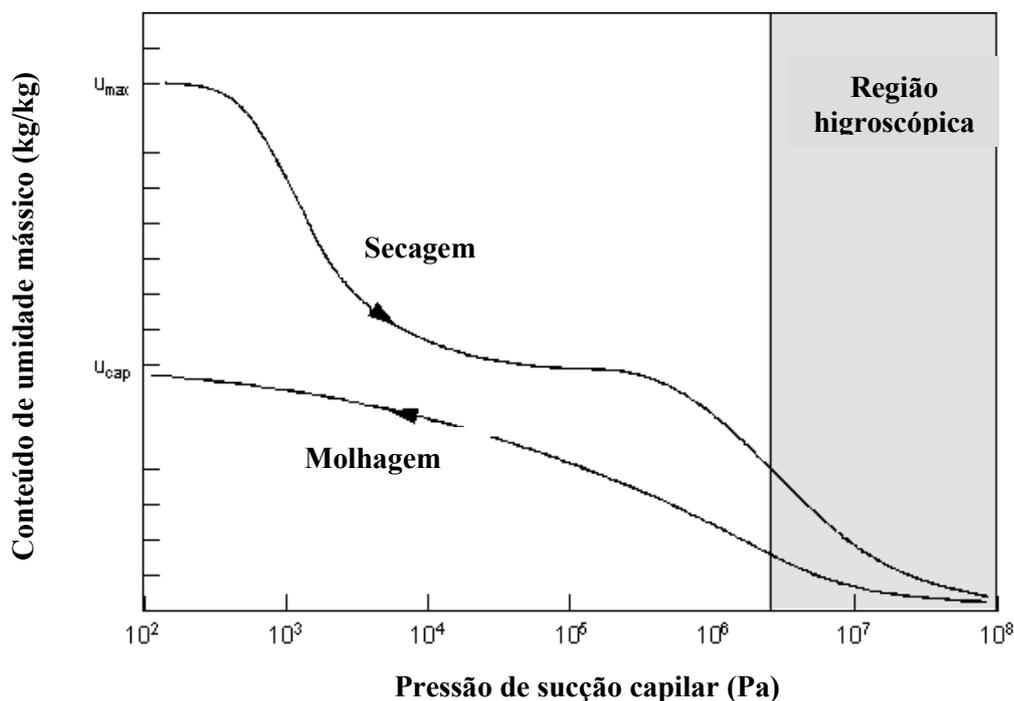
Quando vem expressa em metros de coluna de água é denominada sucção capilar:

$$\psi = - \frac{P_c}{\rho_l \times g} \quad [m \text{ de } H_2O] \quad [2.5]$$

Portanto, o desenvolvimento da curva de pressão capilar (sucção) depende da distribuição do raio dos poros e da sua variação, sendo que a sucção é tanto menor quanto maior for o teor de umidade.

A continuidade do transporte de água por capilaridade, para o interior do substrato, irá depender se a pressão de sucção é suficiente para implementar um mecanismo de difusão de água na região já saturada (interface). Assim, se a difusividade for baixa, em virtude da estrutura de poros dos materiais, o transporte passa a ser controlado pela difusão e não mais pela absorção capilar (PAES, 2004).

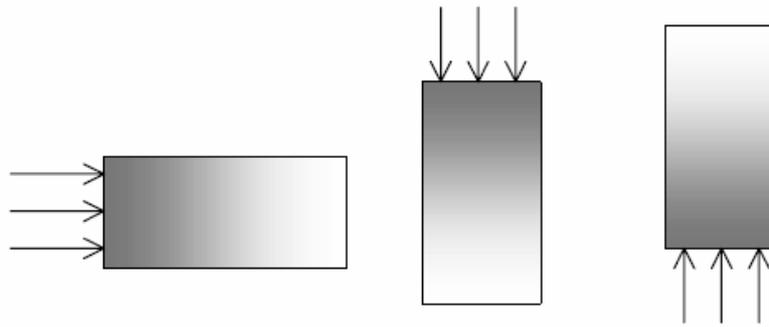
Na *Figura 5* é apresentada uma típica curva de sucção de um material poroso, sendo que durante a absorção capilar o material atingirá o conteúdo de umidade de saturação capilar ( $u_{cap}$ ). Neste caso, segundo Pedersen (1990) apud Valen (1998), os grandes poros nunca serão preenchidos com água durante a absorção capilar, pois existirão bolhas de ar no interior destes poros. Quando o processo é realizado em uma câmara de vácuo, todos os poros estarão acessíveis a água e o material poderá alcançar o estado de saturação ( $u_{vac}$ ).



**Figura 5: Curva de sucção capilar**

Fonte: adaptado de PEDERSEN (1990) apud VALEN (1998)

A influência da força gravitacional nas taxas de umidade transportada, para a grande maioria dos materiais de construção, nas suas condições usuais de aplicação, é pequena. Não se observam então diferenças significativas na absorção de água medida nas situações apresentadas na *Figura 6* (HALL, 1994).



**Figura 6: Diferentes condições de exposição de uma amostra de material poroso ao transporte de água unidirecional**

Fonte: HALL (1989) apud GEIKER et al.(1995)

### 2.3 Modelo teórico de transferência de umidade e calor em meios porosos

Diversos trabalhos têm utilizado o modelo teórico de transferência de umidade (fase vapor e fase líquida) proposto por Philip-De Vries em 1957 para previsão do fenômeno de transferência de umidade e de calor em meios porosos não saturados, sendo que os resultados experimentais apresentam, de maneira geral, uma boa concordância com os resultados teóricos.

Este modelo baseia-se nas equações de conservação de massa e energia para meios macroscopicamente homogêneos que são:

$$\text{Conservação da massa: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \theta_i) = -\text{div}(\vec{J}_{ic} + \vec{J}_{id}) + I_i \quad [2.6]$$

$$\text{Conservação de energia: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 h_s + \sum_i \rho_0 \theta_i h_i) = -\text{div}(\vec{J}_q + \sum_i h_i (\vec{J}_{ic} + \vec{J}_{id})) \quad [2.7]$$

onde:

$\vec{J}_{ic}$  e  $\vec{J}_{id}$  é a densidade de fluxo de massa transportada por convecção e difusão;

$\vec{J}_q$  é a densidade de fluxo de calor transportado por condução;

$\theta$  é o teor de umidade;

$I_i$  é o termo traduzindo a condensação – evaporação;

$h_i, h_s$  são as entalpias mássicas;

O desenvolvimento das equações de conservação de massa e energia deve-se ser feito através das leis complementares de Fourier, Fick e Darcy para traduzir respectivamente a condução de calor, a difusão de vapor e a filtração líquida. A formulação destas leis é apresentada a seguir:

$$\text{Lei de Fourier: } \dot{Q}'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [2.8]$$

onde:

$\dot{Q}''$  é o fluxo de calor (J/ s);

$\lambda$  é a condutividade térmica (W/ m x K);

T é a temperatura (K).

$$\text{Lei de Fick: } \vec{J}_v = -D_{am} \times \nu \times \tau \times p_v \quad [2.9]$$

onde:

$\vec{J}_v$  é o fluxo de vapor (kg/m<sup>2</sup>.s);

$D_{am}$  é o coeficiente de difusividade molecular livre do vapor de água no ar (m<sup>2</sup>/s);

$\nu$  é o coeficiente de difusão do vapor no ar;

$\tau$  é o fator de tortuosidade do meio;

$p_v$  é a pressão parcial do vapor.

$$\text{Lei de Darcy: } \frac{Q_l}{A} = \frac{\Delta P}{L} \times \frac{K}{\mu} \quad [2.10]$$

onde:

$Q_l$  é o fluxo de líquido (m<sup>3</sup>/s);

A é a seção pela qual o líquido escoar (m<sup>2</sup>);

K é a permeabilidade intrínseca (m<sup>2</sup>);

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido (Nxs/m<sup>2</sup>) e

$\Delta P/L$  é a pressão hidráulica (N/m<sup>3</sup>).

As principais limitações inerentes a teoria de Philip-De Vries segundo De Vries (1986) são:

- a histerese (comportamento diferencial no ganho e perda de umidade) não é levada em conta;
- a teoria não é aplicável para materiais deformáveis;
- o material poroso deve ser isotrópico e homogêneo a nível macroscópico;

- o fenômeno de congelamento, ebulição ou degelo não é considerado;
- o fenômeno de superfície na interface entre a matriz e o líquido não são levadas em conta, nem o efeito Knudsen na fase gasosa (resistência a difusão oriunda da colisão entre moléculas, bem como as colisões das moléculas contra a parede dos poros).

## **2.4 Propriedades físicas e higrotérmicas**

Para a realização da presente pesquisa buscou-se a compreensão das seguintes propriedades físicas e higrotérmicas:

- massa seca;
- massa específica aparente;
- porosidade;
- distribuição do tamanho de poros;
- cinética de absorção capilar;
- molhabilidade;
- adsorção e dessorção (determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio);
- cinética de secagem;
- condutividade térmica.

### **2.4.1 Massa seca**

O problema maior apresentado nos métodos clássicos de investigação das propriedades relacionadas com a estrutura porosa dos materiais cimentícios é que a água residual, os gases e os vapores contidos nos poros de um material à base cimentícia devem ser retirados por secagem e evacuação de gás antes das medidas serem efetuadas para que o conjunto de poros esteja acessível.

Logo, o resultado da investigação da estrutura pode ter forte dependência com o processo de secagem aplicado (tempo e temperatura de secagem). Nesse sentido, o “estado seco” não é uma definição absoluta, e sim relativa ao método de secagem adotado.

Diversas técnicas de secagem podem ser empregadas: secagem em estufa a temperaturas usualmente entre 50°C e 105°C, secagem à vácuo, secagem por congelamento (sublimação), secagem por substituição por solvente e D-drying (mantém a água livre da amostra na temperatura do gelo seco).

No entanto, Gallé (2001) alerta que estas técnicas são frequentemente usadas sem claro conhecimento dos efeitos da secagem na microestrutura. A secagem associada a dessaturação, dessorção e ao fenômeno da desidratação pode vir a causar danos como microfissuração, aumento da porosidade capilar, colapso dos poros finos e transformações mineralógicas. Logo, a remoção da água evaporável dos poros pode introduzir significativa degradação da estrutura porosa.

É geralmente considerado que a 105°C somente a água livre (água evaporável) é removida, sendo que este procedimento de secagem é geralmente selecionado em função de ser o método mais rápido. No entanto, a desidratação (remoção da água não evaporável) dos produtos de hidratação do cimento iniciam a baixas temperaturas. É sabido que a desidratação da gipsita começa em torno de 80°C e que a decomposição da etringita ocorre a cerca de 60°C. A secagem é responsável pelo colapso físico e estrutural de compostos hidratados como o monossulfoaluminato. A temperatura na qual inicia-se a decomposição dos C-S-H não está bem definida, porém sabe-se que os C-S-H são parcialmente desidratados a 105°C (GALLÉ, 2001).

Deve-se salientar que, a massa seca das amostras é um parâmetro importante a se definir, pois ela influi diretamente na determinação da massa específica aparente, da porosidade e do conteúdo de umidade.

#### **2.4.2 Massa específica aparente**

A determinação da massa específica das argamassas é relevante devido ao fato de existirem estudos que verificam uma inter-relação entre esta e a condutividade térmica dos materiais cimentícios.

Além disso, o valor desta é necessário para a determinação da porosidade e do conteúdo de umidade na saturação conforme será visto a seguir.

#### **2.4.3 Porosidade aberta**

A porosidade aberta de uma argamassa contribui para suscetibilidade da argamassa à ação deletéria de agentes agressivos do meio ambiente, como gases ácidos, material particulado em suspensão no ar, chuvas e ventos fortes e ciclos intensos de molhagem e secagem, e portanto afeta as propriedades de transporte e a durabilidade das argamassas.

Assim sendo, a porosidade aberta possui uma particular importância no acúmulo de umidade e no transporte de sais para o interior da argamassa, sendo que os sais presentes na argamassa, quando esta é submetida a ciclos de secagem e molhagem, se cristalizam e podem provocar a expansão e o fissuramento.

A porosidade aberta pode ser definida como a razão entre o volume dos poros (acessíveis às moléculas de água) e o volume total de determinada amostra:

$$n = \frac{V_{poros}}{V_{total}} \quad [2.11]$$

Sua determinação é feita saturando-se com água destilada amostras de material, sendo que o conteúdo mássico na saturação é:

$$W_{sat} = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{seca}} \quad [2.12]$$

onde:

$m_{sat}$  é a massa da amostra saturada com água (g);

$m_{seca}$  é a massa da amostra seca (g).

Dessa maneira, a relação entre a porosidade e o conteúdo de umidade na saturação é dada por:

$$n = W_{sat} \times \frac{\rho_s}{\rho_l} \quad [2.13]$$

onde:

$\rho_s$  é a massa específica aparente do material seco ( $\text{kg/dm}^3$ );

$\rho_l$  é a densidade da água ( $\text{kg/dm}^3$ ).

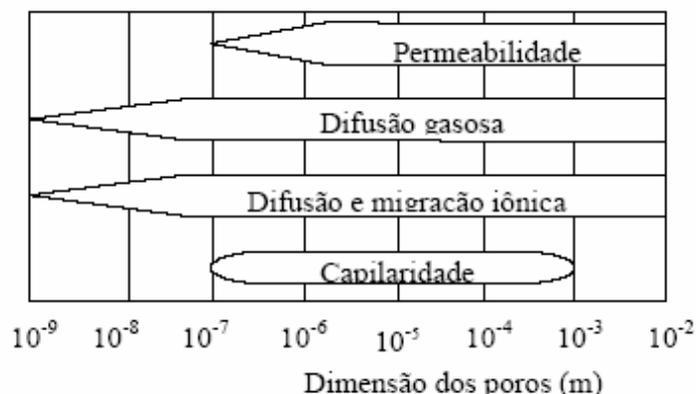
O problema concernente a esta maneira de obter-se a porosidade refere-se à obtenção de amostras efetivamente saturadas. De fato, a saturação por imersão em água destilada à pressão atmosférica não é conseguida, devido ao aprisionamento de ar em certos poros. Isto é mostrado experimentalmente por Saffiuddin & Hearn (2004) ao compararem as seguintes técnicas de saturação: saturação em água fria, saturação em água fervendo e saturação à vácuo.

#### 2.4.4 Distribuição do tamanho de poros

As propriedades físicas dos materiais cimentícios e a permeabilidade em particular, são controladas efetivamente pela distribuição de tamanho de poros (organização espacial dos poros) e não pela porosidade total. Capilares maiores que 50 nm são considerados os mais prejudiciais ao transporte de massa, enquanto que os poros menores que 50 nm interferem mais na retração por secagem e na fluência (METHA, 1994).

Já os poros isolados podem ter influência na resistência e na fratura das argamassas, mas não na permeabilidade e na penetração de agentes agressivos uma vez que não estejam em contato com o meio externo.

Na *Figura 7* estão apresentados os mecanismos de transporte de massa (permeabilidade, capilaridade, difusão e migração iônica) e as faixas de dimensão de poros nos quais estes ocorrem.

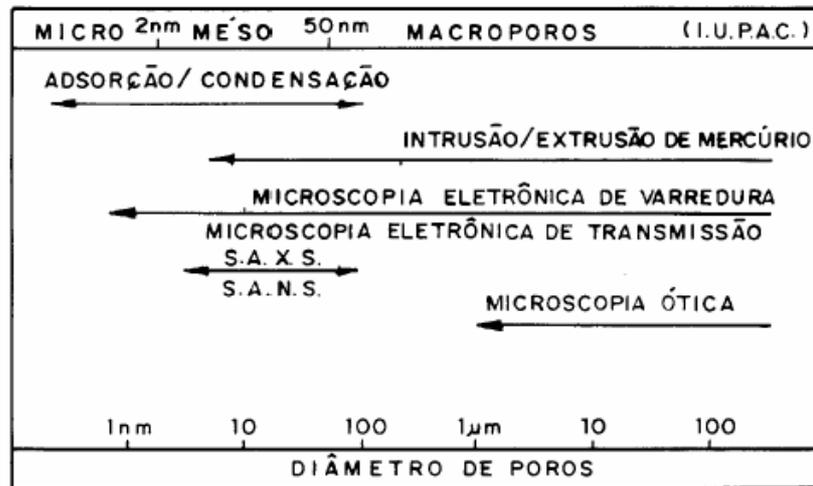


**Figura 7: Dimensão dos poros/transporte de massa**

Fonte: HELENE (1993).

Dentre as diversas técnicas para a determinação da distribuição do tamanho de poros de materiais cimentícios, as mais utilizadas continuam sendo a porosimetria de mercúrio e a adsorção de nitrogênio, sendo esta última mais indicada para a determinação da superfície específica dos poros. Os principais fatores que limitam a aplicação das outras técnicas são a necessidade de infra-estrutura sofisticada, no caso da ressonância nuclear, da tomografia, da difração de raios X e nêutrons; o longo tempo necessário para um ensaio, no caso da adsorção de água; e a necessidade do aprimoramento da metodologia no caso da análise de imagens de microscopia eletrônica (SATO, 1998).

Estes diferentes métodos para a caracterização de espaços porosos e a faixa de aplicação destes são apresentados na *Figura 8*.



**Figura 8: Faixa de aplicação dos principais métodos para caracterização de espaços porosos**

Fonte: BAROGHEL et al. (1994) apud SATO(1998)

#### 2.4.5 Cinética de absorção capilar

Como a permeabilidade à água é uma grandeza derivada de uma condição de material saturado, situação em que se encontram somente as estruturas que ficam constantemente em contato com a água, este não é o parâmetro mais indicado a ser considerado nos casos em que os materiais estão submetidos a outras condições de exposição. Nas condições em que a argamassa está sujeita a ciclos de molhagem e secagem, por exemplo, o material não se encontra permanentemente saturado e portanto a absorção capilar é um parâmetro mais indicado para análise do que a permeabilidade.

Na análise da cinética de absorção capilar são usualmente empregados os coeficientes de capilaridade e de sorptividade. O coeficiente de capilaridade ( $k$ ) pode ser determinado através da seguinte relação:

$$H = k \times \sqrt{t} \quad [2.14]$$

onde:

$H$  é altura da mancha capilar (cm);

$t$  é o tempo (s).

Já o coeficiente de sorptividade (S) é dado através da seguinte relação:

$$X = S \times \sqrt{t} \quad [2.15]$$

onde:

X é o volume do líquido absorvido por área da seção transversal do corpo-de-prova ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ );

t é o tempo (min).

O coeficiente de sorptividade também pode ser definido conceitualmente conforme apresentado pela seguinte equação:

$$S = \sqrt{\frac{\sigma \times r_c}{2 \times \mu}} \quad [2.16]$$

onde:

$\sigma$  é a tensão superficial da água ( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ );

$r_c$  é o raio característico do poro (m).

O raio característico é função das dimensões dos diversos caminhos que compõem cada elemento da rede, logo a sucessão de estrangulamento e de gargalos no poro provocam um retardo considerável do escoamento através deste poro.

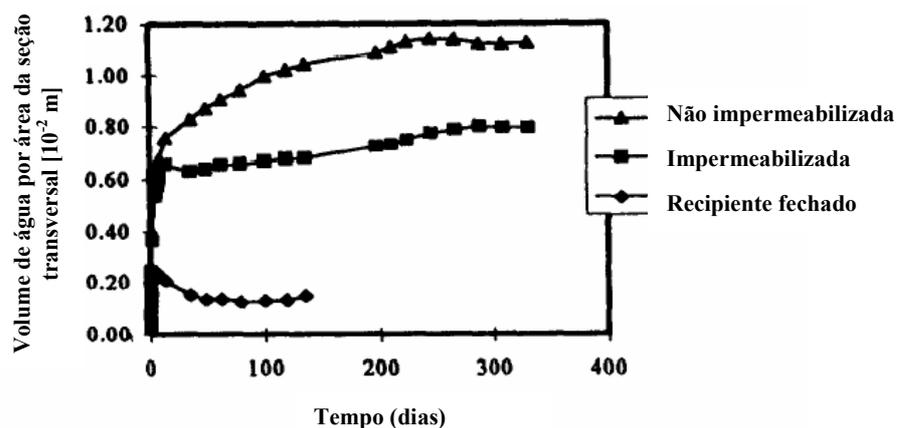
Assim sendo, a sorptividade de um menisco capilar pode ser consideravelmente maior em circuitos de raios homogêneos, mesmo que pequenos, do que em redes que comportam seções com grandes raios interconectados.

Martys & Ferraris (1997) obtiveram em seus estudos resultados que indicam que o coeficiente de sorptividade de água no concreto exibe uma dependência complexa do tempo.

Em tempos iniciais, da ordem de horas, a absorção de água total aumenta em função da raiz do tempo, o que está de acordo com as teorias capilares típicas de absorção. Em tempos maiores, da ordem de dezenas de dias, verifica-se uma lenta mudança de regime enquanto a taxa da absorção capilar diminui. Em longos tempos, da ordem de centenas de dias, pode-se verificar uma absorção mais lenta, que pode ser dirigida pelas forças capilares nos poros menores do gel. O comportamento em função da raiz do tempo é recuperado outra vez, mas com um coeficiente muito menor de sorptividade. Ainda mencionam que a taxa de absorção capilar dependerá do grau de saturação do meio poroso.

Entretanto as condições de limite afetam a absorção da água, conforme apresentado na *Figura 9*. As amostras foram ensaiadas conforme as seguintes condições: não impermeabilizada, impermeabilizada nas faces laterais com uma fita adesiva de vinil, impermeabilizada nas faces laterais e no topo, e no interior de um recipiente fechado sem impermeabilização das faces.

Observou-se que a amostra exposta ao ar sem proteção diminuiu realmente o ganho de massa após uma ascensão inicial. Esta diminuição rápida foi atribuída à evaporação da umidade das faces laterais das amostras conduzindo à redução do conteúdo de umidade após um aumento inicial. No outro extremo, as amostras expostas ao ar, mas colocadas em um recipiente fechado tiveram a maior quantidade de água absorvida já que havia praticamente nenhuma evaporação e água poderia entrar através das faces laterais devido à umidade elevada no recipiente. No exame das amostras impermeabilizadas nas faces laterais contra o caso das impermeabilizadas nas faces laterais e superior verificou-se apenas uma pequena diferença na absorção. Entretanto, parte desta diferença pode ser atribuída à variação inerente a amostra. Também se observou que apesar da fita adesiva de vinil ser essencialmente impermeável o procedimento de tapar não produziu necessariamente um selo hermético já que algum ar poderia escapar pelos lados. A partir dos resultados obtidos em função das condições de contorno os autores optaram por trabalhar com amostras impermeabilizadas nas faces laterais.



**Figura 9: Influência das condições de limite da amostra**

Fonte: adaptado de MARTYS E FERRARIS (1997)

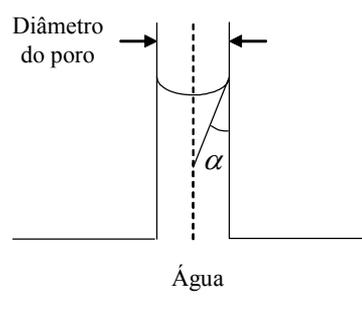
Com o objetivo de analisar a influência da porosidade do agregado na absorção do concreto Barbare; Shukla & Bose (2003) efetuaram a comparação entre um concreto convencional e um concreto confeccionado com cenosferas em substituição a areia natural. Para isto fez-se uso de discos de concreto com diâmetro de 10 cm e espessura de cerca de 2 cm com faces laterais impermeabilizadas. As amostras foram então submersas. Como resultados obtiveram que a absorção de água em ambas as amostras foi extremamente baixa e diferem pouco entre si, logo foi pouco significativo o efeito das cenosferas na absorção final de água.

Em se tratando dos procedimentos experimentais para caracterização da absorção de água por capilaridade em argamassas e concretos, alguns encontram-se publicados em trabalhos de pesquisa (CARPENTER et al., 1993; HALL, 1989) enquanto outros são estabelecidos em normas (NBR 9779, DIN 52617/87, AFNOR NF P 18-354/86). Em geral, são apresentadas poucas variações nos experimentos e estes possuem como foco principal o tratamento e as condições de cura das amostras.

#### 2.4.6 Molhabilidade

A capilaridade intervém quando o material de base cimentícia está em contato com uma fase líquida. A água líquida pode ser absorvida e retida nos poros por capilaridade, sob efeito das forças dos meniscos que resultam tensões interfaciais sólido/líquido/gás. Tais forças, inversamente proporcionais ao diâmetro do poro suposto cilíndrico (capilar), são responsáveis pela ascensão capilar.

A quantidade de água capilar absorvida a uma dada pressão por um corpo poroso e a velocidade desta absorção depende em grande parte do grau de molhabilidade, sendo que este é caracterizado pelo ângulo formado na interface entre o menisco capilar (esférico) e parede do poro. Este ângulo está ilustrado na *Figura 10*.



**Figura 10: Esquemática do ângulo de molhamento**

Merouani (1987), baseado em procedimento experimental geralmente aplicado em solos, propôs a determinação do ângulo de molhamento aparente ( $\alpha$ ) através da avaliação da ascensão capilar em ensaio realizado em argamassas, considerando-se a cinética de absorção capilar de dois líquidos molhantes: água e álcool.

Este ângulo de molhamento pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\cos \alpha = \left( \frac{S_a}{S_{al}} \right)^2 \frac{\mu_a \times \sigma_{al}}{\mu_{al} \times \sigma} \quad [2.17]$$

onde:

$\alpha$  é o ângulo de molhamento aparente,

$\mu_a$  é a viscosidade dinâmica da água,

$\mu_{al}$  é a viscosidade dinâmica do álcool,

$\sigma$  é a tensão superficial água-ar;

$\sigma_{al}$  é a tensão superficial álcool-ar;

$S_a$  é a inclinação da reta que relaciona o estoque de água infiltrado ( $S_t$ ) com a raiz do tempo;

$S_{al}$  é a inclinação da reta que relaciona o estoque de álcool infiltrado ( $S_t$ ) com a raiz do tempo.

Como pode ser verificado, para cálculo do ângulo de molhamento é necessário realizar o ensaio de absorção capilar com dois líquidos molhantes a água e o álcool, sendo que o uso do álcool é dado em função deste ser considerado um líquido perfeitamente molhante, ou seja, o ângulo de molhamento é praticamente nulo em função do menisco capilar ser bastante curvo. Logo, a absorção capilar de álcool implica em uma diferença de pressão praticamente máxima acarretando em uma elevada força capilar.

No que diz respeito ao estoque de líquido infiltrado ( $S_t$ ) este pode ser obtido através da aplicação da seguinte equação:

$$S_t(t) = \frac{m(t) - ms}{\rho_l \times A} \quad [2.18]$$

onde:

$m(t)$  é a massa do corpo de prova num determinado instante;

$\rho_l$  é a massa específica do líquido molhante;

$A$  é área da seção transversal do corpo de prova.

Já as características necessárias dos líquidos molhantes para determinação do ângulo de molhamento são apresentadas na *Tabela 1*.

**Tabela 1: Características dos líquidos molhantes à temperatura de 20°C**

Líquido	$\sigma$ (dynes/cm)	$\mu$ (centipoise)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Água (a)	72,75	1,005	1,000
Álcool (al)	23,04	1,200	0,789

Fonte: MEROUANI (1987)

Ao avaliar o ângulo de molhamento aparente em concretos com substituição do agregado miúdo por cinzas pesadas oriundas de termelétricas, Andrade (2004) encontrou ângulos de molhamento maiores quanto menor o teor de substituição, sendo que quanto maior este ângulo pior é a molhabilidade.

#### **2.4.7 Adsorção e dessorção**

As ferramentas básicas para uma boa compreensão, quantificação, e predição do comportamento hídrico de materiais cimentícios no estado endurecido são obtidas através das isotermas de dessorção e de adsorção do vapor de água (BAROGHEL et al., 1999).

As isotermas de adsorção e dessorção, além de revelarem informações a respeito da estrutura porosa do material, mostram a variação do conteúdo de umidade deste quando exposto a um ambiente em que a umidade relativa varia.

Em geral, o que afeta as isotermas de adsorção e dessorção é qualquer parâmetro que altere a estrutura porosa e a distribuição dos tamanhos de poro. Como, por exemplo, a relação a/c, tipo de cimento, tempo e tipo de cura, temperatura, carbonatação (para estruturas com seções transversais finas), aditivos, relação cimento/agregado (XI et al., 1994).

Dentro deste contexto, diversos trabalhos fazem uso de ensaios de adsorção e dessorção:

- Kumaram et al. (2002) obtiveram as isotermas de adsorção de mais de 70 materiais de construção utilizados no Canadá e nos Estados Unidos;
- Baroghel et al. (1999) realizaram a caracterização e determinação das propriedades de equilíbrio e transferência de umidade em concretos comuns e concretos de alto-desempenho;

- Xi et al. (1994) desenvolveram um modelo matemático que demonstrou prever adequadamente as isotermas obtidas experimentalmente para a pasta do cimento de Portland;

- Freitas (1992) obtiveram as curvas de adsorção e dessorção do barro vermelho e do concreto celular em função da umidade relativa;

- Fernandes (1990) e Merouani(1987) verificaram o ajuste dos modelos GAB e BET aos dados obtidos experimentalmente para a confecção das isotermas, bem como o cálculo da superfície específica de argamassas.

O método padrão do ensaio de obtenção das isotermas de materiais higroscópicos de construção é estabelecido e descrito pela ASTM C 1498-01, sendo que o ensaio consiste basicamente em colocar uma amostra em uma atmosfera em equilíbrio com uma solução salina saturada com corpo fundo, cuja função é manter a umidade relativa constante. Esta umidade relativa para uma dada temperatura e determinado sal é estabelecida pela NF- X 15 014. Já a quantidade de água adsorvida ou dessorvida para diferentes valores de umidade relativa no estado de equilíbrio é obtida através de método gravimétrico.

O tempo requerido para alcançar o estado de equilíbrio em uma amostra depende da espessura desta e da faixa de umidade relativa, sendo que em redes de poros muito finos de materiais cimentícios o transporte da umidade é um processo bastante lento. Portanto, o estado de equilíbrio pode ser alcançado após poucos meses ou após tempo superior a um ano (BAROGHEL et al., 1999).

Na preparação para o ensaio de adsorção, a amostra é previamente seca, e para o ensaio de dessorção é previamente saturada, sendo que o ponto de início para as medidas de dessorção é dado a partir uma condição do equilíbrio próxima da UR 100%.

Quanto à reprodutibilidade deste ensaio, Fernandes (1990) num estudo piloto utilizou duas amostras em cada dessecador e obteve assim uma boa reprodutibilidade dos resultados, optando então por fazer uso de apenas uma amostra em cada dessecador. Deste modo minimizou-se a perturbação ligeira da umidade relativa e da temperatura durante o intervalo de tempo necessário a pesagem.

Para o ajuste matemático dos pontos experimentais obtidos no ensaio de adsorção e dessorção podem ser utilizados diversos modelos dos quais se destacam o de Langmuir, de BET (Brauner, Emmette & Teller) e de GAB (Guggenheim, Anderson & De Boer).

A teoria de Langmuir considera que apenas uma camada de moléculas pode ser adsorvida, sendo que esta não é completa, tratando-se, portanto de um modelo monomolecular. O equilíbrio é atingido quando a taxa de moléculas que se condensam e evaporam são iguais. Esta teoria é a mais antiga e apresenta muitas limitações com relação às teorias GAB e BET que são melhoramentos desta.

A teoria BET é um modelo multimolecular, que é fundamentado nas seguintes hipóteses:

- a superfície dos poros é recoberta por várias camadas sucessivas de moléculas de água com áreas decrescentes;
- as moléculas da primeira camada estão ligadas a parede sólida pela energia molar  $E_i$ ;
- as moléculas das outras camadas, a partir da segunda, possuem energia de ligação  $E_l$ , igual ao calor molar de laterização,  $E_l < E_i$ ;
- o equilíbrio resulta da igualdade sucessiva das taxas de evaporação das camadas de ordem  $i$  e de condensação das camadas de ordem  $i-1$ ;
- o número de camadas adsorvidas não depende do tamanho dos poros.

A hipótese do número de camadas adsorvidas não depender do tamanho do poro consiste numa falha do modelo, pois desta forma não está se considerando a água capilar condensada no poro. No entanto, este modelo possui resultados satisfatórios quando se usam baixas pressões, pois nestas o efeito da parcela de água condensada por capilaridade em relação a parcela de água condensada por adsorção é pouco significativa.

A teoria de GAB difere da BET por considerar o calor de adsorção  $E_m$  para todas as camadas moleculares (que não a primeira) diferente do calor molar de laterização  $E_l$ .

A seguir são apresentadas as equações obtidas do desenvolvimento da teoria de GAB.

$$W = \frac{h}{A \times h^2 + B \times h + C} \quad [2.19]$$

onde:

$h$  é a umidade relativa (%);

$W$  é o conteúdo mássico da fase adsorvida (%);

$$A = \frac{k' \times (1 - c')}{c' \times W_m} \quad [2.20]$$

$$B = \frac{c' - 2}{c' \times W_m} \quad [2.21]$$

$$C = \frac{1}{c' \times W_m \times k'} \quad [2.22]$$

Quanto aos parâmetros A, B e C, são determinados por regressão quadrática a partir dos pontos experimentais o que permite obter os valores de  $c'$ ,  $k'$  e  $W_m$ , sendo que:

-  $W_m$  é o conteúdo mássico correspondente à formação de uma camada de moléculas, recobrindo toda a superfície sólida;

-  $c'$  é a constante relacionada com a diferença entre energia molar de ligação das moléculas da primeira camada à parede sólida e a energia latente de vaporização;

-  $k'$  é a constante relacionada com a diferença entre a energia latente de vaporização e energia de adsorção para todas as moléculas que não as da primeira camada.

As constantes  $c'$  e  $k'$  podem ser sintetizadas nas seguintes equações:

$$c' = \exp \left[ \frac{E_1 - E_L}{R \times T} \right] \quad [2.23]$$

$$k' = \exp \left[ \frac{E_L - E_m}{R \times T} \right] \quad [2.24]$$

onde:

$E_1$  é a energia molar de ligação das moléculas da primeira camada à parede sólida;

$E_L$  é o calor latente de vaporização;

$E_m$  é o calor de adsorção para todas as camadas moleculares que não a primeira;

$R$  é a constante universal dos gases;

$T$  é a temperatura.

O ajuste através do modelo BET é feito da mesma maneira, porém com  $k'=1$ .

Fernandes (1990) e Merouani (1987) ao trabalharem com argamassas obtiveram com o modelo GAB um bom ajuste em todo o domínio de umidade relativa, enquanto que no modelo BET os resultados mostram-se adequados até valores médios de umidade: em torno de 55%.

A partir da determinação de  $W_m$  é possível calcular a superfície específica do material poroso através da seguinte equação:

$$Se = \frac{N_{AVG} \times W_m \times \rho_s \times A_m}{V_m} \quad [2.25]$$

onde:

$N_{AVG}$  é o número de avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$ );

$W_m$  é o conteúdo mássico correspondente à formação de uma camada de moléculas recobrimdo toda a superfície sólida;

$\rho_s$  é a massa específica aparente do material seco;

$V_m$  é o volume molar do adsorvato – para a água  $V_m = 18 \text{ g/mol} = 18 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ;

$A_m$  é a área de recobrimento de uma molécula adsorvida – para água  $A_m = 10 (\text{Å})^2$ .

Xi et al. (1994) através dos parâmetros  $k'$ ,  $c'$  e  $W_m$  obtidos através do ajuste de GAB determinaram o número de camadas adsorvidas ( $N$ ), sendo que o valor de  $n$  pode ser calculado através da seguinte equação:

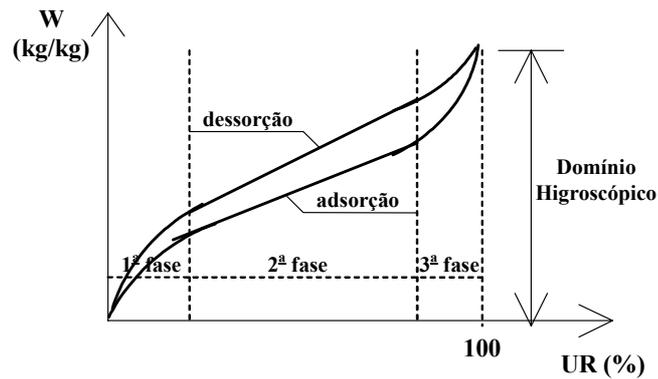
$$N = \frac{W}{W_m} = \frac{c' \times k \times h}{(1 - k \times h) \times [1 + (c' - 1) \times k \times h]} \quad [2.26]$$

Para o valor máximo de umidade relativa ( $h=1$ ) a equação acima pode ser reescrita como:

$$N = \frac{W}{W_m} = \frac{c' \times k}{(1 - k) \times [1 + (c' - 1) \times k]} \quad [2.27]$$

As curvas de adsorção e dessorção apresentam comportamentos diferentes, sendo que a histerese parece ocorrer apenas no domínio de umidade relativa onde há condensação capilar, não ocorrendo na região de adsorção pura, conforme observado por Baroghel et al. (1999), Xi et al (1994), Freitas (1992), Fernandes (1990) e Meroauni (1987).

Este fenômeno de histerese está representado graficamente na *Figura 11*. A primeira fase representa a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície no interior do poro (adsorção monomolecular), na segunda fase ocorre a deposição de várias camadas de moléculas (absorção plurimolecular). Quando o diâmetro dos poros é suficientemente pequeno, há a junção das camadas plurimoleculares, ou seja, a condensação capilar que corresponde a terceira fase.



**Figura 11: Fenômeno da histerese das isotermas de adsorção e dessorção**

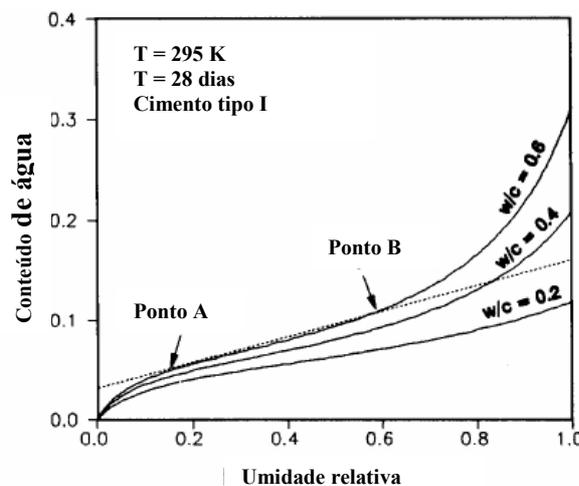
Fonte: adaptado de FREITAS (1992)

Condizente com as fases apresentadas por Freitas (1992), Xi et al (1994) definem dois pontos de transição nas isotermas de adsorção conforme apresentado na *Figura 12*. O ponto A marca a transição da região de alcance da capacidade da monocamada da isoterma de adsorção para a região de aumento constante da umidade e o ponto B significa a transição da zona de crescimento constante para a zona de aumento final, podendo corresponder ao início da condensação capilar.

A ocorrência do fenômeno da histerese é dada por duas hipóteses (MEROUANI,1987):

- diferença dos ângulos de contato na adsorção e dessorção, sendo que o ângulo de contato na adsorção é maior do que na dessorção em função do conteúdo de umidade na dessorção ser maior;

- poros peculiares com formato de garganta, onde o preenchimento se dá em função do raio da garganta e o esvaziamento em função do raio do poro, onde o raio do poro é maior do que o da garganta e a umidade são maiores na adsorção.



**Figura 12: Pontos de transição da isoterma de adsorção**

Fonte: adaptado de XI et al (1994)

Xi et al. (1994) comentam que apesar do fenômeno da histerese, vários estudos existentes mostram que as isotermas, tanto na adsorção como na dessorção, apresentam a mesma forma, sendo os estudos com isotermas de adsorção muito mais abundantes na literatura do que os estudos para dessorção.

Entretanto, Baroghel et al. (1999) mencionam que o estudo das isotermas de dessorção é interessante quando se deseja abordar fenômenos como a secagem.

Em se tratando do efeito da temperatura nas isotermas, Phillipi; Fernandes; Yunes (1993) comentam que uma redução na temperatura aumenta as características de fixação de umidade do material devido aos aumentos promovidos na tensão superficial da água, porém este efeito é pouco significativo. De acordo com isto, Merouani (1987) mostrou que para argamassas as curvas de adsorção são pouco sensíveis a temperatura.

Kumaran (2004) para a determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio durante a dessorção além do método das isotermas fez uso do método da placa de pressão, sendo que o ensaio consistiu em saturar as amostras do ensaio em água sob ação de vácuo. Estas foram então introduzidas em um instrumento de placa de pressão capaz de manter pressões até 100 bar por diversos dias. As placas em contato hídrico perfeito com as amostras extraem a água da estrutura porosa até que um estado de equilíbrio seja estabelecido.

Os valores de conteúdo de umidade de equilíbrio nas amostras e as pressões correspondentes são obtidas, sendo que a pressão do equilíbrio,  $p_h$ , pode ser convertida em uma umidade relativa, usando a seguinte equação:

$$\ln UR = -\frac{M}{\rho_l \times R \times T} \times p_h \quad [2.28]$$

onde:

M é a massa molar da água;

R é a constante ideal dos gases;

T é a temperatura termodinâmica;

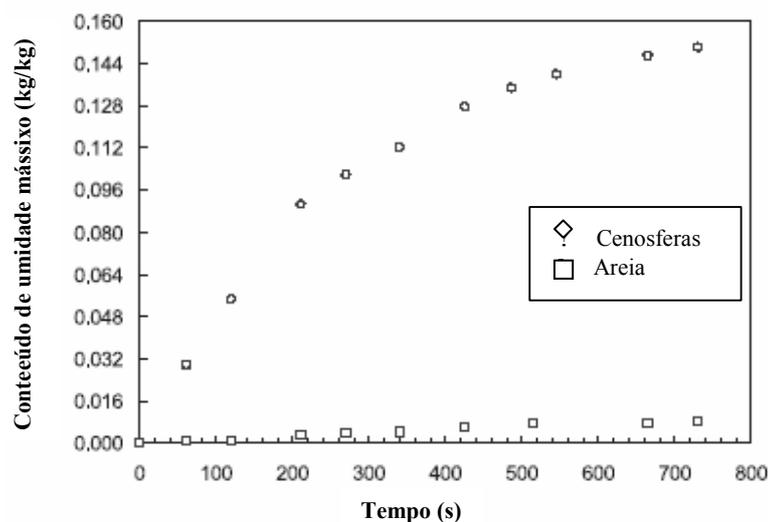
$\rho_l$  é a densidade da água.

Este procedimento do ensaio da placa de pressão é brevemente reportado por um relatório técnico da “Nordtest” de autoria de Hansen (1998) apud Kumaran et al. (2002).

Com outro enfoque, Barbare; Shukla & Bose (2003) estudaram a adsorção de água nos seguintes agregados: cenosferas a base de silicato de alumínio e areia natural, obtendo como resultado que o conteúdo de umidade de equilíbrio das cenosferas é cerca de 18 vezes maior do que o da areia, o que reflete a natureza porosa das cenosferas. Esta natureza porosa das cenosferas implica em diferentes quantidades de água a serem adicionadas na dosagem de concretos confeccionados com cenosferas em substituição a areia natural.

O ensaio para determinação deste conteúdo de umidade adsorvido pelas cenosferas consistiu em submeter as amostras de no máximo cerca de 4 gramas a condições controladas de temperatura e umidade ( $T= 23^{\circ}\text{C}$  e  $UR=85\%$ ) em um recipiente fechado, sendo que o ganho de massa foi controlado por meio de pesagens em intervalos regulares de tempo.

Na *Figura 13* estão apresentados os resultados obtidos por estes autores.



**Figura 13: Conteúdo de umidade de equilíbrio da areia e das cenosferas**

Fonte: adaptado de BARBARE; SHUKLA; BOSE et al. (2003)

#### 2.4.8 Cinética de secagem

A cinética de secagem das argamassas, é significativa no desempenho do revestimento externo por este estar exposto diretamente à ação das chuvas. Pois a presença de um elevado teor de umidade nos elementos construtivos propicia manifestações patológicas, como por exemplo o desenvolvimento de fungos que podem causar desconforto e danos à saúde.

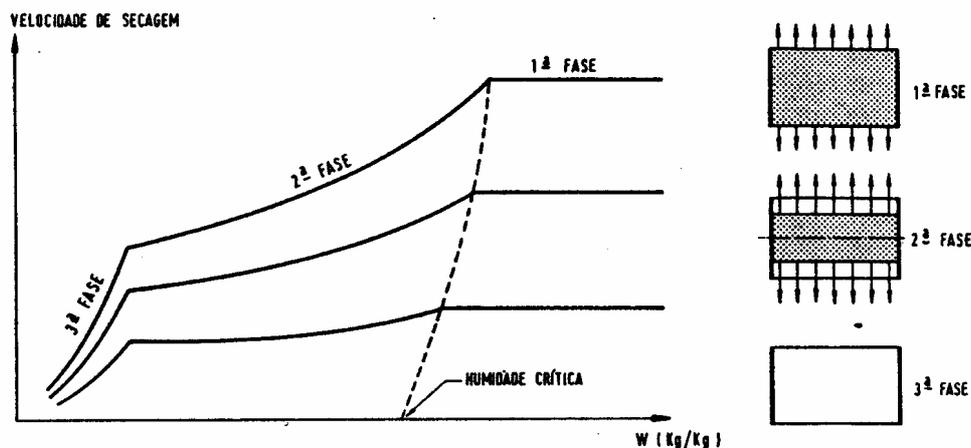
Quando um material é posto em contato com um ambiente cuja temperatura e umidade são constantes, podem ser distinguidas três fases de secagem com diferentes velocidades características, segundo Freitas (1992):

- Na primeira fase as forças capilares são capazes de alimentar a superfície do material em água líquida. Durante esta fase a secagem é absolutamente uniforme, isto é, o teor de umidade é constante em qualquer parte do interior do material.

- A segunda fase é aquela na qual não há mais uma alimentação suficiente da superfície, sendo que a secagem passa a ser efetuada por difusão a partir da frente úmida. Uma camada cada vez mais seca de material é atravessada, havendo por consequência uma diminuição do fluxo. Para materiais com secagem por duas faces paralelas essa fase prossegue até que as duas faces secas se confundam.

- Na terceira fase, que é extremamente lenta, ocorre o equilíbrio higroscópico.

Na *Figura 14* são apresentadas as curvas características da secagem em diferentes materiais.



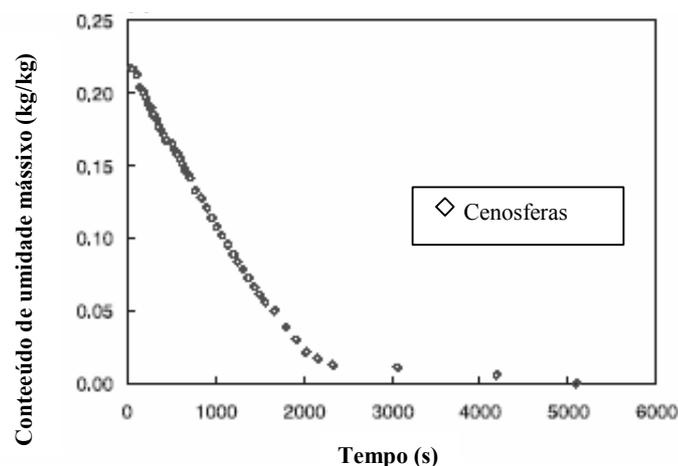
**Figura 14: Curvas características da secagem de diferentes materiais**

Fonte: FREITAS (1992)

Na secagem natural é pouco nítida a passagem da primeira para a segunda fase. Já quando a secagem é feita em estufa a  $75^{\circ}\text{C}$  e a  $\text{UR}=5\%$  a passagem destas fases fica bem clara.

Meroauni (1987) quando secou amostras de argamassa de dimensões  $3 \times 3 \times 7 \text{ cm}^3$ , inicialmente saturadas em água e em seguida colocadas em estufa a temperatura de  $75^\circ\text{C}$ , até a estabilização da massa, verificou que o tempo de secagem das amostras de argamassa eram bastante variáveis, para a argamassa de revestimento com mais de 24 h. Entretanto, para a argamassa impermeabilizada, que apresenta conteúdo de umidade cerca de 4 vezes maior do que a argamassa de revestimento, a secagem levou cerca de 8 horas.

Barbare; Shukla & Bose (2003), para a determinação do conteúdo de umidade durante a secagem, procederam da seguinte maneira: as amostras de cenosferas utilizadas no ensaio de adsorção foram submetidas a  $UR=45\%$  e a temperatura ambiente de  $23^\circ\text{C}$ . Os resultados obtidos são apresentados na *Figura 15*. Como mostrado nesta figura foi obtida uma curva clássica de secagem, pois há um período de taxa constante seguido por um período de diminuição da taxa, sendo ambos lineares. Para o concreto com cenosferas estes autores obtiveram, contrariando o esperado, que apesar do conteúdo de umidade deste ser levemente maior do que o do concreto normal exigiu maior tempo para secar.



**Figura 15: Conteúdo de umidade em função do tempo de secagem das cenosferas a  $23^\circ\text{C}$  e  $UR=45\%$**

Fonte: adaptado de BARBARE; SHUKLA; BOSE (2003)

#### 2.4.9 Condutividade térmica

A avaliação da condutividade térmica dos materiais de construção é de grande relevância por esta estar intimamente relacionada com o desempenho térmico e a eficiência energética das edificações.

A condutividade térmica destes materiais aumenta em função do teor de umidade contida nos mesmos, em função da água, com poder de isolamento inferior ao do ar, pois a água tem uma condutividade aproximadamente 25 vezes maior do que o ar.

Alves, Pietrobon & Pietrobon (1999) mencionam que há várias considerações sobre a variação da condutividade de materiais de isolamento térmico com o teor de umidade, por exemplo, na Alemanha considera-se que a condutibilidade varia linearmente com a umidade, um aumento de 6% no valor de  $k$  corresponde a um aumento de 1% no teor de umidade, expresso em volume, já nos Estados Unidos estima-se um aumento de 4 a 6% no valor de  $k$  para cada aumento de 1% no teor de umidade, expresso em massa.

Alves, Pietrobon & Pietrobon (1999) ensaiando argamassas de cimento e areia com diferentes relações a/c através do método do fio quente, paralelo verificaram que a condutividade térmica é menor para valores de massa específica aparente menores, atribuindo isto a maior quantidade de ar presente na amostra.

Condizendo com isto, Blanco et al. (2000) quando estudaram concretos também relataram que a condutividade térmica diminui com a diminuição da densidade. Lu-Shu-Shu et al. (1980) apud Blanco et al. (2000) formularam experimentalmente uma correlação entre a densidade e a condutividade térmica e relataram que a condutividade aumenta com o aumento da densidade.

Quanto ao emprego de cinza pesada Chen et al apud Demirboga (2003) mencionam que quando substitui-se 40% do volume de agregado miúdo de um determinado concreto por cinza pesada a condutividade térmica diminui até 39%.

Dentro deste contexto, Khan (2002) cita que uma revisão das mais recentes investigações revelam que o tipo de agregado, a porosidade e o conteúdo de umidade são os fatores que tem maior influência na condutividade térmica do concreto. Ressaltando que o agregado tem relevante importância na qualidade de isolamento do concreto. Nesta mesma linha Demiborga, Örüng & Gül (2001) mencionam que a condutividade do concreto aumenta com o aumento da condutividade térmica do agregado.

Farhat (1981) menciona que no IPT são utilizados os métodos da placa quente, da caixa quente, do fio quente e da sonda para a medição da condutividade térmica.

### 2.4.9.1 Método da sonda térmica

A sonda térmica é um elemento filiforme que é colocado no meio em que se deseja medir a condutividade térmica. Portanto, consiste em um método que permite medir a condutividade ponto a ponto em um material e permite efetuar medições “in situ” de forma não destrutiva.

O calor é dissipado na resistência elétrica que percorre internamente o corpo da sonda. Mede-se a evolução da temperatura com o tempo através de um termopar, sendo que a condutividade térmica do meio é determinada através do modelo que relaciona a evolução da temperatura na sonda.

Quanto à construção da sonda, Fernandes (1990) procedeu da seguinte maneira: o corpo da sonda foi feito com um tubo de aço inoxidável que é um material resistente à corrosão, o que é fundamental, pois a sonda irá atuar em meios úmidos. A dissipação de calor deu-se através de um fio de constantan de 0,15 mm de diâmetro isolado eletricamente com resina.

Como o fio de constantan apresenta um baixo coeficiente de variação da resistividade elétrica com a temperatura este é indicado para aplicação do modelo matemático para a evolução da temperatura na sonda, pois este supõe a dissipação de calor constante. O termopar utilizado foi de chromel-constantan, com isolamento de teflon, com diâmetro total de 0,20 mm. A junção quente do termopar (posicionada no centro da sonda) foi isolada eletricamente com resina. Os espaços vazios existentes no interior do corpo da sonda foram preenchidos com uma pasta de alta condutividade térmica, com a finalidade de evitar a convecção de ar e atenuar as resistências térmicas de contato. Tapou-se o fundo da sonda térmica com resina epóxi.

Para a colocação da sonda na amostra de argamassa, Fernandes (1990) fez um furo com aproximadamente 3 mm de diâmetro, e o espaço vazio foi preenchido com mercúrio para evitar a convecção de ar e atenuar a resistência de contato sonda-material.

O modelo matemático utilizado para a condução de calor foi o desenvolvido por Perrin (1985), sendo que este modelo faz uso das seguintes hipóteses:

- taxa de dissipação constante e uniforme ao longo da sonda;
- temperatura uniforme na sonda;
- fluxo de calor radial e apenas por condução;
- equilíbrio térmico entre a sonda e o meio para  $t=0$ ;

- meio infinito.

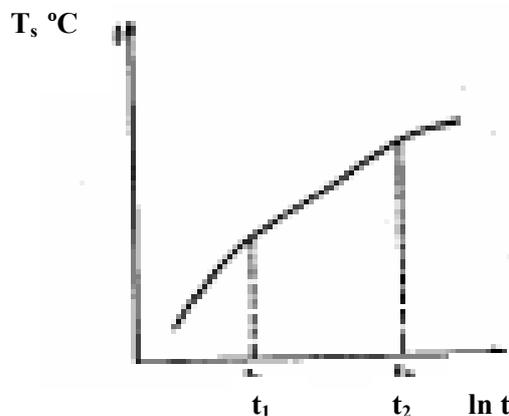
Segundo este modelo a evolução da temperatura com o tempo na sonda é dada por :

$$T_s(t) = A' \times \ln(t) + B + \frac{C}{t} \times (\ln t + D) \quad [2.29]$$

A resistência térmica de contato e a capacidade térmica da sonda são representadas no terceiro termo da equação e são proporcionais a  $t^{-1}$ . Após um tempo suficientemente logo a contribuição desse termo é desprezável e a equação toma a forma linear:

$$T_s(t) = A' \times \ln(t) + B \quad [2.30]$$

Isto pode observado através do aspecto de uma curva experimental típica de evolução da temperatura na sonda ilustrada na *Figura 16*.



**Figura 16: Evolução da temperatura na sonda com o tempo**

Fonte: FERNANDES; PHILLIPI & PEDRINI (1991)

Assim sendo, a condutividade térmica é calculada a partir da inclinação da reta, entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  dada por:

$$A' = \frac{Q}{4 \times \pi \times \lambda} \quad [2.31]$$

onde

$Q$  é a potência dissipada na sonda por unidade de comprimento (W/m);

$\lambda$  é a condutividade térmica (W/mxK).

Para  $t < t_1$  têm-se efeitos de capacidade térmica e resistência de contato e para  $t > t_2$  as condições de contorno da amostra modificam a evolução da temperatura (efeito de borda).

Para se obter resultados experimentais com maior precisão na medição faz-se necessário:

- evitar a convecção do ar;
- utilizar amostras de volume suficiente grande para retardar o efeito de borda;
- atenuar resistências de contato.

Estas ações são essenciais para assegurar que a faixa de medição de interesse, ou seja, a parte linear da curva de evolução de temperatura, entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  seja suficientemente extensa.

No que diz respeito ao aparato experimental apresentado por Fernandes; Philippi & Pedrini (1991) para a determinação da condutividade térmica em função do conteúdo de umidade, este consistiu basicamente de uma fonte de tensão, um medidor de corrente elétrica, a sonda térmica e um sistema de aquisição de dados.

A condutividade térmica foi medida em amostras com diferentes conteúdos de umidade, utilizando-se duas sondas diferentes, para que desta forma fosse obtida a relação entre a condutividade térmica e o conteúdo de umidade.

## 2.5 Grau de hidratação das argamassas

Quando pretende-se avaliar as propriedades higrotérmicas das argamassas é preciso determinar o grau de hidratação destas uma vez que este está intimamente relacionado com a estrutura porosa, e portanto influência nos mecanismos de transferência de umidade e calor.

O grau de hidratação é um parâmetro muito utilizado para caracterizar a maturidade dos materiais à base de cimento Portland, sendo que a hidratação deste é constituída de diversas reações químicas simultâneas de cinéticas variadas e interdependentes.

Cada uma destas reações pode ser expressa por um grau de hidratação diferente. No entanto, no caso de compostos de cimento Portland, a adoção de um grau global de hidratação para todas as reações é suficientemente representativo. A definição mais aceita do grau de hidratação ( $\xi$ ) foi a proposta por Byfors (1980) apud Faria (2004) e consiste em definir o grau de hidratação como a fração ponderal do material reagido:

$$\xi = \frac{\text{Quantidade de cimento hidratado}}{\text{Quantidade total de cimento}}, \quad \xi \in [0,1]$$

[2.31]

A quantidade de cimento hidratado é uma grandeza difícil de ser caracterizada. Entretanto, é possível, por meio de uma análise de raios X, determinar a quantidade de cimento não hidratado em função da estrutura cristalina do clínquer. Assim sendo, o conhecimento da composição original do cimento permite a determinação, em qualquer tempo, da quantidade de cimento não hidratado. Pode-se então descrever o grau de hidratação da forma seguinte:

$$\xi = 1 - \frac{\text{Quantidade de cimento não hidratado}}{\text{Quantidade total de cimento}}, \quad \xi \in [0,1] \quad [2.32]$$

Pode-se, igualmente, atingir diretamente o grau de hidratação da seguinte maneira:

$$\xi = \frac{W(t)}{W(t=\infty)}, \quad \xi \in [0,1] \quad [2.33]$$

onde:

W é a quantidade de água ligada em função do tempo;

W(t = ∞) representa a quantidade de água ligada para uma hidratação total do cimento.

Um valor aproximado de W (t = ∞), citado por Laplante (1993) apud Faria (2004), é dado por:

$$W(t=\infty) = 0,25 \cdot C \quad [2.34]$$

onde:

C é a quantidade total de cimento.

Tecnicamente é impossível extrair de um corpo de prova apenas esta água ligada. Esta quantidade (água ligada) é então assimilada, geralmente, à quantidade de água não-evaporável. Esta última pode ser extraída quando o corpo de prova é submetido a uma análise termogravimétrica por aquecimento entre 105°C e 1050°C. A análise termogravimétrica consiste em pesar continuamente um corpo de prova submetido a uma temperatura crescente, geralmente linear, programada em função do tempo. Isto permite observar a evolução de sua massa sob atmosfera controlada. As diferentes variações de massa que se produzem durante esta experiência permitem conhecer as quantidades de água ligadas sob suas diferentes formas, conforme apresentado na *Tabela 2*.

**Tabela 2: Diferentes variações de massa durante a análise termogravimétrica**

Temperatura (°C)	Forma em que se encontra a água
95-105	Água evaporável
105-380	Água dos hidratos de silicatos e aluminatos
380-600	Água da cal hidratada
600-750	Descarbonatação da calcita
750-1000	Produtos secundários de hidratação

Fonte: FARIA (2004)

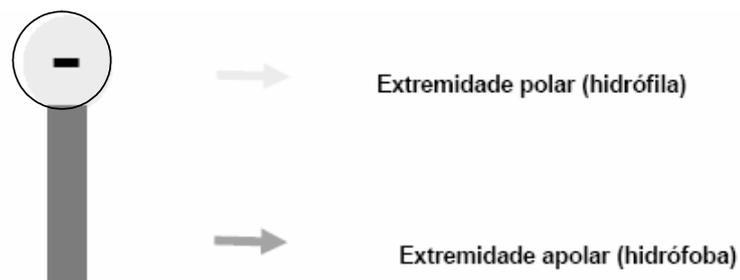
## 2.6 Ação do aditivo incorporador de ar

O aditivo incorporador de ar é empregado em argamassas industrializadas em substituição a cal e seu emprego tem como objetivo atuar nas propriedades reológicas das argamassas.

Um efeito secundário deste aditivo é diminuir a permeabilidade do material. A impermeabilidade neste caso é reforçada pelo fato do incorporador de ar formar alvéolos não interligados ao longo dos capilares oriundos da evaporação da água. Além disso, em função da incorporação de ar, as argamassas produzidas com este tipo de aditivo apresentam menor massa específica.

Destaca-se que o ar incorporado difere do ar aprisionado. Enquanto o ar aprisionado é constituído por bolhas de dimensões consideráveis, sendo que algumas destas aparecem junto ao molde, o ar incorporado é constituído por bolhas discretas quase esféricas. Em função de serem discretas não formam canais por onde o fluido possa escoar e logo não acarretam no aumento da permeabilidade do material poroso.

Os aditivos incorporadores de ar pertencem à classe química dos tensoativos, são materiais fortemente adsorvidos nas interfaces ar / líquido ou sólido / líquido. Possuem também uma dupla natureza devido a sua molécula apresentar uma porção polar (hidrófila) e outra apolar (hidrófoba), conforme ilustrado na *Figura 18*. Frequentemente, se descreve a região polar como a “cabeça” da molécula do tensoativo e a região apolar, a “cauda”. A “cauda”, geralmente, é formada por uma cadeia de hidrocarboneto, relativamente longa, com, aproximadamente, 8 ou 10 carbonos necessários para que o tensoativo tenha uma influência significativa na tensão superficial.



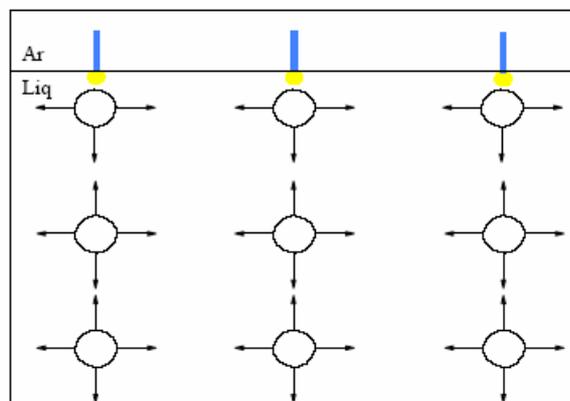
**Figura 17: Representação de uma molécula de tensoativo aniônico**

Fonte: ALVES (2002)

Os tensoativos podem ser classificados de acordo com a “cabeça” polar em:

- Catiônicos - se a “cabeça” apresentar uma carga positiva quando dispersos em água;
- Aniônicos - se a “cabeça” apresentar uma carga negativa quando dispersos em água;
- Zwitteriônicos - se a “cabeça” puder apresentar uma carga negativa ou positiva em função do pH da água;
- Não-iônicos - se a “cabeça” não possuir carga quando dispersos em água.

Quando uma molécula de tensoativo é adsorvida em uma interface, a natureza da molécula permite que as duas diferentes porções se arranjam de uma forma tal, que cada uma se direcione para a fase que possui afinidade. Ao se adicionar tensoativos a uma solução aquosa, a “cabeça” (que tem afinidade por água), fica na interface ar / água com esta porção na fase aquosa, enquanto que a “cauda” (que não tem afinidade pela água), é expulsa da água, ficando na fase ar (ver *Figura 18*). Assim, a molécula satisfaz à sua dupla natureza e é esta habilidade, que provoca a sua forte adsorção em interfaces e sua atuação na redução da tensão superficial.



**Figura 18: Representação da adsorção da molécula do tensoativo na interface ar /líquido, satisfazendo à sua dupla natureza**

Fonte: ALVES (2002)

Rixom e Mailvaganam (1999) apud Alves (2002) afirmam que os aditivos incorporadores de ar são, predominantemente, tensoativos aniônicos, os quais, quando adicionados às pastas de cimento, tendem a se adsorver nas partículas sólidas da pasta (cimento), através da sua parte polar (cabeça), com a parte apolar (cauda) voltada para a fase aquosa, dando um caráter hidrofóbico às partículas de cimento. A formação das bolhas de ar é, efetivamente, realizada pelos tensoativos que não foram adsorvidos e estão livres na fase aquosa. Embora a quantidade destes não seja necessariamente alta, sob agitação, serão formadas bolhas estáveis de ar, com aspecto de esferas microscópicas, resultantes da aglutinação das partes apolares (cauda) dos tensoativos.

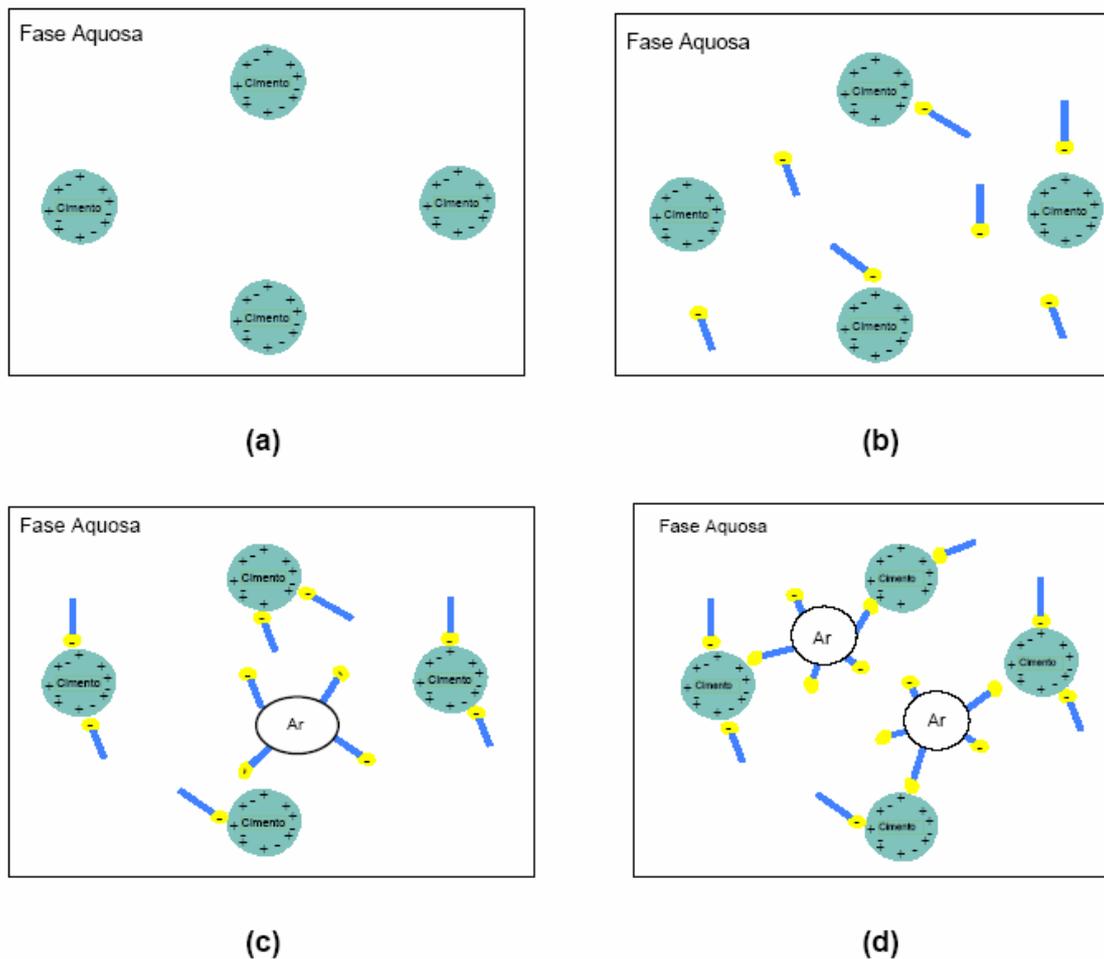
Apesar da literatura colocar que, apenas os tensoativos livres na fase aquosa são os que efetivamente produzem as bolhas de ar, alguns tensoativos, que estão adsorvidos ao cimento, também podem participar dessa produção. Caso isto aconteça, existirá uma ligação entre as partículas de cimento, chamada de “efeito ponte”. Como este efeito aumenta a estruturação do sistema, atribui-se a ele a maior viscosidade apresentada pelas pastas de cimento, que possuem ar incorporado, em relação às pastas com menor ou sem ar incorporado.

Estes mecanismos de atuação dos aditivos incorporador de ar são apresentados na *Figura 19*. Em (a) tem-se a formação da dupla camada elétrica nas partículas de cimento, em (b) a adsorção de parte dos tensoativos nas partículas de cimento; em (c) a aglutinação das extremidades apolares dos tensoativos formando as bolhas de ar e em (d) participação de tensoativos, que estão adsorvidos no cimento, na formação das bolhas, provocando o “efeito ponte”.

Na literatura é exposto que as bolhas de ar formadas possuem diâmetro inferior a 0,25 mm (250  $\mu\text{m}$ ).

As alterações das propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas por aditivos incorporadores de ar são apresentadas na *Tabela 3*.

Neville (1997) alerta que o ar incorporado pelo aditivo pode ser desestabilizado pelas partículas de carvão presentes nas cinzas. Isso pode ser devido à adsorção das bolhas de ar nas superfícies muito ativas das partículas de carvão.



**Figura 19: Representação esquemática dos mecanismos de atuação dos aditivos incorporadores de ar**

Fonte: ALVES (2002)

**Tabela 3: Alteração das propriedades das argamassas por incorporador de ar**  
(resumida da RILEM, 1992 apud MONTE et al., 2003)

Propriedades indicadas		Efeito do aditivo IA
<b>Estado fresco</b>	Índice de consistência	Aumenta para mesmo a/c
	Massa específica aparente	Diminui
	Teor de ar	Aumenta
	Retenção de água	Aumenta (reduz a exsudação)
<b>Estado endurecido</b>	Resistência mecânica	Diminui para mesmo a/c
	Resistência de aderência	Diminui para mesmo a/c *
	Absorção capilar	Diminui
	Retração por secagem	Igual ou aumenta
	Massa específica	Diminui
	Módulo de elasticidade	Diminui
	Durabilidade	Aumenta (ciclos de gelo/degelo)

\* Segundo Carasek, 1997.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais utilizados

#### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a realização do estudo experimental foi o cimento Portland com adição de filler calcário, CP-II-F, classe 32, marca Itambé. Foi escolhido esse tipo de cimento devido à ausência de adições não inertes como pozolanas e escórias, o que permite avaliar a ação pozolânica da cinza pesada. A caracterização do lote de cimento utilizado foi fornecida pelo fabricante, conforme apresentada na *Tabela 4*.

**Tabela 4: Laudo técnico do CP-II-F 32, marca Itambé, lote 06/2001**

<b>Ensaio físico</b>	<b>Unidade</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Peneira 200</b>	%	2,69	0,28	2,20	2,90
<b>Peneira 325</b>	%	11,98	0,81	11,10	13,5
<b>Blaine</b>	m <sup>2</sup> /kg	3213	19,09	3190	3240
<b>Água de consistência normal</b>	%	27,00	0,4	26,2	27,5
<b>Início de pega</b>	min	186	10,2	170	200
<b>Fim de pega</b>	min	248	8,9	235	255
<b>Expansão à quente</b>	mm	0,71	0,39	0,50	1,50
<b>Resistência 1 dia</b>	MPa	14,80	0,8	13,3	15,6
<b>Resistência 3 dias</b>	MPa	25,30	1,3	23,9	27,9
<b>Resistência 7 dias</b>	MPa	30,50	0,9	29,7	32,0
<b>Resistência 28 dias</b>	MPa	x	x	x	x
<b>Massa específica</b>	g/cm <sup>3</sup>	3,09			
<b>Ensaio químico</b>	<b>Unidade</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Perda ao fogo</b>	%	5,01	0,33	4,33	5,49
<b>SiO<sub>2</sub></b>	%	18,28	0,19	18,03	18,57
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	4,20	0,08	4,09	4,28
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	2,38	0,05	2,33	2,45
<b>CaO</b>	%	60,46	0,24	60,06	60,7
<b>MgO</b>	%	4,94	0,08	4,83	5,06
<b>CaO livre</b>	%	1,52	0,25	1,15	1,88
<b>SiO<sub>3</sub></b>	%	2,87	0,07	2,73	2,94
<b>Resíduo insolúvel</b>	%	1,24	0,22	0,88	1,45
<b>Equação alcalina</b>	%	0,58	0,02	0,55	0,61

A massa unitária do cimento foi determinada de acordo com a NBR7251/82 e o valor obtido para esta foi de 1,08 kg/dm<sup>3</sup>.

### 3.1.2 Cal

Fez-se uso de cal hidratada classificada pela NBR 7175/92 como tipo CH-III, da marca Minercal, produzida na unidade da Votorantim (SP), pertencente ao lote de Maio de 2002, adquirida no mercado de consumo. A caracterização do lote de cal utilizado foi fornecida pelo fabricante, conforme apresentada na *Tabela 5*.

**Tabela 5: Laudo técnico da cal CH-III, marca Minercal, lote 05/2002**

Análises	Resultados (%)	Limites NBR 7175 para cales tipo CH III
Perda ao fogo	28,40	-
CO <sub>2</sub>	11,80	≤13,0%
Água combinada	16,50	-
Umidade	3,10	-
SiO <sub>2</sub> + RI (Resíduo Insolúvel)	4,80	-
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,00	-
CaO	43,80	-
MgO	22,00	-
Óxidos totais	91,90	≥88,0%
Óxidos não hidratados	5,80	≤15,0%
Retenção de água	76,80	≥70,0%
Capacidade de incorporação de areia	1:2,75	≥1:2,20
Finura da peneira ABNT 30 (0,6 mm)	0,00	≤0,50%
Finura da peneira ABNT 200 (0,075 mm)	11,50	≤15,0%

A massa específica da cal foi determinada conforme a NBR 6474/84 e a massa unitária de acordo com a NBR7251/82. Os resultados destas determinações estão apresentados na *Tabela 6*.

**Tabela 6: Caracterização da cal**

Característica	Unidade	Média
Massa unitária	(kg/dm <sup>3</sup> )	0,77
Massa específica	(kg/dm <sup>3</sup> )	2,44

### 3.1.3 Agregados

#### 3.1.3.1 Ensaios para a caracterização dos agregados

Na *Tabela 7* são apresentados os ensaios que foram realizados para a caracterização da areia e da cinza pesada empregadas na confecção das argamassas. Destes ensaios, o de composição química, o de composição mineralógica e o de forma foram realizados apenas para a cinza pesada.

Para o ensaio de composição química fez-se uso do equipamento EDX da marca Shimadzu disponibilizado pelo Laboratório Valores do Departamento de Engenharia Civil.

**Tabela 7: Ensaios realizados para a caracterização dos agregados**

Propriedade	Ensaio/ Método
Composição química	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva
Composição mineralógica	Difração de Raios-X
Massa específica	Método do Picnômetro
Massa unitária	NBR7251/82
Composição granulométrica	NBR7217/87
Impurezas orgânicas	NBR7220/87
Teor de material pulverulento	NBR7219/87
Perda de massa ao fogo	NBR5743/77
Análise de forma	Microscopia eletrônica de varredura

Já para o ensaio de composição mineralógica foi utilizado o equipamento de difração de raio-x da Rigaku – Miniflex, disponibilizado pelo Laboratório de Síntese e Caracterização de Materiais do Departamento de Física da UFSC, com radiação de cobre ( $\lambda=1,5456$ ), tensão de 30 kV e corrente elétrica 15 mA. As condições da análise foram: passo de  $0,05^\circ$ , tempo de passo 1s e intervalo de medida, em  $2\theta$ , de 10 a  $95^\circ$ . A amostra de cinza foi analisada na forma de pó com granulometria inferior a  $75 \mu\text{m}$ . Para a identificação das fases presentes na cinza e de dados estruturais destas fases (parâmetros de célula, posições atômicas e grupo espacial) utilizou-se o “Inorganic Crystal Structure Database” (ICSD).

Para a quantificação das fases presentes na cinza foi empregado o Método de Rietveld que é um método de refinamento de estruturas cristalinas, que faz uso de dados de difração de raios X ou de neutrões, por pó. O termo refinamento no método de Rietveld refere-se ao processo de ajuste do modelo de parâmetros utilizados no cálculo de um padrão de difração, que seja o mais próximo do observado. O difratograma observado deve ser obtido num processo de varredura passo a passo com incremento de 2 teta constante. As diferenças entre os dois difratogramas são calculadas segundo o método dos mínimos quadrados, sendo esta diferença minimizada à medida que o modelo teórico aproxima-se das características da estrutura.

O programa computacional utilizado para aplicação deste método foi o “General Structure Analysis System” (GSAS).

Quanto ao ensaio para análise da forma da cinza pesada, fez-se uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV) disponibilizado pelo Laboratório de Caracterização Microestrutural do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

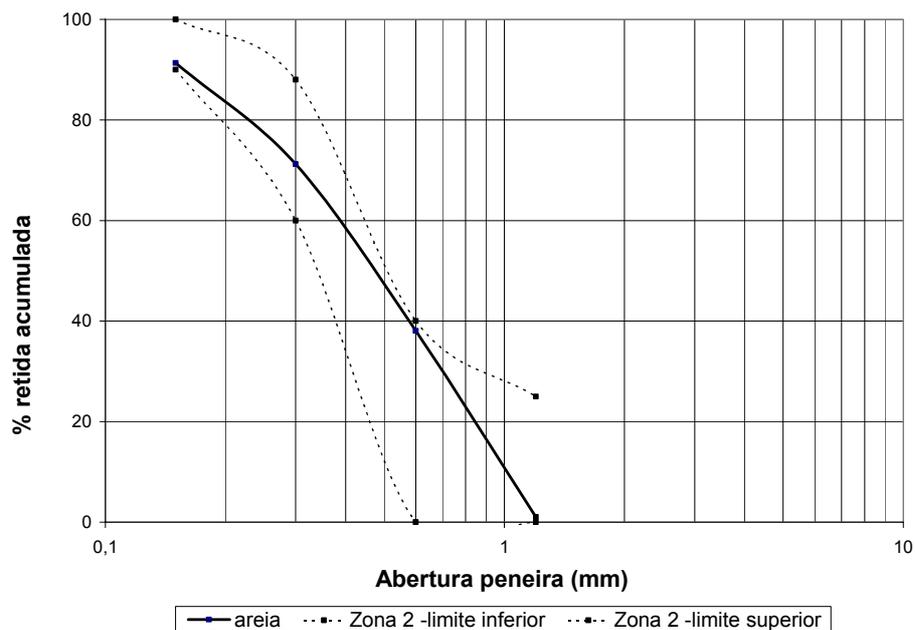
### 3.1.3.2 Areia

A areia natural utilizada é proveniente da região da grande Florianópolis e possui origem de rio. Seu uso deveu-se a disponibilidade e em função desta representar bem as características das areias da região. A análise granulométrica desta areia está apresentada na *Tabela 8*.

**Tabela 8: Análise granulométrica da areia**

Peneiras (mm)	Porcentagens		
	% Retida	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
2,4	0	0	100
1,2	1	1	99
0,6	37	38	62
0,3	33	71	29
0,15	20	91	9
Fundo	9	100	0
<b>Dimensão máxima característica</b>	1,2 mm		
<b>Dimensão mínima característica</b>	< 0,15 mm		
<b>Módulo de finura</b>	2,02		
<b>Classificação NBR 7211</b>	Zona 2 (fina)		

Conforme verificado no gráfico da *Figura 20* esta areia é classificada, segundo a NBR7211/83, como areia fina (Zona 2).



**Figura 20: Distribuição granulométrica da areia**

Na *Tabela 9* são apresentadas as principais características da areia. No que diz respeito a quantidade de material pulverulento admissível a NBR7219/87 estipula o limite de 5% para os agregados naturais, assim sendo a areia atende este limite. Já em se tratando de matéria orgânica, descartou-se a suspeita desta areia poder causar efeitos danosos ao material cimentício em função da presença de matéria orgânica. No entanto, verifica-se a presença de matéria orgânica nesta através do valor obtido no ensaio de perda de massa ao fogo.

**Tabela 9: Características da areia**

Característica	Unidade	Média
Massa unitária	(kg/dm <sup>3</sup> )	1,41
Massa específica	(kg/dm <sup>3</sup> )	2,57
Material Pulverulento	(%)	4,08
Matéria Orgânica	ppm	<300
Perda de massa ao fogo	(%)	1,15

### 3.1.3.3 Cinza pesada

A cinza pesada utilizada nesta pesquisa é oriunda da esteira da Unidade C do Complexo Termelétrico de Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo em Santa Catarina. Esta cinza é denominada no presente trabalho por JL.CZPCE.

Na *Figura 21* é apresentado em (a) a esteira que transporta a cinza que sai do forno, em (b) o funil vertical ao qual a esteira está conectado, em (c) a cinza pesada saindo do funil juntamente com a água que é utilizada para facilitar o transporte desta e em (d) a cinza sendo coletada e armazenada em caixas d'água de volume de 500 litros para a realização de pesquisas pelo Grupo ValoRes sobre aplicações tecnológicas deste sub-produto na indústria da construção civil.



(a)



(b)



(c)



(d)

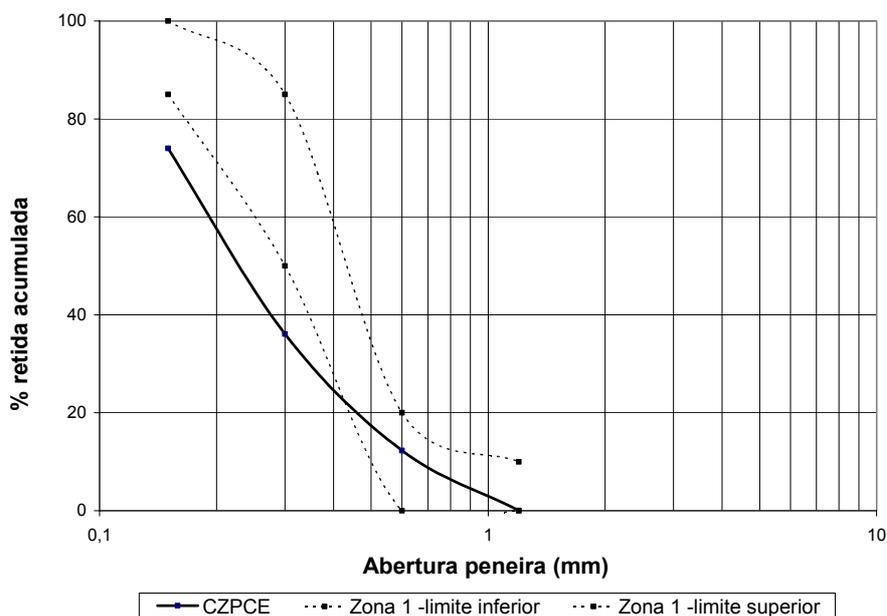
**Figura 21: Vista da coleta de cinza da esteira da Unidade C**

A análise granulométrica desta cinza está apresentada na *Tabela 10*.

**Tabela 10: Análise granulométrica da cinza pesada**

Peneiras (mm)	Porcentagens		
	% Retida	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
2,4	0	0	100
1,2	0	0	100
0,6	12	12	88
0,3	24	36	64
0,15	38	74	26
Fundo	26	100	0
<b>Dimensão máxima característica</b>	1,2 mm		
<b>Dimensão mínima característica</b>	< 0,15 mm		
<b>Módulo de finura</b>	1,22		
<b>Classificação NBR 7211</b>	não é classificada		

Conforme verificado no gráfico da *Figura 22* esta cinza pesada não se enquadra nas classificações propostas pela NBR7211/83 para agregados miúdos, apresentando quantidade de finos superior aos limites estabelecidos pela Zona 1 (muito fina).



**Figura 22: Distribuição granulométrica da CZP**

Na *Tabela 11* são apresentadas as principais características da cinza pesada. No que diz respeito a quantidade de material pulverulento admissível a NBR7219/87 estipula o limite de 5% para os agregados naturais, assim sendo a cinza extrapola este limite. Já os valores de massa unitária e massa específica da cinza pesada: 0,61 kg/dm<sup>3</sup> e 1,80 kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente são bastante inferiores aos valores encontrados para a areia 1,41 kg/dm<sup>3</sup> e 2,57 kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente. Desta maneira, a cinza pesada constitui um material de massa específica reduzida quando comparado com a areia, ou seja, pode ser considerado como sendo um agregado leve.

No ensaio de perda de massa ao fogo, obteve-se a quantidade de material incombusto no processo de queima do carvão mineral que é 4,44% e é atribuído a presença de carbono.

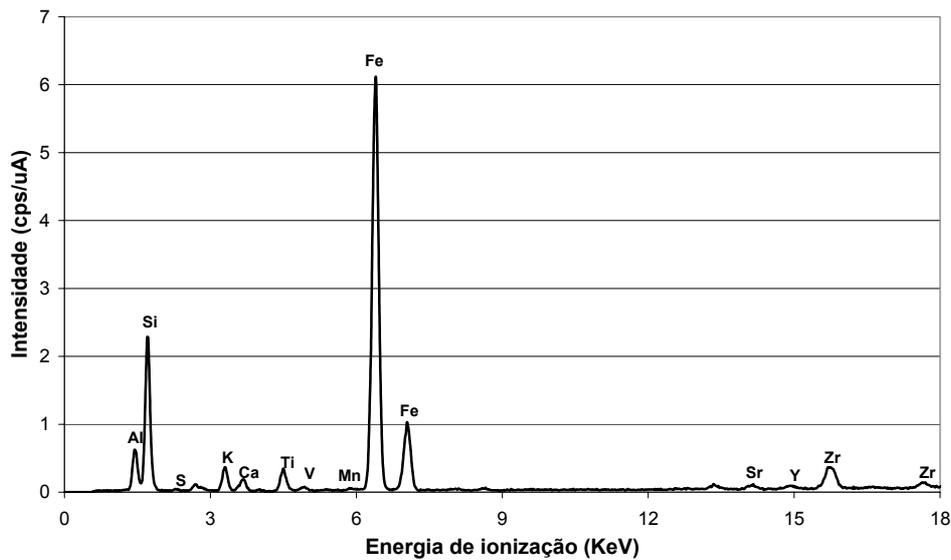
**Tabela 11: Características da cinza pesada**

Característica	Unidade	Média
Massa unitária	(kg/dm <sup>3</sup> )	0,61
Massa específica	(kg/dm <sup>3</sup> )	1,80
Material Pulverulento	(%)	9,81
Perda de massa ao fogo	(%)	4,44

Na *Tabela 12* é apresentada a composição química e na *Figura 23* o espectro por energia dispersiva da cinza pesada. Através destes é possível verificar que a cinza pesada é composta principalmente por óxidos de silício, alumínio, potássio e ferro, e que pertence a classe F segundo a ASTM C618.

**Tabela 12: Composição química da cinza pesada**

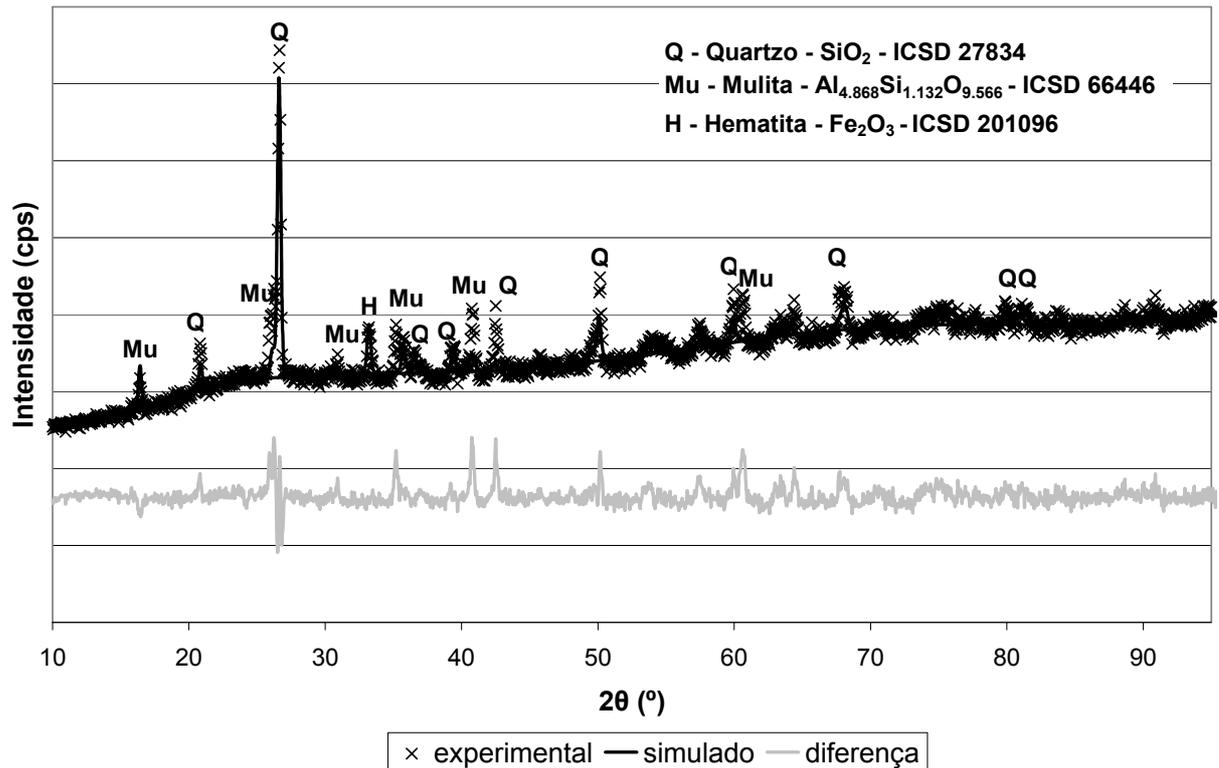
Análise	(%)	Análise	(%)
SiO <sub>2</sub>	41,789	SnO <sub>2</sub>	0,046
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38,209	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,031
K <sub>2</sub> O	9,043	SO <sub>3</sub>	0,029
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,366	MnO	0,026
TiO <sub>2</sub>	0,810	ZnO	0,014
CaO	0,698	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,013
MgO	0,402	SrO	0,013
ZrO <sub>2</sub>	0,071	CO <sub>2</sub>	4,44



**Figura 23: Espectro por energia dispersiva da cinza pesada**

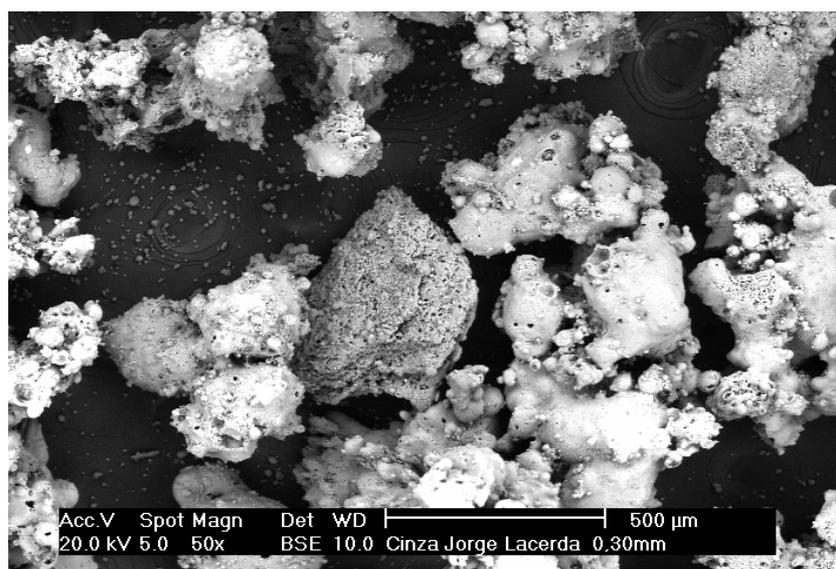
Na *Figura 24* são apresentados os difratogramas simulado e experimental da cinza pesada, bem como a diferença entre estes. Através destes é possível verificar que existe uma boa concordância entre o simulado e o experimental através do valor obtido para o  $W_{Rp}$  (7,23%), que é um índice estatístico que mede a qualidade do refinamento e que para bons resultados deve estar entre 2% e 10%. Além disso, pôde-se determinar os seguintes percentuais relativos, em peso, das fases presentes na cinza pesada: quartzo (31,96%), mulita (59,22%) e hematita (8,82%).

Quanto ao termo percentuais relativos das fases presentes, deve-se ao fato de não estar sendo considerada a fase amorfa presente na cinza pesada, embora na bibliografia seja mencionado que esta é em torno de 50% no caso das cinzas oriundas da queima do carvão mineral. Tratando-se da cinza analisada, a presença da fase amorfa pode ser constatada por meio do intenso “background” presente no difratograma.



**Figura 24: Difratomogramas da cinza pesada de carvão mineral: experimental e simulado pelo método de Rietveld**

Na *Figura 25* é apresentada a imagem da cinza pesada obtida no MEV. através da qual é possível observar que as cinzas apresentam forma de esferas ou de aglomerados de esferas, e que possuem microporosidade.



**Figura 25: Imagem da cinza pesada obtida no MEV – aumento de 50 vezes**

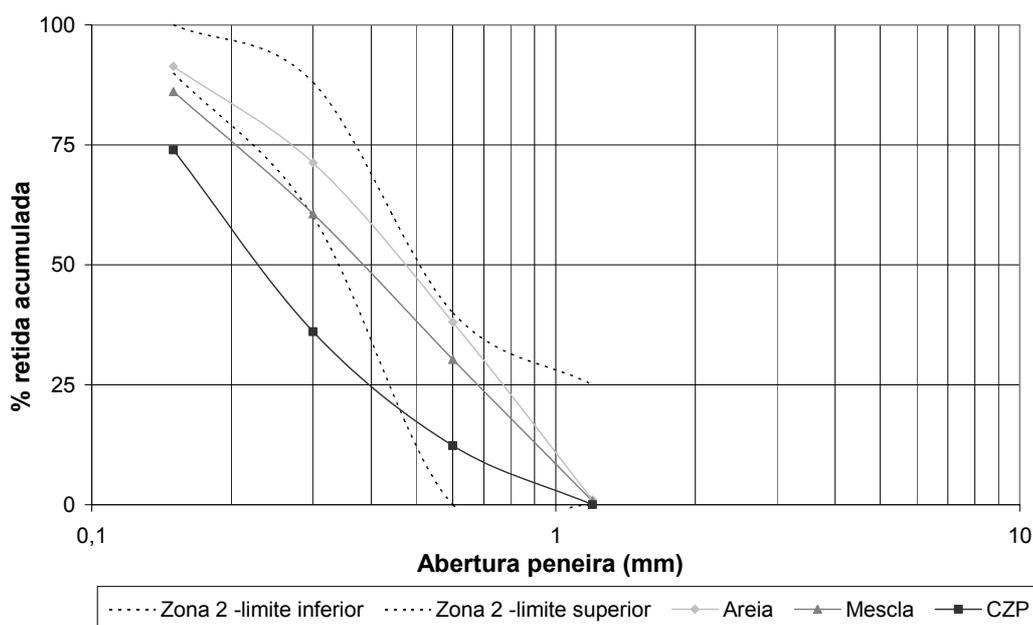
### 3.1.3.4 Composição dos agregados

Na *Tabela 13* é apresentada a análise granulométrica das areias e da CZP obtidas experimentalmente, bem como a mescla de 50% de areia e 50% de CZP, em volume, estimada por meio de cálculo (teórica).

**Tabela 13: Análise granulométrica das composições dos agregados**

Peneiras (mm)	Areia	CZPCE	Mescla
	% Retida Acumulada		
2,4	0	0	0
1,2	1	0	1
0,6	38	12	30
0,3	71	36	61
0,15	91	74	86
Fundo	100	100	100
<b>Dimensão máxima característica</b>	1,2 mm	1,2 mm	1,2 mm
<b>Dimensão mínima característica</b>	< 0,15 mm	< 0,15 mm	< 0,15 mm
<b>Módulo de finura</b>	2,02	1,22	1,78
<b>Classificação NBR 7211</b>	Zona 2 (fina)	não é classificada	Zona 2 (fina)

Na *Figura 26* é apresentada a distribuição granulométrica dos agregados empregados nas argamassas, bem como os limites superior e inferior da Zona 2 (fina) da classificação proposta pela NBR7211/83 para agregado miúdo. Como pode ser observado, a mescla possui granulometria ligeiramente mais fina do que a da areia, isto ocorre em função da substituição ter sido realizada em volume. A mesma constatação pode ser realizada através da análise do módulo de finura.



**Figura 26: Distribuição granulométrica dos agregados das argamassas**

### 3.1.4 Incorporador de ar

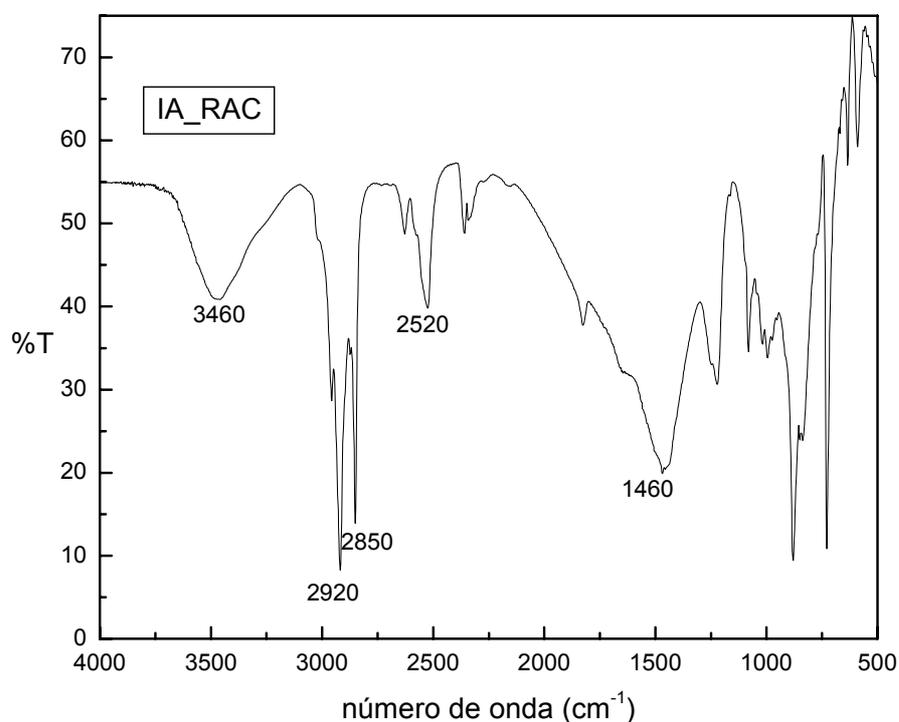
Neste estudo experimental foi utilizado o seguinte aditivo em pó: incorporador de ar da marca Racicol.

Para a caracterização deste aditivo foi obtido o seu espectro por infra-vermelho que está apresentado na *Figura 27*. A amostra representativa do aditivo foi conformada em pastilha de KBr e analisada no espectrofotômetro de BOMEM FT-IR, modelo MB-100.

Através da análise do infra-vermelho tem-se que as seguintes posições de banda em  $\text{cm}^{-1}$  representam os seguintes grupos ou ligação:

- 3460: hidroxilas (OH);
- 2920 e 2850: grupo  $\text{CH}_x$ ;
- 2520: composto inorgânico (Na);
- 1460: grupo  $\text{CH}_x$  e  $\text{CO}_3$ .

Além disso determinou-se a perda de massa ao fogo deste aditivo, sendo que esta foi bastante elevada: 49,59%.



**Figura 27: Infravermelho do incorporador de ar**

### 3.1.5 Água

Para a fabricação das argamassas será utilizada água da rede pública local, fornecida pela CASAN (SC).

## 3.2 Programa experimental

Visou-se a confecção de argamassas de acordo com o processo de produção das argamassas pré-misturadas a seco para determinação das propriedades de interesse.

O programa experimental consistiu nas seguintes etapas:

- 1º) definição e caracterização dos materiais empregados na pesquisa;
- 2º) determinação de uma relação a/c comum para todas as argamassas com suporte nos dados obtidos para a consistência;
- 4º) confecção das argamassas ;
- 5º) determinação das propriedades das argamassas no estado fresco;
- 6º) montagem dos aparatos experimentais e preparação dos equipamentos necessários para a determinação das propriedades das argamassas;
- 7º) realização de ensaios para a determinação das propriedades das argamassas no estado endurecido, com ênfase nas propriedades higrotérmicas.

Para o desenvolvimento deste programa experimental, as atividades foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção e no Grupo ValoRes (Grupo de Pesquisa sobre a Valorização de Resíduos na Construção Civil) do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

A determinação das propriedades no estado endurecido foi realizada em amostras com 28 dias de idade.

Na *Figura 28* é apresentado de forma esquematizada o programa experimental anteriormente deflagrado em etapas.

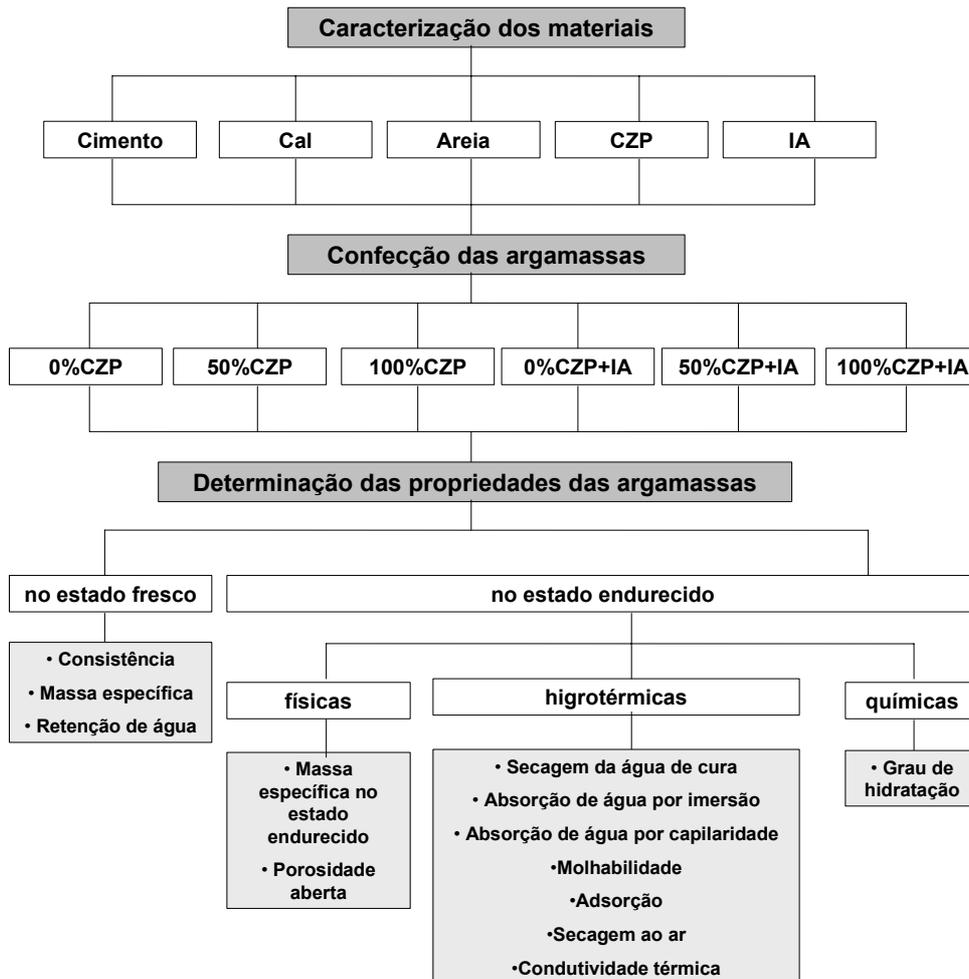


Figura 28: Esquema geral do programa experimental

### 3.2.1 Produção das argamassas

Foram produzidas argamassas a partir do traço base, em massa, de 10% de cimento, 20% de cal e 70% de areia. A partir deste traço denominado de Referência (0% CZP) trabalhou-se com os teores de substituição de areia por cinza pesada de 50% e 100%.

A substituição de areia por cinza pesada foi feita em volume através da seguinte relação entre as massas unitárias no estado solto:

$$m_{CZP} = \frac{d_{CZP}}{d_{areia}} \times m_{areia} \quad [3.1]$$

Este traço base não é convencional e foi adotado em virtude de conferir uma argamassa sem pulverulência na superfície e sem fissuras ocasionadas pela perda de água, qualificando tecnologicamente a cinza pesada para a produção de argamassas.

O traço, em massa, bem como a nomenclatura das argamassas está apresentado na *Tabela 14*.

**Tabela 14: Traço das argamassas, em massa**

Traço em massa	Cimento	Cal	Areia	CZP	IA
<b>0% CZP</b>	1	2	7	0	0
<b>50% CZP</b>	1	2	3,5	1,51	0
<b>100% CZP</b>	1	2	0	3,03	0
<b>0% CZP + IA</b>	1	2	7	0	0,00030
<b>50% CZP + IA</b>	1	2	3,5	1,51	0,00024
<b>100% CZP + IA</b>	1	2	0	3,03	0,00018

Nota: Quantidade de aditivo incorporador de ar: 0,03% da massa total de material seco

Quantidade de aditivo em relação a massa de cimento: 0,30%, 0,24% e 0,18%, respectivamente para os teores de 0%, 50% e 100% de CZP.

No que diz respeito à quantidade de água, esta foi determinada em função de análise qualitativa da trabalhabilidade, usando-se o ensaio da mesa de consistência (“flow table”) estabelecido pela NBR13276/95 apenas como referência. Procurou-se por meio de tentativas uma relação água/cimento que satisfizesse os três traços sem incorporador de ar propostos na presente pesquisa. Assim sendo o valor encontrado para a relação a/c foi de 2,29.

O traço base, em volume, das argamassas, com e sem incorporador de ar, foi 1:2,81:5,36:0 (cimento: cal: agregado) conforme apresentado na *Tabela 15*. Quanto a relação a/c foi de 2,47.

**Tabela 15: Traço das argamassas, em volume**

Traço em volume	Cimento	Cal	Areia	CZP
<b>0% CZP</b>	1	2,81	5,36	0
<b>50% CZP</b>	1	2,81	2,68	2,68
<b>100% CZP</b>	1	2,81	0	5,36

Na *Tabela 16* são apresentadas as relações água/cimento, água/aglomerantes e água/materiais secos, em massa e em volume, para as argamassas estudadas, sendo que estes valores são válidos tanto para as argamassas com e sem incorporador de ar.

**Tabela 16: Relação dos materiais em massa e em volume**

Teor de substituição	Relações em massa			Relações em volume		
	a/c	a/aglomerantes	a/mat.secos	a/c	a/aglomerantes	a/mat.secos
<b>0% CZP</b>	2,29	0,76	0,23	2,47	0,65	0,27
<b>50% CZP</b>	2,29	0,76	0,29	2,47	0,65	0,27
<b>100% CZP</b>	2,29	0,76	0,38	2,47	0,65	0,27

Para a preparação destas argamassas foi utilizado um misturador mecânico especificado na NBR 7215/82 para volumes inferiores a dois litros. Para volumes maiores utilizou-se um misturador mecânico contendo uma cuba de aço inoxidável com capacidade aproximada de dez litros.

Os materiais secos juntamente com a água foram misturados mecanicamente na velocidade baixa durante um minuto. Então, promoveu-se a mistura mecânica na velocidade alta por mais um minuto. Desligou-se o misturador e por trinta segundos, com o auxílio de uma espátula, foram removidos materiais segregados das laterais da cuba e da pá para o interior da cuba, deixando a mistura descansar por mais trinta segundos. Logo após esse intervalo, para finalizar a preparação da argamassa, a mistura mecânica foi efetuada por mais um minuto em velocidade alta.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos nas dimensões de 5x10 cm e de 4x4x16 cm, respectivamente. Os seguintes cuidados durante a moldagem foram adotados: uso, de filme plástico em substituição ao óleo, e adensamento dos moldes realizado por meio de mesa de queda livre. Os corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram preenchidos em três e duas camadas respectivamente, sendo que cada camada foi submetida a quinze quedas na mesa de moldagem.

Durante 24 horas os corpos-de-prova foram mantidos em seus moldes, em ambiente de laboratório, com a base superior protegida com uma plaqueta de vidro a fim de evitar-se a evaporação de água da argamassa.

Após este período foi feita a desmoldagem e os corpos-de-prova foram envolvidos por filme plástico parafinado seguido de papel de alumínio a fim de evitar-se trocas gasosas e líquidas com o meio externo, e assim mantidos até a idade de 28 dias sob temperatura e umidade relativa controlada de  $23\pm 1^{\circ}\text{C}$  e  $55\pm 5\%$ , respectivamente.

Ao completarem os 28 dias as amostras foram secas em estufa ventilada (modelo 400 D, marca Nova Ética) a 50°C até ser atingida a constância de massa que foi considerada como ocorrendo quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, ou seja, distantes de 24 horas, fosse inferior a 0,1% da média dos valores das duas leituras consecutivas. Já o resfriamento destas amostras deu-se no interior de dessecadores na presença de sílica-gel.

### 3.2.2 Ensaaios nas argamassas

Na *Tabela 17* são apresentadas as propriedades das argamassas a serem abordadas na presente pesquisa e as normas utilizadas para a determinação destas, sendo que para a determinação de algumas destas propriedades foram utilizados procedimentos experimentais. Estes procedimentos são abordados detalhadamente nos itens que seguem do presente capítulo.

**Tabela 17: Propriedades das argamassas e ensaios realizados**

		Ensaio
<b>Propriedades no estado fresco</b>	Consistência	NBR13276/95
	Capacidade de retenção de água	NBR9287/86
	Massa específica no estado fresco	NBR13278/95
<b>Propriedades físicas no estado endurecido</b>	Massa específica	NBR13280/95 e Procedimento experimental
	Porosidade aberta	NBR9778/87
<b>Propriedades higrotérmicas no estado endurecido</b>	Secagem da água de cura	Procedimento experimental
	Absorção de água por imersão	NBR9778/87
	Absorção de água por capilaridade	Procedimento experimental
	Ângulo de molhamento aparente	Procedimento experimental
	Secagem ao ar	Procedimento experimental
	Adsorção	ASTM C 1498-01
<b>Propriedades químicas no estado endurecido</b>	Condutividade térmica	Procedimento experimental
	Grau de Hidratação	Procedimento experimental

### 3.2.2.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

As propriedades das argamassas abordadas no estado fresco são: consistência, massa específica aparente e capacidade de retenção de água, que são propriedades usualmente determinadas através da normalização brasileira pertinente.

Quanto a retenção de água a norma ASTM C270-82 fixa limite mínimo para retenção de água em argamassas de cimento e cal em 75%. Ressalta-se que a ABNT não fixa os valores mínimos a serem atendidos. No entanto, na Bibliografia Nacional, alguns autores consideram 80% como um valor bom para a capacidade de retenção de água, baseando-se na experiência de laboratório e nas observações em canteiro de obra

Na *Figura 29* está ilustrado o Funil de Buchner modificado utilizado no ensaio para determinação da capacidade de retenção de água.



**Figura 29: Aparato utilizado no ensaio de retenção de água**

### 3.2.2.2 Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido

As propriedades físicas das argamassas no estado endurecido abordadas foram : massa específica aparente e porosidade aberta.

A massa específica no estado endurecido foi determinada através de dois procedimentos distintos, os quais diferem apenas na forma de determinação do volume da amostra, sendo que estes foram geometricamente e por volume de mercúrio deslocado. O método geométrico foi realizado conforme proposto pela NBR13280/95.

Já o método que empregou o mercúrio consistiu na determinação da relação da massa da amostra (medida através da utilização de balança com precisão de 0,001 g) e o volume da amostra determinado através da imersão desta em mercúrio. O aparato experimental utilizado para esta determinação está apresentado na *Figura 30*.



**Figura 30: Aparato utilizado para a determinação da massa específica das amostras**

O valor adotado para a massa específica aparente do mercúrio foi de  $13,546 \text{ g/cm}^3$  e o recipiente de vidro utilizado possuía o seguinte volume:  $154,784 \text{ cm}^3$ . Como pode ser observado na *Figura 30* a placa que foi utilizada para a rasadura do mercúrio possui três pinos, sendo que estes têm como função empurrar a amostra para que esta seja completamente imersa no volume de mercúrio.

A porosidade foi determinada conforme proposto pela NBR9778/87 através do ensaio de absorção de água por imersão.

### **3.2.2.3 Propriedades higrotérmicas das argamassas**

As propriedades higrotérmicas abordadas na presente pesquisa foram: secagem da água de cura, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, ângulo de molhamento, adsorção, secagem ao ar e condutividade térmica.

### 3.2.2.3.1 Secagem da água de cura

Os resultados de secagem da água de cura foram obtidos durante o processo de preparação das amostras com 28 dias de idade para a determinação das propriedades no estado endurecido, sendo que este processo consistiu na secagem em estufa a 50°C na presença de sílica-gel.

A amostragem consistiu para cada argamassa em duas amostras cilíndricas 5x10 cm e duas amostras prismáticas 4x4x16 cm.

### 3.2.2.3.2 Absorção de água por imersão

Através do ensaio de absorção de água por imersão foi possível determinar a cinética de saturação e a porosidade aberta.

Este ensaio foi realizado conforme a NBR9778/87. As modificações realizadas neste ensaio dizem respeito apenas aos intervalos de pesagem e as dimensões das amostras cilíndricas: 5x5 cm (metade dos corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm).

O aparato experimental do ensaio está ilustrado na *Figura 31*, na qual as fotos referem-se respectivamente as primeiras quatro horas (somente um terço do volume das amostras foi mantido imerso) e após oito horas do início do ensaio (as amostras estavam completamente imersas).



**Figura 31: Ensaio de absorção de água por imersão**

A porosidade aberta foi determinada através da seguinte formulação:

$$\eta = \frac{(B - A)}{(B - D)} \times 100 \quad [3.1]$$

onde:

A é a massa seca da amostra;

B é a massa da amostra saturada em água com superfície seca;

D é a massa da amostra imersa em água através do emprego de balança hidrostática.

Cabe mencionar que em todos os ensaios realizados na argamassas em que fez-se uso de água, a exemplo deste, utilizou-se água destilada e deionizada, obtida por meio dos seguintes equipamentos: deionizador de água da marca Permution e destilador de água tipo Pilsen, marca Quimis.

Como deficiência deste ensaio pode-se mencionar que a primeira leitura é feita apenas quatro horas após o início do ensaio. No entanto, é ao longo deste período que ocorre a absorção mais significativa de água.

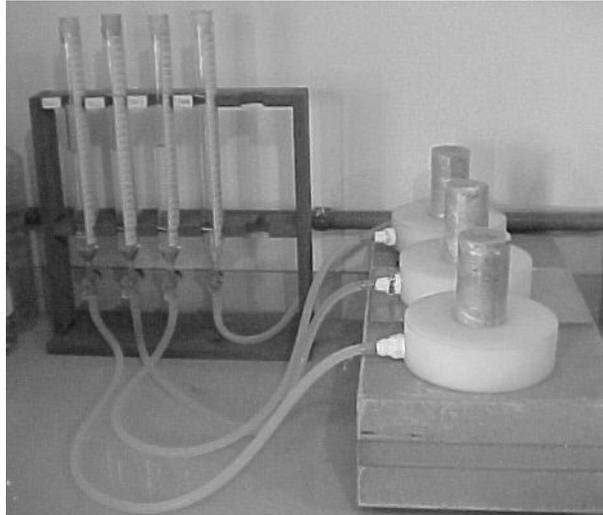
Como na presente pesquisa buscou-se com este ensaio principalmente a saturação, pois a cinética de absorção poderia também ser analisada no ensaio de absorção de água por capilaridade, não se teve prejuízos decorrentes desta deficiência.

### ***3.2.2.3.3 Absorção de água por capilaridade***

No ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade foi adotado um procedimento utilizado pelo grupo Valores, mencionado por Santos et al. (2004), que consiste na medida da variação da altura em função do tempo de uma coluna de água contida em um tubo de Mariotte graduado, sendo que esta variação da altura da coluna de água está diretamente relacionada com a quantidade de água absorvida pela amostra. Logo, a carga hidráulica no tubo é nula. O interessante deste procedimento é a possibilidade da realização de medidas consecutivas para cada unidade de volume ingressado na amostra.

Para minimizar-se a evaporação de água através da superfície do corpo-de-prova as amostras tiveram suas faces laterais envolvidas com filme PVC.

O aparato utilizado para a realização deste ensaio está ilustrado na *Figura 32*. A menor leitura possível neste aparato é de um volume de cerca de 0,5 cm<sup>3</sup>.



**Figura 32: Aparato utilizado no ensaio de absorção capilar**

#### ***3.2.2.3.4 Ângulo de molhamento***

Para determinação do ângulo de molhamento aparente foi utilizado o mesmo aparato do ensaio de absorção de água por capilaridade. A única modificação consiste na substituição da água destilada e deionizada por álcool etílico. As amostras utilizadas foram as mesmas do ensaio com água, e encontravam-se inicialmente secas.

#### ***3.2.2.3.5 Secagem ao ar***

Para o ensaio de secagem ao ar as amostras, previamente saturadas através de imersão em água fria por 72 horas, foram secas em condições controladas de temperatura e umidade relativa ( $T=25\pm 3^{\circ}\text{C}$  e  $UR=60\pm 5\%$ ). Em tratando-se destas faixas de umidade relativa e temperatura, segundo Metha; Monteiro (1994), apenas a água capilar e adsorvida presentes na mistura são retiradas, pois os outros tipos de água: água inter-lamelar e água quimicamente combinada somente são perdidas quando a umidade relativa é inferior a 11% e em temperaturas elevadas, respectivamente.

A secagem foi efetuada até que a constância de massa fosse atingida entre duas pesagens consecutivas, ou seja, distantes entre si por 24 horas.

### 3.2.2.3.6 Adsorção

Foram abordadas apenas as isotermas de adsorção, e não as de dessorção, por motivos de disponibilidade de tempo.

Para a determinação destas foram empregados sete diferentes sais: hidróxido de potássio (KOH), acetato de potássio ( $\text{KCH}_3\text{CO}_2$ ), cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), bicromato de sódio ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), nitrito de sódio ( $\text{NaNO}_2$ ), cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ). Tais sais a temperatura de  $50^\circ\text{C}$  forneceram os seguintes valores de umidade relativa: 6, 20, 31, 47, 65, 76 e 96%, respectivamente.

Na *Figura 33* está ilustrado o aparato experimental utilizado.

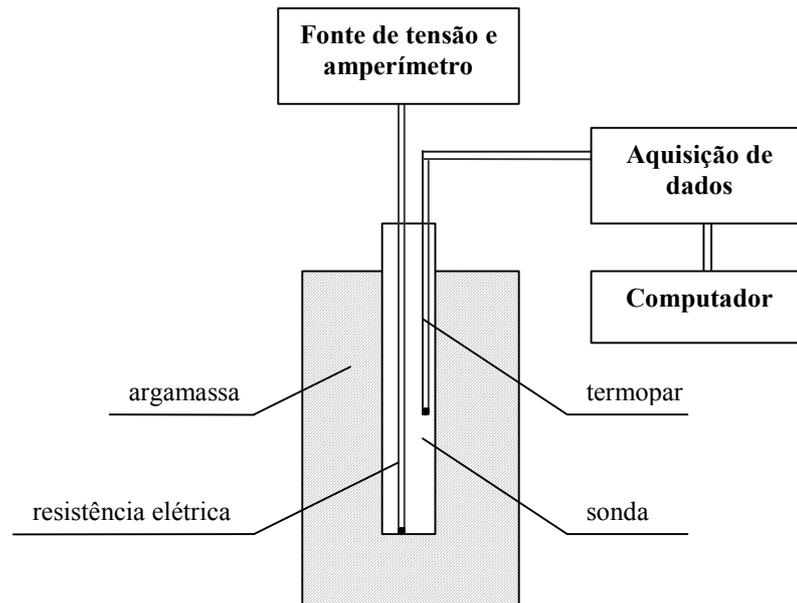


**Figura 33: Aparato experimental do ensaio de adsorção**

### 3.2.2.3.7 Condutividade térmica

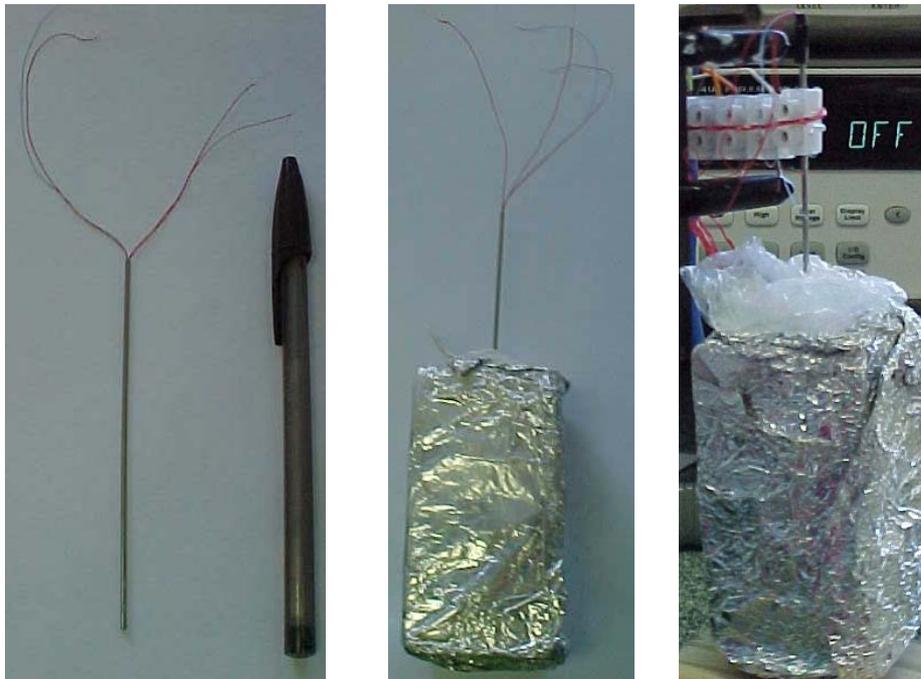
Para a medida da condutividade térmica utilizou-se aparato experimental semelhante ao apresentado por Fernandes; Phillipi & Pedrini (1991), conforme esquematizado na *Figura 34*.

O emprego deste aparato, ao invés do aparato da placa quente protegida que têm sido usualmente empregado no Brasil para medidas de condutividade térmica, deve-se ao seu menor custo e a rapidez das medições realizadas, o que permite que amostras com diferentes conteúdos de umidade sejam ensaiadas.



**Figura 34: Aparato experimental para a determinação da condutividade térmica**

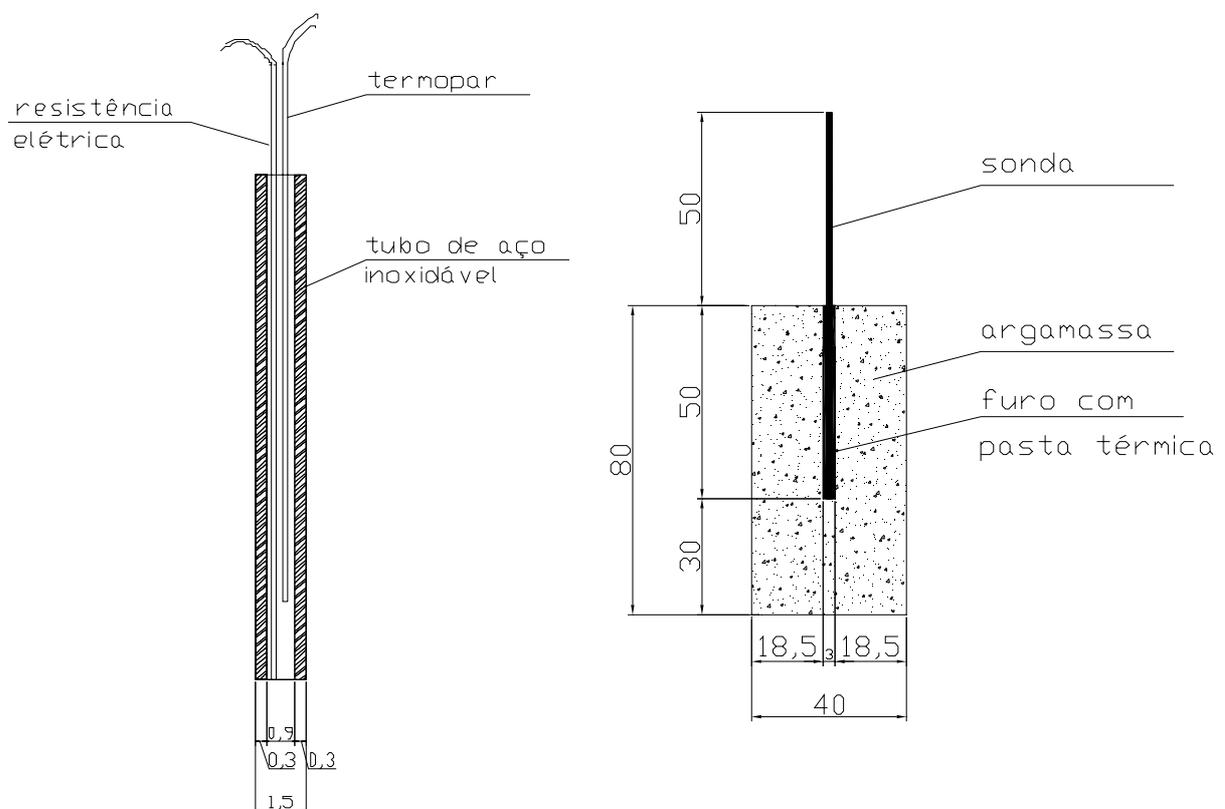
A sonda térmica utilizada está ilustrada na *Figura 35*.



**Figura 35: Sonda utilizada para a determinação da condutividade térmica**

Na *Figura 36* a sonda térmica está apresentada detalhadamente. Como pode ser observado o corpo da sonda foi feito com um tubo de aço inoxidável, que é um material resistente à corrosão, com diâmetro interno de 0,9 mm e externo de 1,5 mm, e comprimento de cerca de 100 mm. A resistência elétrica constitui-se de um fio de constantan de 0,07 mm de diâmetro com isolamento de teflon (fio vermelho). Já o termopar constitui-se de cobre-Constantan (fios azul e vermelho, respectivamente), cujos fios também possuem 0,07 mm de diâmetro e isolamento de teflon. Estes fios foram adquiridos na *Omega Engineering Inc.* Os espaços vazios existentes no interior do corpo da sonda foram preenchidos com pasta térmica. Tapou-se o fundo da sonda térmica com resina epóxi.

A sonda foi introduzida na amostra de argamassa por meio de um furo com aproximadamente 3 mm de diâmetro e 50 mm de profundidade, e o espaço vazio foi preenchido com pasta térmica Implastec, a base de silicone e condutividade térmica de 2,0 W/mxK, para evitar a convecção de ar e atenuar a resistência de contato sonda-material.



**Figura 36: Detalhes da sonda térmica com dimensões dadas em mm**

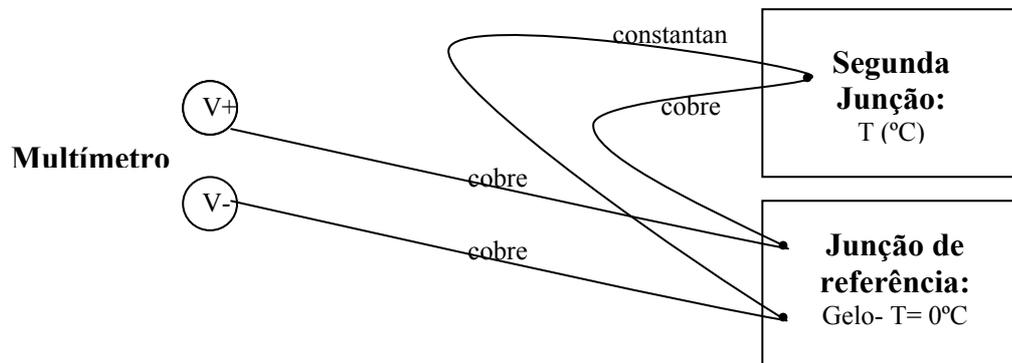
Inicialmente procedeu-se a calibração do termopar da sonda, sendo que este era do tipo T (cobre-Constantan). Para a calibração do termopar a junção de referência foi colocada em um banho de gelo picado mantido no interior de um recipiente isolado termicamente (garrafa térmica). Com isso a junção de referência foi mantida a temperatura de 0°C. A segunda junção foi posicionada também em uma garrafa térmica contendo inicialmente água aquecida a cerca de 60°C. Durante a calibração a água foi gradualmente resfriada com a adição de gelo. Para a homogeneização da água foi usado um misturador. A temperatura nesta segunda junção foi medida através do uso de um termômetro com precisão 0,1°C que faz parte de um equipamento para medida de viscosidade. A montagem deste aparato experimental esta ilustrado na *Figura 37*.

O sinal de resposta (a diferença de potencial em mV) do termopar foi medida através de um multímetro digital (HP, modelo 34401 A, resolução 0,1  $\mu$ V), sendo que o sinal varia em função da diferença de temperatura entre as duas junções.



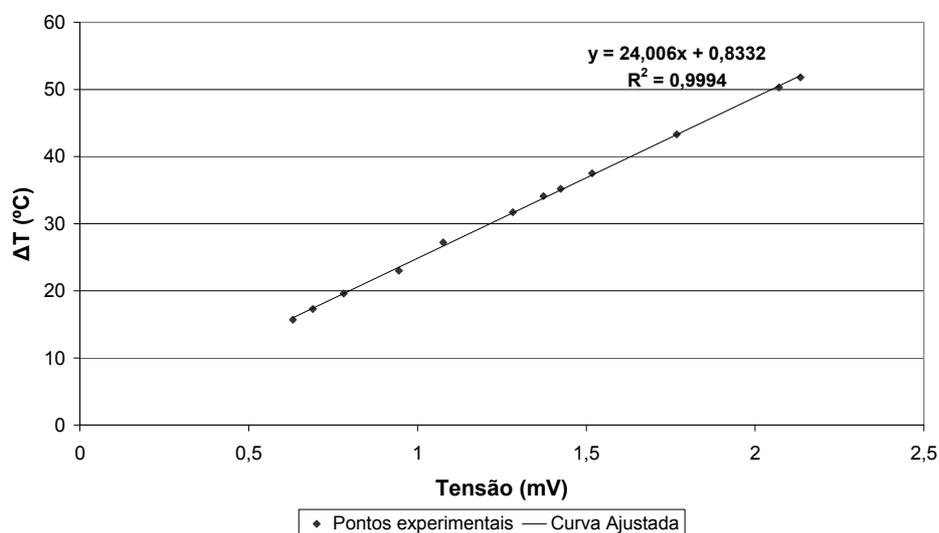
**Figura 37: Aparato para calibração do termopar**

O esquema de ligação do termopar é apresentado na *Figura 38*.



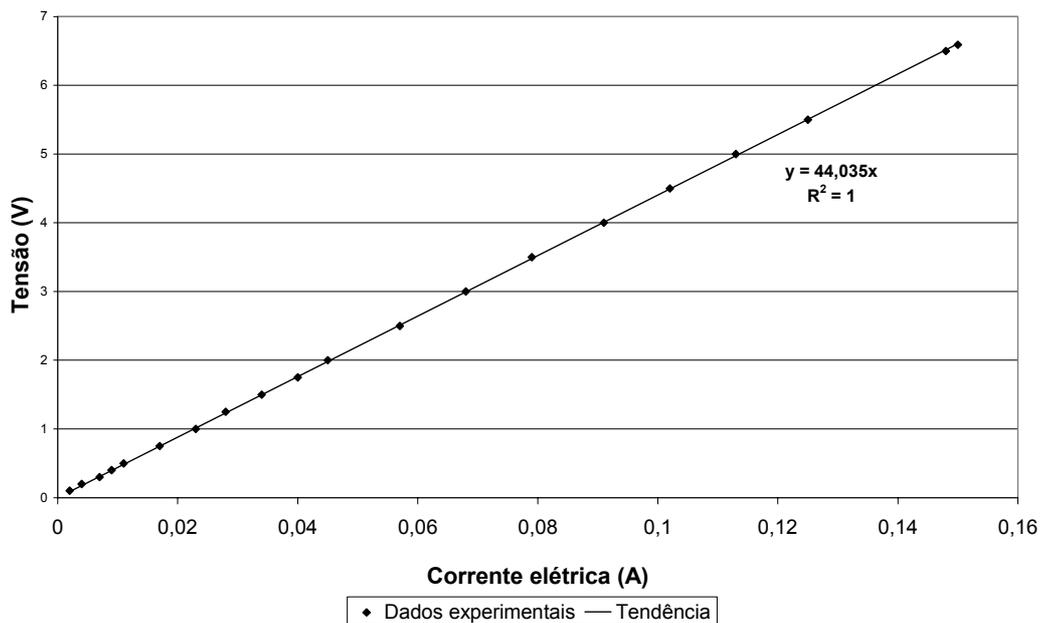
**Figura 38: Esquema de ligação do termopar**

Na *Figura 39* estão apresentados os pontos experimentais utilizados para a calibração do termopar da sonda que são função da variação de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da tensão (mV), bem como, a curva de calibração obtida por ajuste linear destes. Como pode ser observado os pontos experimentais ajustam-se bem a reta, pois o fator de correlação é de 0,9994. Quanto ao valor de erro padrão tem-se que este é de  $\pm 0,31^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 39: Curva de calibração do termopar da sonda**

Em uma etapa posterior a preocupação foi com a determinação da resistência elétrica por unidade de comprimento do fio de constantan utilizado como fonte de calor. Para isto terminou-se a inclinação da reta que relaciona a tensão com a corrente elétrica para um fio de comprimento conhecido (39 cm) conforme ilustrado na *Figura 40*. A partir desta inclinação que representa a resistência elétrica determinou-se através de regra de três a resistência elétrica por metro do fio de constantan ( $R_m = 112,91 \Omega/m$ ).

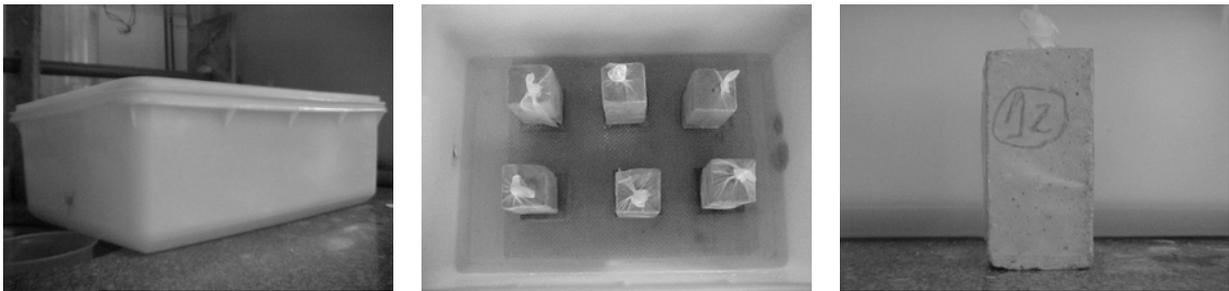


**Figura 40: Determinação da variação da tensão com a corrente elétrica para um fio com 39 cm de comprimento**

No fio de constantan foi aplicada uma tensão de 6 V no fio de constantan que correspondeu a uma corrente de 0,142 A. Em função deste valor de corrente e da resistência por unidade de comprimento do fio determinou-se a potência emitida por unidade de comprimento da sonda que foi de 4,55 W/m.

Quanto à amostragem, foram utilizadas metades de amostras prismáticas (4x4x16 cm) previamente secas e perfuradas. Para a obtenção de amostras com diferentes conteúdos de umidade a base destas ficou em contato com um filme de água destilada deionizada com espessura de cerca de 0,5 cm. Desta maneira, foram obtidos conteúdos de umidade mássica variando de 0% ao teor de umidade correspondente a saturação. Trabalhou-se com um total de onze teores de umidade para a confecção da reta que relaciona o teor de umidade e a condutividade térmica.

O aparato experimental utilizado para umedecer as amostras está apresentado na *Figura 41*. Este consta de uma caixa de polipropileno, apoiador metálico e grelha metálica. O nível de água foi mantido por meio de um extravasor. A amostra foi envolvida por filme plástico para evitar a perda de água por evaporação. Após a obtenção da umidade desejada, a base da amostra também foi envolvida por filme plástico e recoberta com papel alumínio a fim de manter o conteúdo de umidade.

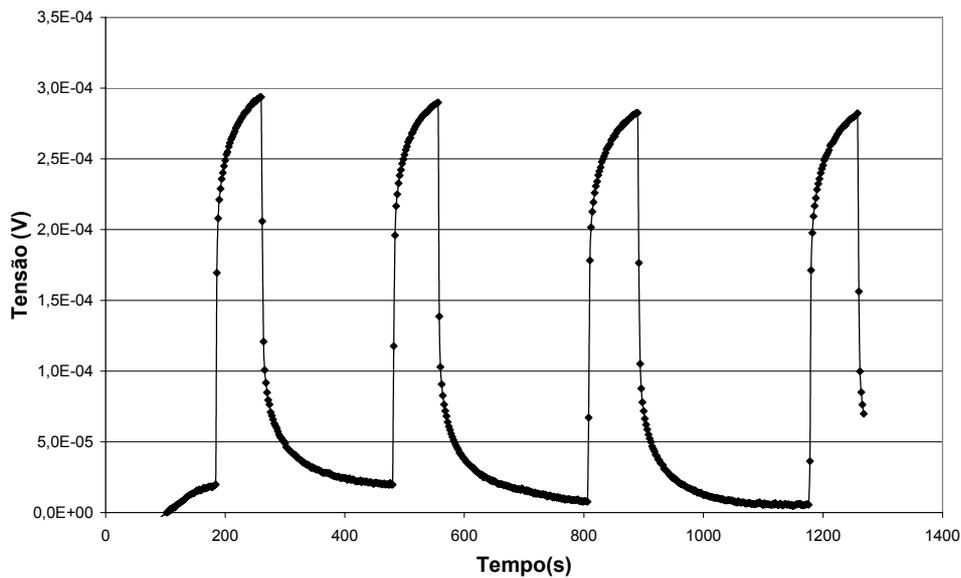


**Figura 41: Aparato utilizado para umedecer as amostras para a calibração da sonda**

As amostras foram assim mantidas por um período mínimo de 60 dias para que ocorresse a homogeneização da distribuição de umidade ao longo da amostra. Supõe-se que este tempo seja suficiente para a homogeneização em função das constatações efetuadas por Fernandes; Phillipi & Pedrini (1991) nas quais é estipulado um tempo de pelo menos 45 dias.

Em função da ocorrência de fenômenos de ganho e perda de água embora pouco significativos, o valor considerado para a umidade presente na amostra foi o obtido na data da realização do ensaio com a sonda através da realização de nova pesagem.

O ensaio em si consistiu na aplicação de tensão no fio de constantan e medida indireta da variação de temperatura em função do tempo através do termopar. Para cada amostra de argamassa este procedimento foi repetido 4 vezes. Um exemplo de dados brutos obtidos através deste procedimento pela aquisição de dados está ilustrado na *Figura 42*.

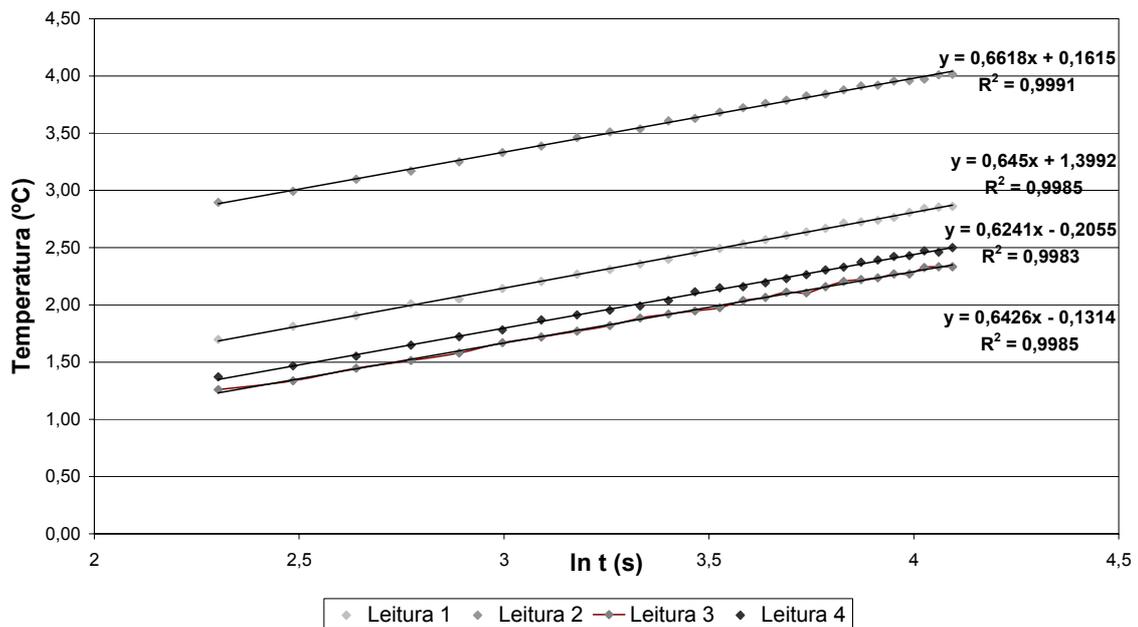


**Figura 42: Exemplo de dados brutos obtidos da aquisição para uma amostra de argamassa**

Os picos observados através da *Figura 42* correspondem a aplicação de tensão no fio de constantan, sendo que esta tensão foi aplicada durante cerca de 75 s. Em cada pico verificam-se duas fases distintas: uma trecho de taxa rápida de aumento da tensão que corresponde a condutividade do meio entre a sonda e a argamassa que neste arranjo experimental estava preenchido com pasta térmica a base de silicone com condutividade térmica de  $2,2 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$  e um trecho praticamente linear que corresponde a condutividade no meio 2 (argamassa). Deste trecho referente a argamassa é que foi selecionado um intervalo de dados o mais linear possível, sendo que este de forma geral correspondeu ao intervalo entre 10s e 60s da aplicação da tensão. Apenas os dados deste intervalo foram utilizados para a obtenção da inclinação da reta que relaciona a temperatura com o logaritmo neperiano do tempo.

Um exemplo típico da obtenção da inclinação destas retas para uma mesma amostra está ilustrado na *Figura 43*.

A condutividade térmica das argamassas foi determinada da média de apenas três leituras, portanto uma das quatro leituras foi eliminada em cada caso. Como critério de eliminação foi utilizado o do valor espúrio ou do maior resíduo, sendo que este é dado em módulo pela razão entre a diferença da leitura “i” e a média das leituras, e o desvio padrão das leituras. Como exceção tem-se as amostras da argamassa com 0% de CZP, pois para algumas amostras desta foram realizadas apenas três leituras.



**Figura 43: Exemplo típico da obtenção do coeficiente A para determinação da condutividade térmica**

Cabe mencionar ainda que para todas as aquisições foram efetuados “scans” (aquisições de dados) a cada 2 s, ou seja, a cada 2 s era medida a tensão no termopar. E que os intervalos entre as leituras eram dados em função do tempo de estabilização da tensão lida através do termopar (temperatura), sendo que este foi em torno de quatro minutos.

Como na presente determinação o enfoque principal era na comparação da condutividade das diversas argamassas, dispenseu-se menor atenção na verificação da precisão do valor determinado para a condutividade. Apenas foi realizada a comparação dos valores de condutividade de uma amostra de parafina obtidos com o emprego da sonda térmica com os encontrados na bibliografia.

Assim sendo, em virtude de não se saber se a parafina era pura, e/ou não dispor de um aparato calibrado de medição de condutividade, apenas pode-se verificar que os valores de condutividade lidos com a sonda apresentam-se coerentes em termos de ordem de grandeza.

#### 3.2.2.4 Grau de hidratação

Amostras de argamassa retiradas da parte central de corpos-de-prova cilíndricos 5x10 cm, secas à temperatura de 105°C, foram moídas até a passagem de todo o material na peneira de malha 150 mm.

Para identificação das faixas de temperaturas em que ocorrem alterações físico-químicas na estrutura dos compostos presentes na estrutura das argamassas assim preparadas, inicialmente realizou-se a análise térmica diferencial nas amostras de argamassas. Para isto, foi utilizado equipamento patenteado pelo INSA-Lyon e disponível no laboratório ValoRes. Este ensaio foi realizado em atmosfera ao ar, com taxa de aquecimento de 10°C/min, até atingir a temperatura de 900°C. Cada amostra ensaiada possuía uma massa representativa de 600 mg.

Numa etapa posterior, com base nos resultados obtidos na ATD, as amostras de argamassa previamente secas a 105°C, foram calcinadas em uma mufla até a temperatura de 1000°C, juntamente com amostras de cimento, cinza pesada, cal, areia e IA utilizados na confecção das argamassas. A calcinação isolada destes constituintes das argamassas é interessante uma vez estes apresentam perda de massa ao fogo.

Foram realizadas leituras de massa após o aquecimento e permanência da amostras por meia hora nas seguintes temperaturas: 200°C, 600°C e 1000°C. Estas temperaturas abrangem respectivamente as faixas correspondentes a perda de água proveniente dos hidratos de silicatos e aluminatos, da cal hidratada e da descarbonatação da calcita.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

As propriedades das argamassas no estado fresco abordadas na presente pesquisa estão apresentadas na *Tabela 18*, bem como o seus valores.

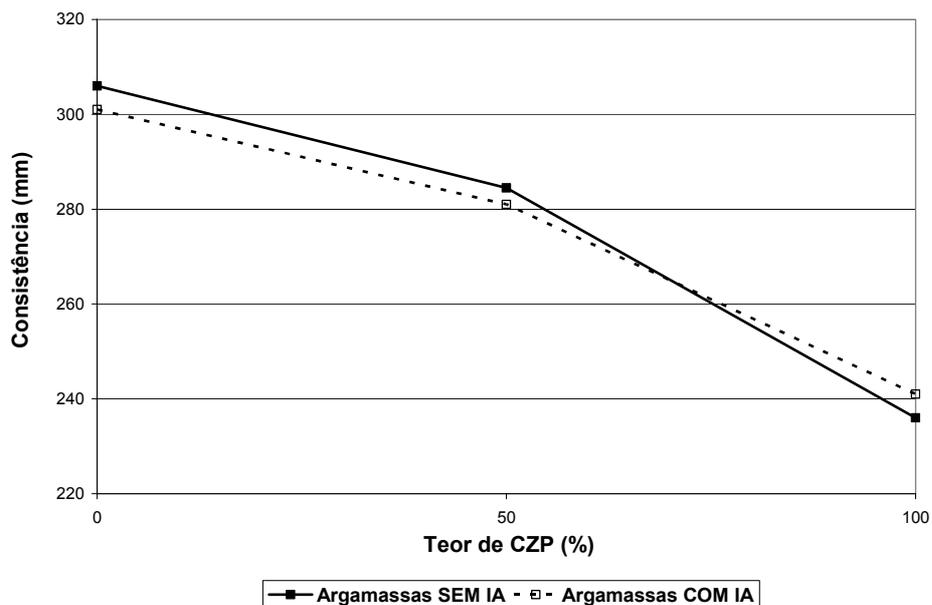
**Tabela 18: Propriedades das argamassas no estado fresco**

Argamassas/Propriedades	Consistência (mm)	Capacidade de retenção de água (%)	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )
0% CZP	306	81,75	2,02
50% CZP	285	76,05	1,86
100% CZP	236	77,70	1,63
0% CZP + IA	301	94,61	1,63
50% CZP + IA	281	92,74	1,47
100% CZP + IA	241	81,29	1,42

Através do gráfico da *Figura 44* verifica-se que para uma mesma relação a/c as argamassas estudadas apresentam diferentes consistências, sendo que quanto maior o teor de cinza menor é a consistência, sendo que isto ocorre tanto para as argamassas sem como para as com aditivo incorporador de ar. Verificou-se que a influência do aditivo incorporador de ar não foi significativa podendo isto ser atribuído ao fato das argamassas com teores de 0% e 50% de substituições de areia por cinza pesada já apresentarem elevado espalhamento, ou seja, superior a 265 mm.

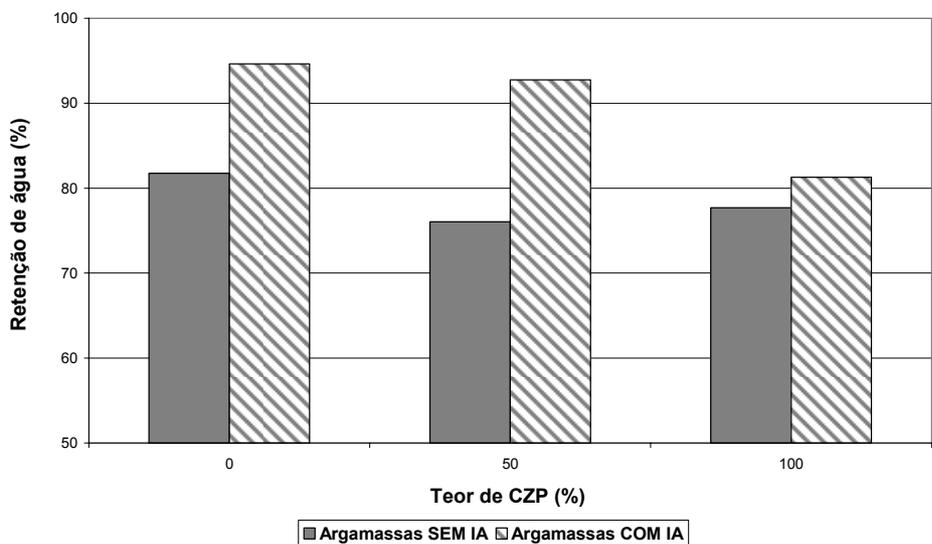
Ainda tem-se, que segundo a bibliografia nacional, o método da mesa de espalhamento para a determinação da consistência não mostra-se adequado para a avaliação do efeito do incorporador de ar (CARDOSO, PILEGGI & JOHN, 2005; NAKAKURA, 2003; CAVANI, ANTUNES & JOHN, 1997).

Em tratando-se de capacidade de retenção de água, de acordo com o apresentado no gráfico da *Figura 45*, tem-se que o emprego da CZP implica em uma redução da capacidade de retenção de água, sendo que este resultado está de acordo com o encontrado por Margon (2002) ao realizar estudo de argamassas contendo cinzas em substituição ao agregado natural. No entanto não foi encontrada uma relação entre o teor de CZP e a retenção de água.



**Figura 44: Consistência das argamassas**

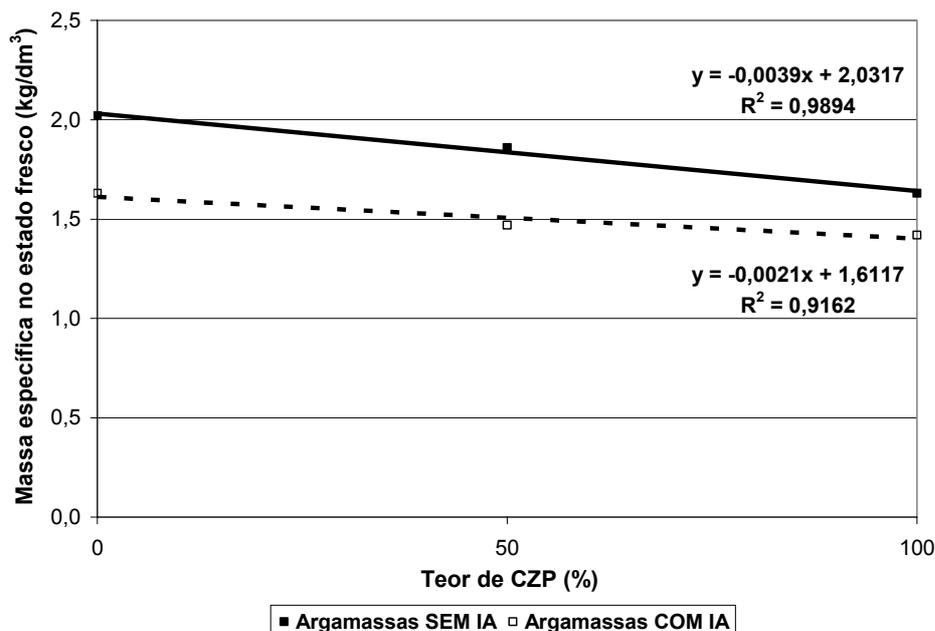
Quanto a ação do IA, este implica em um aumento da retenção, o que esta de acordo com o mencionado na bibliografia.



**Figura 45: Retenção de água das argamassas**

Quanto as massas específicas apresentadas na *Figura 46*, verifica-se que ocorre uma diminuição da massa específica nas argamassas quanto maior o teor de cinzas pesadas e quando se faz uso do incorporador de ar. Isto já era esperado em função da cinza apresentar menor massa específica do que a areia, e do incorporador de ar atuar no aumento do teor de ar incorporado.

Na *Figura 46* é apresentado um comportamento linear da massa específica em relação ao teor de cinza pesada. No entanto, cabe destacar que a linearidade atende apenas aos três pontos experimentais, que na existência de um maior número de pontos (teores de cinza pesada) poderia ser constatado que a tendência não é linear. Esta observação é válida para toda a análise dos resultados experimentais que segue.



**Figura 46: Massa específica das argamassas no estado fresco**

## 4.2 Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido

Na *Tabela 19* são apresentadas os valores médios das propriedades físicas obtidas no estado endurecido das argamassas estudadas que são massa específica aparente determinada por duas metodologias diferentes de obtenção do volume da amostra: geometricamente (NBR13280) e através de imersão em mercúrio, e a porosidade aberta determinada através do ensaio de absorção de água por imersão.

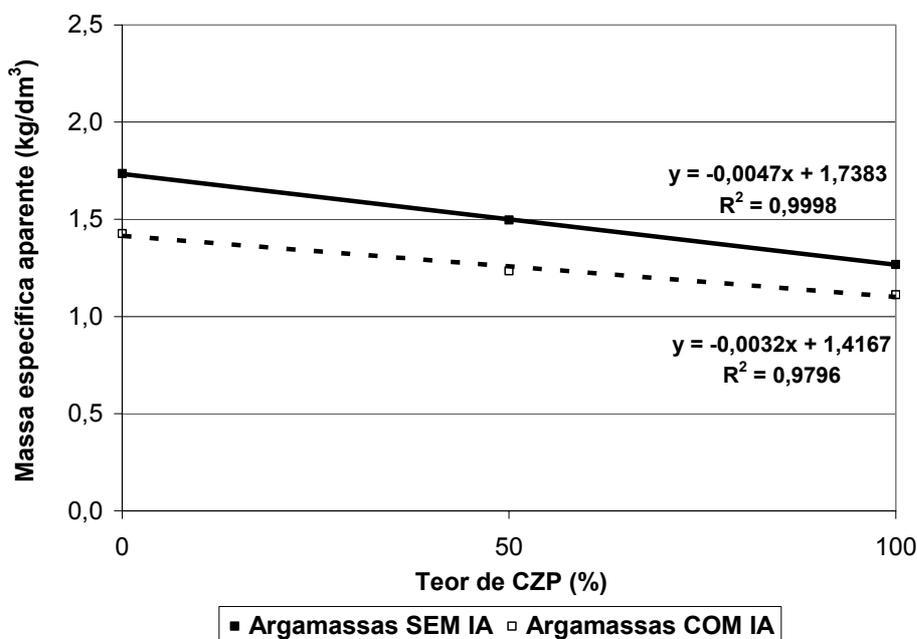
Os valores individuais a partir dos quais estas propriedades foram calculadas estão apresentados nos ANEXOS 1 e 2.

**Tabela 19: Propriedades físicas das argamassas no estado endurecido**

Argamassa/Propriedade	Massa específica - NBR 13280 (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa específica - mercúrio (kg/dm <sup>3</sup> )	Porosidade aberta (%)	
			Média	Desvio
0% CZP	1,67	1,74	29,8	0,5
50% CZP	1,45	1,50	33,6	0,3
100% CZP	1,24	1,27	37,0	0,4
0% CZP + IA	1,42	1,43	26,3	0,6
50% CZP + IA	1,22	1,23	29,3	0,6
100% CZP + IA	1,06	1,11	34,4	0,4

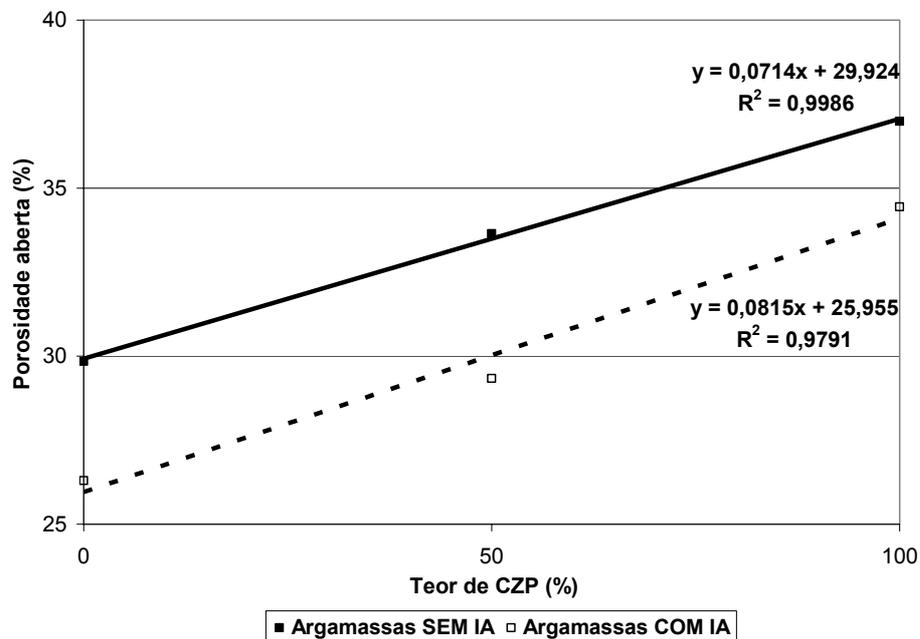
Os valores obtidos para a massa específica a partir de duas metodologias distintas diferem pouco entre si, sendo que os valores de “ $\rho$ ” obtidos através do uso de mercúrio são ligeiramente superiores aos obtidos pelo método geométrico. Assim sendo, a massa específica determinada através do mercúrio é no máximo cerca de 5% superior a determinada pelo método geométrico.

Para fins da presente pesquisa são adotados os valores de massa específica determinada através do emprego do mercúrio por julgar-se que neste método a determinação de volume é mais precisa em função de não ser suscetível a eventuais irregularidades existentes na superfície da amostra. Estes valores são apresentados no gráfico da *Figura 47*.

**Figura 47: Massa específica aparente das argamassas no estado endurecido**

O comportamento da massa específica no estado endurecido apresenta-se condizente com o encontrado no estado fresco, bem como com a massa específica dos agregados empregados (massa específica da areia é cerca de 43% maior do que a da cinza pesada) e a ação do incorporador de ar.

Os resultados obtidos para a porosidade aberta apresentados na *Figura 48* mostram que para um mesmo teor de CZP a porosidade é reduzida com o emprego do IA. Verifica-se ainda através de uma relação nítida que quanto maior o teor de CZP maior é a porosidade aberta, sendo que isto mostra que o uso das cinzas pesadas implica em argamassas com maior volume de poros permeáveis a água.



**Figura 48: Porosidade aberta das argamassas**

### 4.3 Propriedades higrotérmicas das argamassas

#### 4.3.1 Secagem da água de cura

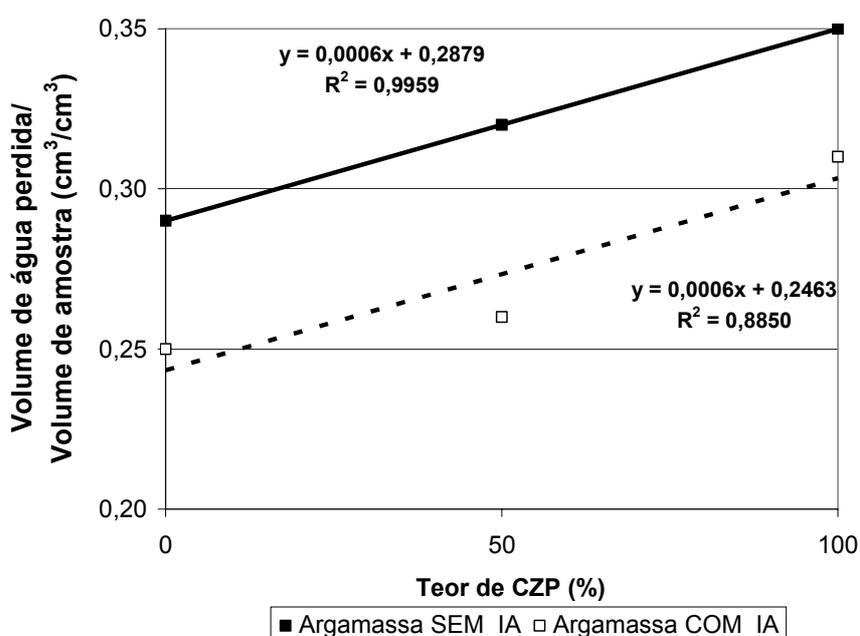
As argamassas sem aditivo levaram cerca de 22 dias para secarem, enquanto que para as argamassas com incorporador de ar o tempo de secagem foi reduzido para cerca de 14 dias. Além disso, quanto maior o teor de cinza pesada maior foi o tempo necessário para a secagem das amostras. Os resultados de secagem da água de cura são apresentados na *Tabela 20*.

**Tabela 20: Resultados da secagem da água de cura**

Argamassa	Volume de água perdida (cm <sup>3</sup> )		Volume de água perdida/Volume de amostra (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )			Conteúdo de umidade mássico (%)
	Cp cilíndrico	Cp prismático	Cp cilíndrico	Cp prismático	Média	
<b>0% CZP</b>	55,60	74,35	0,28	0,29	0,29	17,6
<b>50% CZP</b>	60,60	84,80	0,31	0,33	0,32	21,9
<b>100% CZP</b>	66,65	90,50	0,34	0,35	0,35	28,5
<b>0% CZP + IA</b>	47,95	66,70	0,24	0,26	0,25	17,8
<b>50% CZP + IA</b>	50,90	68,45	0,26	0,27	0,26	22,1
<b>100% CZP + IA</b>	60,25	80,45	0,31	0,31	0,31	29,6

Como era esperado, o comportamento apresentado pelos corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos é semelhante no que diz respeito a secagem da água de cura. Assim sendo, pode-se tomar o valor médio da relação volumétrica entre a quantidade de água perdida e o volume de amostra para representar tanto o comportamento dos corpos-de-prova prismáticos quanto dos cilíndricos.

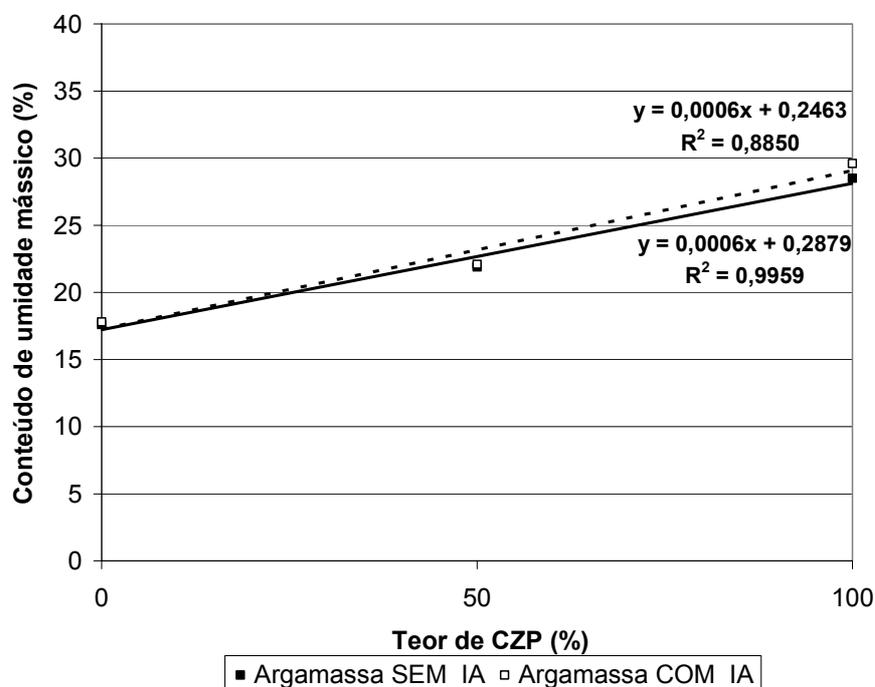
A relação volumétrica anteriormente mencionada em função do teor de CZP é apresentada através do gráfico da *Figura 49*. Através deste observa-se que quanto maior o teor de CZP maior é o volume de água perdida, e que quando utiliza-se incorporador de ar há uma redução da quantidade de água perdida para um mesmo teor de cinza.



**Figura 49: Volume de água de cura perdido por volume de amostra durante a secagem**

Cabe mencionar que a quantidade de água perdida vai afetar diretamente na porosidade aberta das argamassas conforme pode ser verificado nos ensaios de imersão em água.

Quando analisa-se a quantidade de água perdida em termos de conteúdo de umidade mássico, apesar das massas específicas das argamassas diferirem bastante entre si, o comportamento quando compara-se apenas o teor de cinza pesada é semelhante ao obtido através da análise do volume de água perdido. Em contrapartida, quando analisa-se o efeito do aditivo de ar verifica-se que o aditivo incorporador de ar não tem influência significativa no conteúdo de umidade mássico (ver *Figura 50*).



**Figura 50: Conteúdo de umidade mássico em função do teor de CZP**

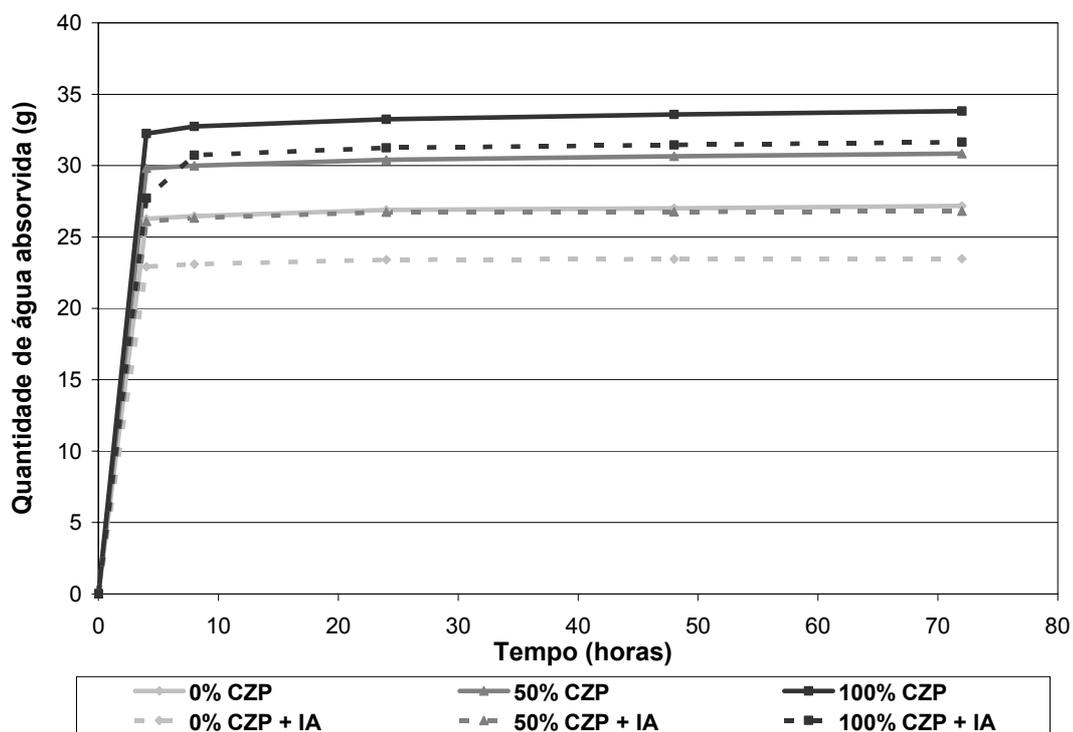
#### 4.3.2 Absorção de água por imersão

Na *Tabela 21* são apresentados os valores médios obtidos no ensaio de absorção de água por imersão para a quantidade de água absorvida em função do tempo. Já os valores individuais são apresentados no ANEXO 2.

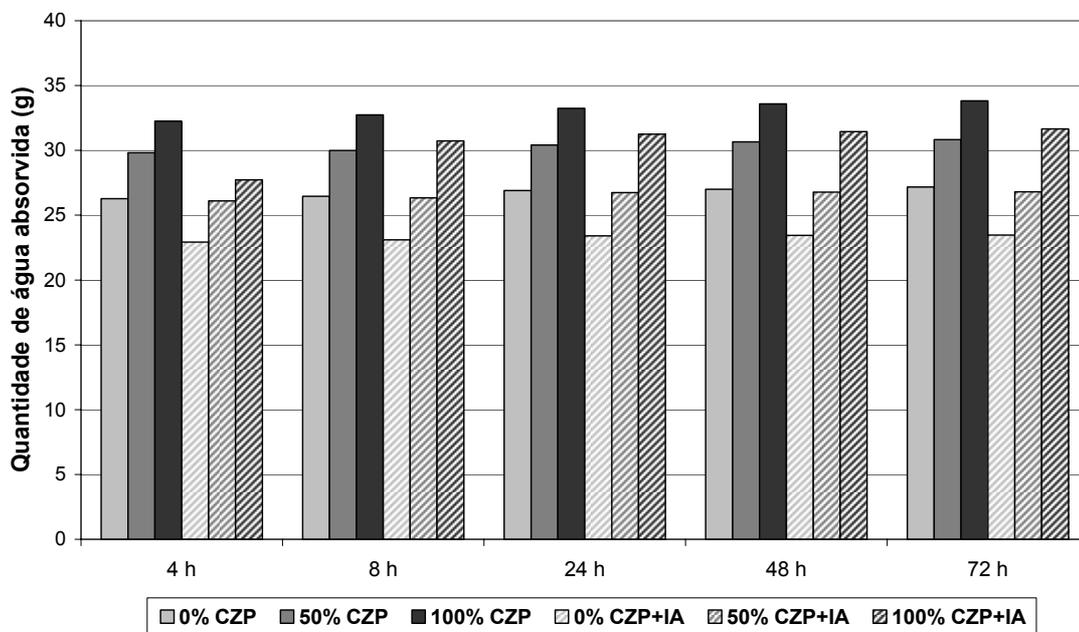
**Tabela 21: Resultados do ensaio de absorção de água por imersão**

Argamassa	Massa de água absorvida por imersão (g)				
	4 h	8 h	24 h	48 h	72 h
<b>0% CZP</b>	26,275	26,455	26,897	27,002	27,171
<b>50% CZP</b>	29,817	29,994	30,407	30,649	30,833
<b>100% CZP</b>	32,242	32,741	33,235	33,580	33,816
<b>0% CZP + IA</b>	22,920	23,095	23,402	23,449	23,471
<b>50% CZP + IA</b>	26,095	26,328	26,743	26,769	26,802
<b>100% CZP + IA</b>	27,730	30,737	31,245	31,447	31,649

Na *Figura 51* está ilustrada a quantidade de água absorvida em função do tempo, sendo que quanto maior o teor de CZP maior é a quantidade de água absorvida, sendo que esta quantidade é reduzida para as argamassas com aditivo incorporador de ar para um mesmo teor de cinza. Esta redução pode ser justificada pela formação de alvéolos não interligados ao longo dos capilares e/ou por modificações nas tensões intersticiais promovidas pelo aditivo.

**Figura 51: Curva de água absorvida por imersão em função do tempo**

Através da *Figura 52* observa-se que o comportamento ao longo do tempo para as diversas argamassas não sofre alteração, ou seja, quanto maior o teor de CZP maior é a quantidade de água absorvida, sendo que para um mesmo teor de CZP o incorporador de ar provoca uma redução nesta quantidade.



**Figura 52: Quantidade de água absorvida por imersão em função do tempo**

Esta redução na quantidade de água absorvida proporcionada pelo incorporador de ar comprova que as argamassas aditivadas apesar de apresentarem menor massa específica no estado endurecido, o que é atribuído a maior quantidade de ar incorporado e logo de vazios, são menos permeáveis à água em função de grande parte dos vazios ser constituída por poros isolados. Isto também é comprovado pelos resultados de porosidade aberta já apresentados.

### 4.3.3 Absorção de água por capilaridade

Nas *Tabelas 22 e 23* são apresentados os valores médios obtidos para a quantidade de água absorvida em volume, e o volume de líquido absorvido por área da seção transversal da amostra no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Os resultados individuais obtidos para cada uma das três amostras ensaiadas por argamassa estão apresentados no ANEXO 3.

**Tabela 22: Valores médios obtidos no ensaio de absorção de água para as argamassas SEM IA**

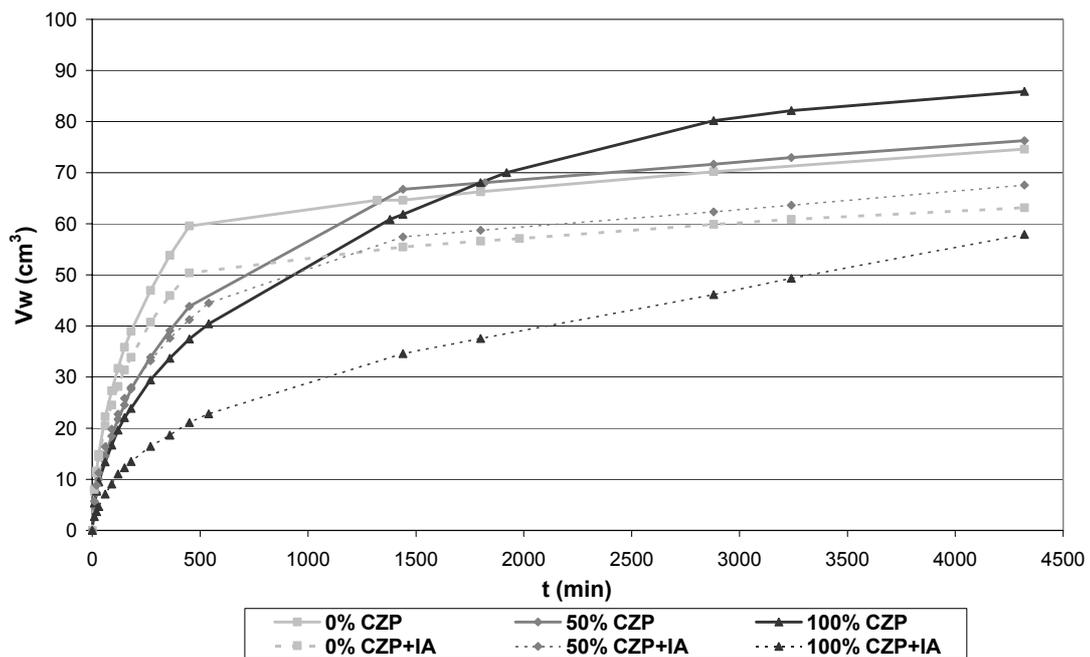
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	0% CZP		50% CZP		100% CZP	
		Vw (cm <sup>3</sup> )	X (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (cm)
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	7,4	0,4	4,6	0,2	5,4	0,3
20	4,47	11,3	0,6	7,4	0,4	7,7	0,4
30	5,48	14,2	0,7	10,0	0,5	9,5	0,5
60	7,75	21,1	1,1	14,6	0,7	13,4	0,7
90	9,49	27,5	1,4	18,5	0,9	16,7	0,9
120	10,95	30,9	1,6	21,8	1,1	19,6	1,0
150	12,25	34,4	1,8	24,5	1,3	22,1	1,2
180	13,42	37,3	2,0	27,7	1,4	23,9	1,2
270	16,43	45,2	2,4	33,9	1,7	29,5	1,5
360	18,97	52,0	2,7	39,1	2,0	33,7	1,8
450	21,21	57,9	3,0	43,9	2,2	37,5	2,0
1440	37,95	64,3	3,4	66,8	3,4	61,9	3,2
1800	42,43	65,8	3,5	68,1	3,5	68,1	3,6
2880	53,67	69,7	3,7	71,7	3,7	80,2	4,2
4320	65,73	74,1	3,9	76,2	3,9	85,9	4,5

**Tabela 23: Valores médios obtidos no ensaio de absorção de água para as argamassas COM IA**

t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	0% CZP+IA		50% CZP+IA		100% CZP+IA	
		Vw (cm <sup>3</sup> )	X (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (cm)
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	8,0	0,4	5,7	0,3	2,7	0,1
20	4,47	11,3	0,6	8,8	0,5	3,7	0,2
30	5,48	14,4	0,7	11,3	0,6	4,7	0,2
60	7,75	20,5	1,1	16,4	0,8	7,1	0,4
90	9,49	24,5	1,3	19,8	1,0	9,1	0,5
120	10,95	28,1	1,5	22,7	1,2	11,0	0,6
150	12,25	31,4	1,6	25,9	1,3	12,3	0,6
180	13,42	33,9	1,7	28,0	1,4	13,5	0,7
270	16,43	40,7	2,1	33,2	1,7	16,4	0,8
360	18,97	46,0	2,4	37,6	1,9	18,7	1,0
450	21,21	50,4	2,6	41,2	2,1	21,1	1,1
1440	37,95	55,5	2,9	57,4	3,0	34,6	1,8
1800	42,43	56,6	2,9	58,7	3,0	37,6	1,9
2880	53,67	59,9	3,1	62,3	3,2	46,1	2,4
4320	65,73	63,2	3,3	67,6	3,5	57,9	3,0

Nota: Os valores referentes a argamassa 100% CZP+IA foram calculados a partir da média de apenas duas amostras.

Na *Figura 53* está ilustrado o volume de água absorvido ( $V_w$ ) em função do tempo para as diferentes argamassas. Observa-se através deste que quanto maior o teor de substituição de cinza pesada maior a quantidade de água total absorvida para as argamassas sem aditivo incorporador de ar, isto já era esperado em função da maior porosidade aberta das argamassas com cinzas.



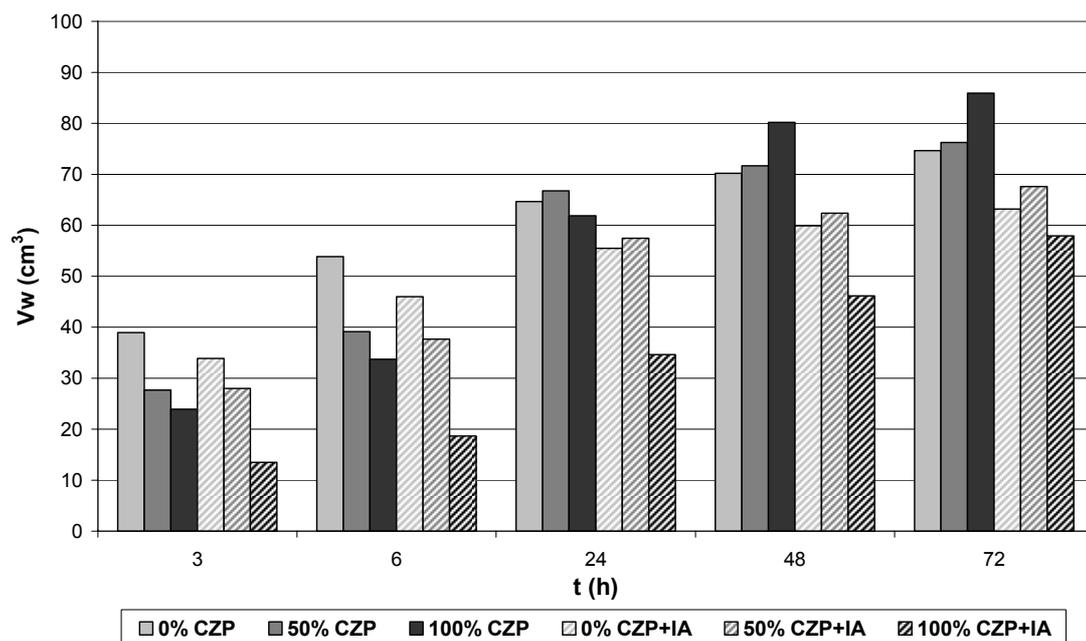
**Figura 53: Geral: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo**

Comparando-se as argamassas com e sem IA para um mesmo teor de substituição, observa-se que o aditivo proporcionou uma redução da quantidade de água absorvida e que a forma da curva que relaciona o volume de água absorvida em função do tempo manteve-se praticamente o mesmo e que apenas foi deslocado para baixo no caso das argamassas sem IA.

Esta redução de água absorvida pode ser atribuída, conforme já mencionado, à redução da porosidade aberta (acessível a água) em função da existência de alvéolos não interligados (diminuição da conectividade entre os poros) promovida pelo agente incorporador de ar.

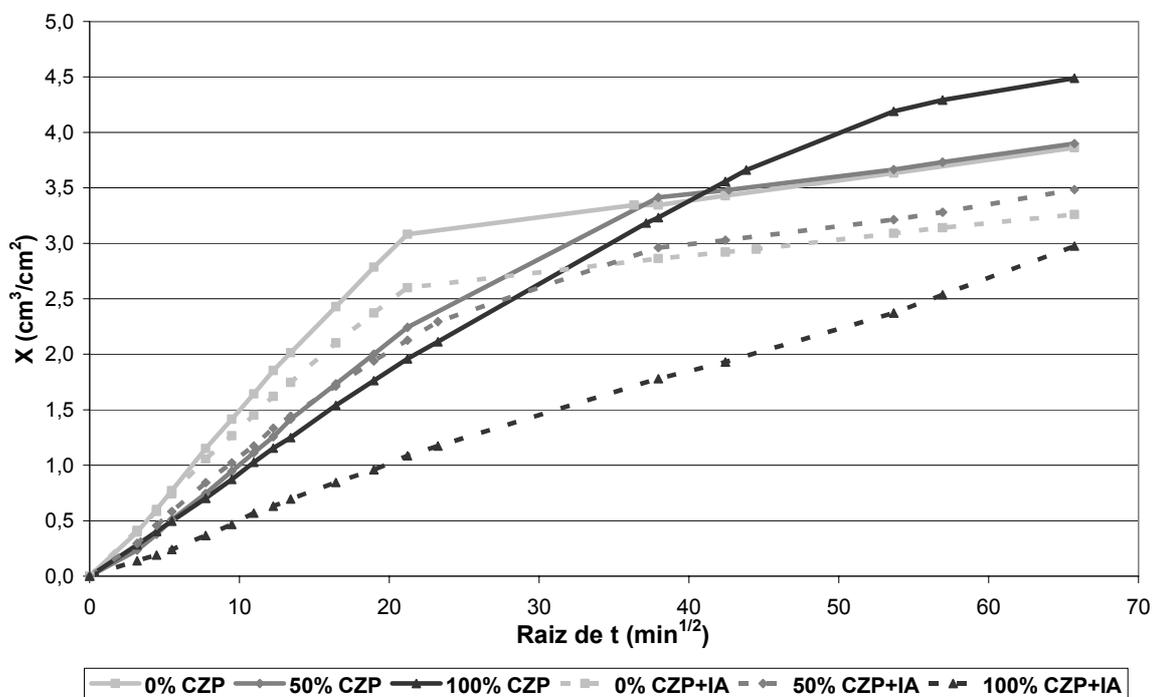
Logo, apesar da maior quantidade de ar incorporado nas argamassas com aditivo incorporador de ar, conforme evidenciado pela baixa massa específica, a capilaridade é reduzida em função da menor conectividade destes poros.

Na *Figura 54* a quantidade de água absorvida em função do tempo é apresentada em tempos específicos: 3, 6, 24, e 72 horas. Nesta é interessante observar que a absorção é inicialmente menor para as argamassas com CZP, porém uma inversão deste comportamento é verificada com o passar do tempo.



**Figura 54: Volume de água absorvida nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas**

No gráfico da *Figura 55* é apresentada o volume do líquido absorvido por área da seção transversal do corpo-de-prova ( $X$ ) em função do tempo. Através deste verifica-se que quanto maior o teor de CZP menor é a taxa de variação de “ $X$ ” em função do tempo.



**Figura 55: Geral: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo**

Apesar das amostras do ensaio de absorção de água por capilaridade estarem com as laterais protegidas com filme plástico, o efeito da evaporação foi verificado. A ocorrência da evaporação pode ser constatada pelo fato de “X” não atingir a constância para nenhuma das argamassas para as quais a mancha capilar atingiu o topo da amostra durante a realização do ensaio, conforme pode ser observado na *Figura 54*. Além disso, esta verificação pode ser feita através da comparação dos resultados de absorção total de água (72 horas) obtidos através das leituras de altura de água no tubo e mediante pesagem da amostra. Esta comparação é apresentada na *Tabela 24* e na *Figura 56*.

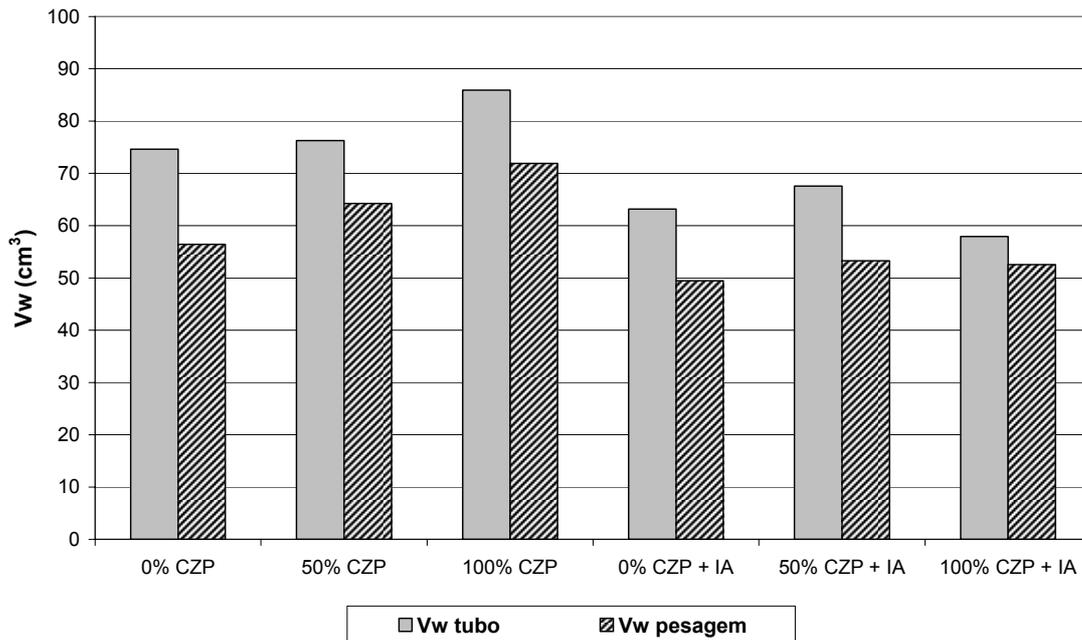
**Tabela 24: Ocorrência do fenômeno de evaporação de água no ensaio de absorção de água por capilaridade**

Argamassa	Vw tubo	Vw pesagem	Água que evaporou (%)	Tempo em que a mancha capilar atingiu o topo do cp (min)
<b>0% CZP</b>	74,61	56,43	32,2	450
<b>50% CZP</b>	76,25	64,23	18,7	450<t<1440
<b>100% CZP</b>	85,90	71,90	19,5	1800<t<2040
<b>0% CZP + IA</b>	63,16	49,47	27,7	450
<b>50% CZP + IA</b>	67,58	53,27	26,9	540<t<1440
<b>100% CZP + IA</b>	57,92*	52,55*	10,2	xxx

Nota: \*Valores médios correspondentes as amostras 1 e 3.

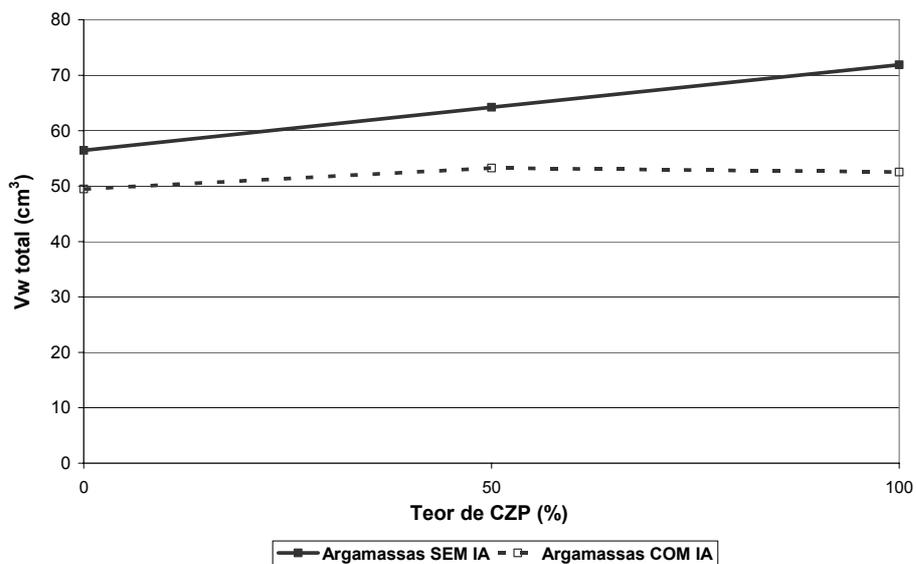
Previamente acreditava-se que a evaporação apenas ocorreria quando a mancha capilar atingisse o topo da amostra, no entanto verificou-se que apesar da mancha capilar das amostras 1 e 3 da argamassa 100% CZP+IA não ter atingido o topo ocorreu a evaporação de água, sendo esta evaporação de 10,2%. Este valor foi o menor valor estimado para a quantidade de água evaporada, o que revela que a evaporação também ocorre quando a mancha capilar não atinge o topo da amostra, mas que no entanto a ação deste fenômeno é menos significativo.

Através da *Figura 55* observa-se que apesar da leitura no tubo superestimar os valores da absorção total de água por causa do efeito da evaporação apresenta a mesma tendência de comportamento obtida pela medida da massa.



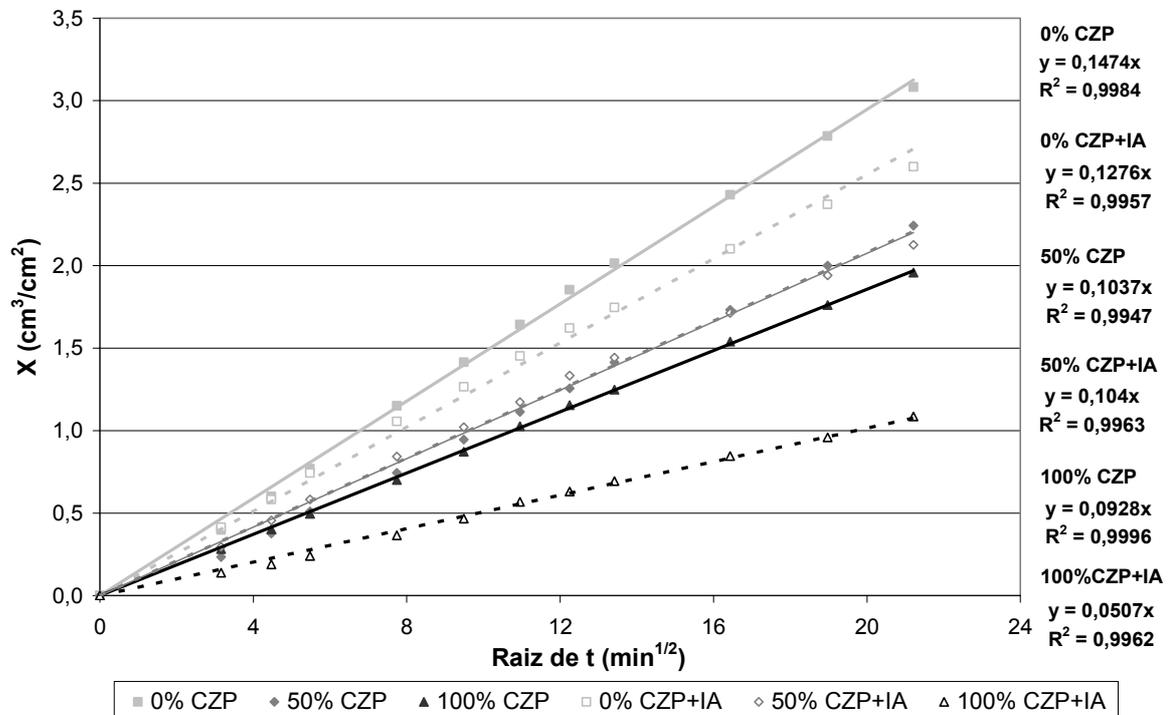
**Figura 56: Absorção total de água (72 horas) obtida através de leitura no tubo e medida de massa, respectivamente**

Tomando-se, então, os valores de volume total de água absorvida como sendo os obtidos por meio de pesagem, tem-se que para as argamassas sem aditivo incorporador de ar a absorção total de água aumenta com o teor de substituição de areia por cinza pesada. Já para as argamassas com incorporador de ar esta tendência é respeitada apenas para os teores de substituição de 0% e 50%, pois para a argamassa 100% CZP+IA a absorção total é ligeiramente inferior a da argamassa 50% CZP+IA. Estes resultados estão apresentados na *Figura 57*.



**Figura 57: Variação do volume total de água absorvida em função do teor de cinza pesada**

Na *Figura 58* é obtido o coeficiente de sorptividade das diversas argamassas no intervalo de tempo entre 0 e 450 minutos, sendo que este intervalo foi adotado em função de que para todas as argamassas a relação entre “X” e a raiz do tempo são lineares.



**Figura 58:** Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo – Determinação da sorptividade

Na *Tabela 25* são dispostos os coeficientes de sorptividade obtidos através do gráfico da *Figura 58*. Pode-se verificar por meio desta que para todas as argamassas quanto maior o teor de cinza pesada menor a sorptividade. Isto pode ser decorrente do refinamento dos poros das argamassas com cinza pesada, pois a CZP em função da sua finura promove um efeito filler, e além disso apresenta potencial pozolânico.

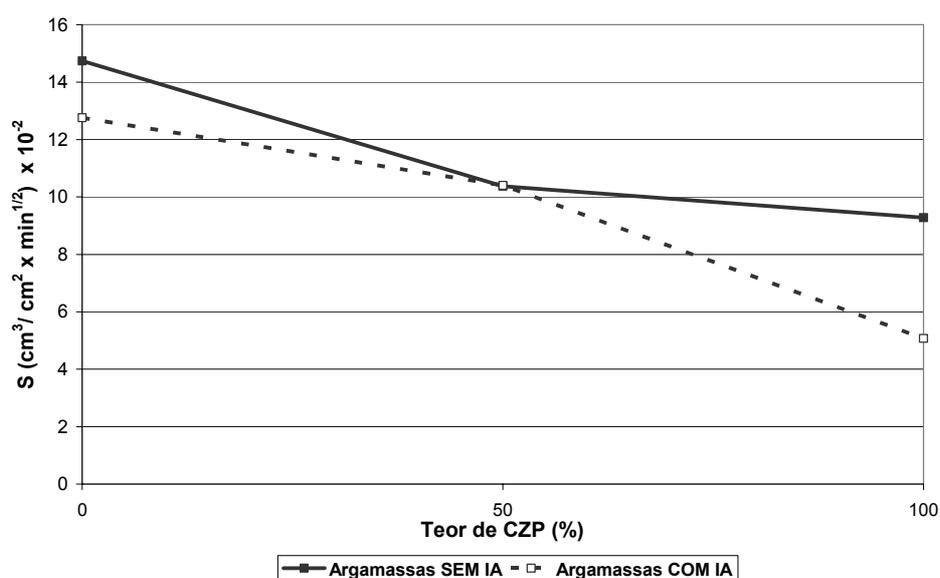
Ainda tem-se que o fato do emprego da cinza pesada não ter provocado o aumento da sorptividade mostra que a microporosidade da cinza não implica em um aumento na taxa de absorção.

**Tabela 25: Coeficiente de sorptividade (S) das argamassas**

Argamassa	Coeficiente de Sorptividade ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \times \text{min}^{1/2}$ ) $\times 10^{-2}$
0% CZP	14,74
50% CZP	10,37
100% CZP	9,28
0% CZP + IA	12,76
50% CZP + IA	10,40
100% CZP + IA	5,07

Para um mesmo teor de cinza pesada, temos que quando compara-se as argamassas com e sem IA, as argamassas aditivadas apresentam, de maneira geral, uma redução no coeficiente de sorptividade que apenas não é observado para a argamassa com 50% de CZP, conforme visualizado na *Figura 59*. Esta redução pode ser atribuída a presença de microbolhas de ar nas argamassas com aditivo incorporador de ar o que provoca o retardo do avanço de frentes líquidas no meio poroso. Como já foi visto anteriormente, a sorptividade de um menisco capilar pode ser consideravelmente maior em circuitos de raios homogêneos, mesmo que pequenos, do que em redes que comportam secções com grandes raios interconectados por trechos de seção reduzida (estrangulados). Logo, o incorporador de ar pode estar tornando mais heterogêneo o circuito de raios de um poro.

Verifica-se ainda que o efeito do incorporador de ar no coeficiente de sorptividade é mais significativo para o teor de 100% de CZP.



**Figura 59: Variação do coeficiente de sorptividade em função do teor de cinza pesada**

#### 4.3.4 Ângulo de molhamento aparente

Nas *Tabelas 26 e 27* são apresentados os valores médios utilizados para a determinação do ângulo de molhamento das argamassas sem e com IA, respectivamente. Estes valores foram obtidos através da médias de três amostras, sendo que os valores individuais são apresentados no ANEXO 4.

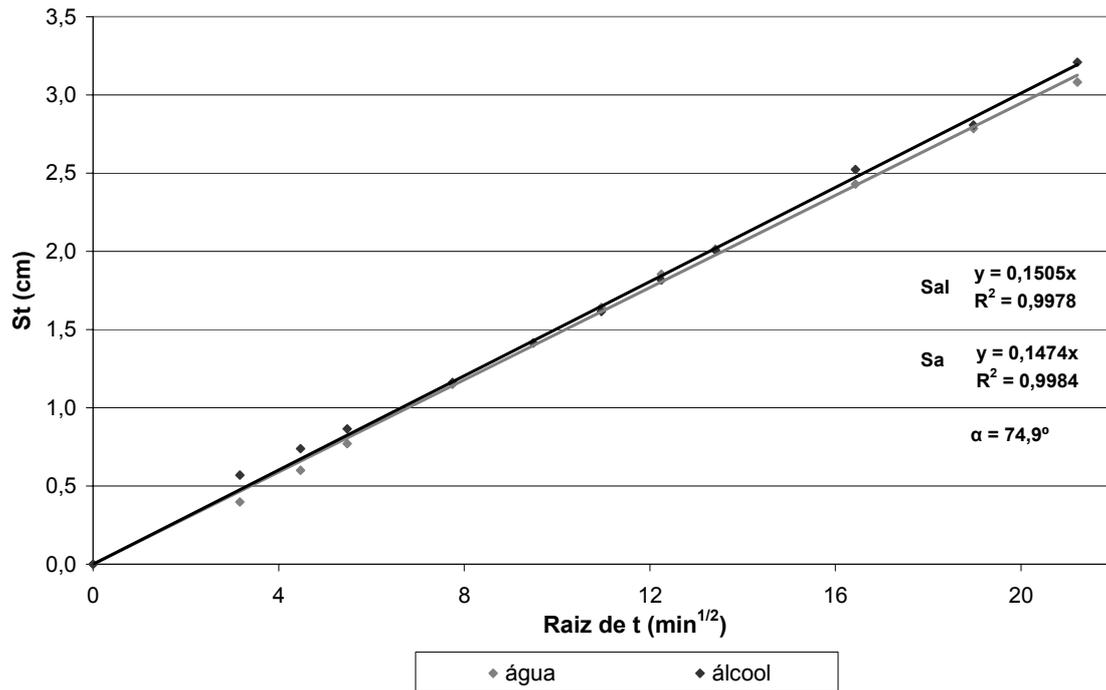
**Tabela 26: Dados para determinação do ângulo de molhamento aparente das argamassas sem IA**

t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	0% CZP		50% CZP		100% CZP	
		St_al (cm)	St_a (cm)	St_al (cm)	St_a (cm)	St_al (cm)	St_a (cm)
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
20	4,47	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,4
30	5,48	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5
60	7,75	1,2	1,1	0,9	0,7	0,8	0,7
90	9,49	1,4	1,4	1,1	0,9	1,0	0,9
120	10,95	1,6	1,6	1,3	1,1	1,2	1,0
150	12,25	1,8	1,8	1,5	1,3	1,3	1,2
180	13,42	2,0	2,0	1,7	1,4	1,4	1,2
270	16,43	2,5	2,4	2,1	1,7	1,8	1,5
360	18,97	2,8	2,7	2,4	2,0	2,1	1,8
450	21,21	3,2	3,0	2,8	2,2	2,4	2,0

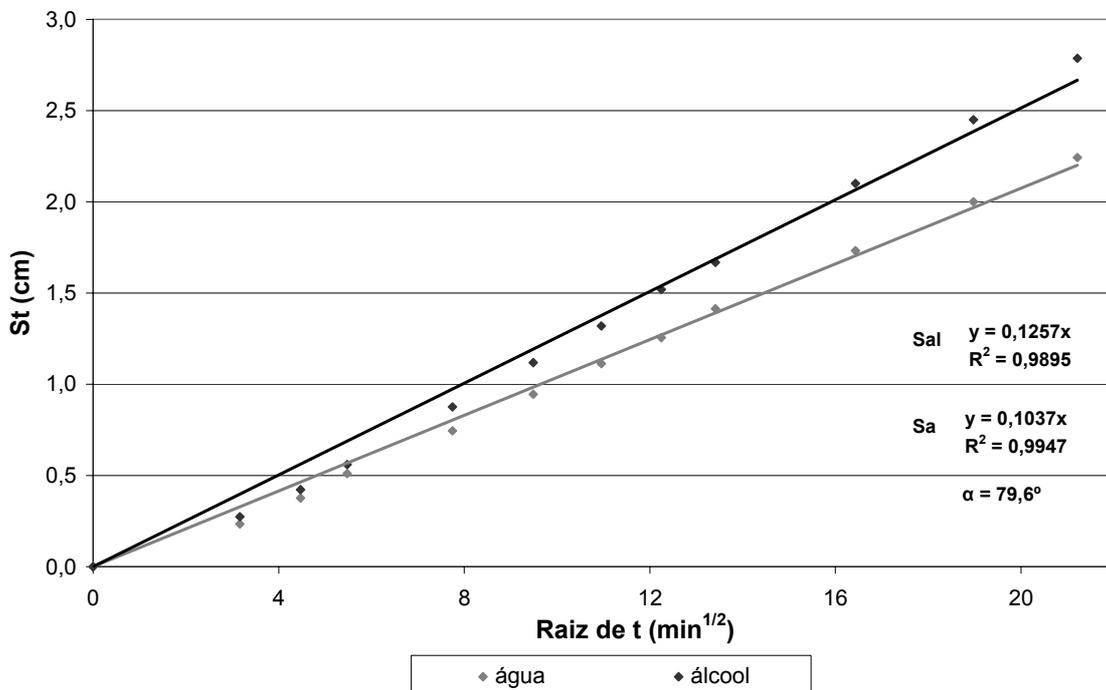
**Tabela 27: Dados para determinação do ângulo de molhamento aparente das argamassas com IA**

t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	0% CZP+IA		50% CZP+IA		100% CZP+IA	
		St_al (cm)	St_a (cm)	St_al (cm)	St_a (cm)	St_al (cm)	St_a (cm)
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1
20	4,47	0,6	0,6	0,4	0,5	0,3	0,2
30	5,48	0,8	0,7	0,5	0,6	0,4	0,2
60	7,75	1,1	1,1	0,8	0,8	0,5	0,4
90	9,49	1,4	1,3	1,0	1,0	0,7	0,5
120	10,95	1,6	1,5	1,2	1,2	0,8	0,6
150	12,25	1,8	1,6	1,3	1,3	0,9	0,6
180	13,42	2,0	1,7	1,4	1,4	1,0	0,7
270	16,43	2,4	2,1	1,8	1,7	1,2	0,8
360	18,97	2,8	2,4	2,1	1,9	1,5	1,0
450	21,21	3,1	2,6	2,4	2,1	1,6	1,1

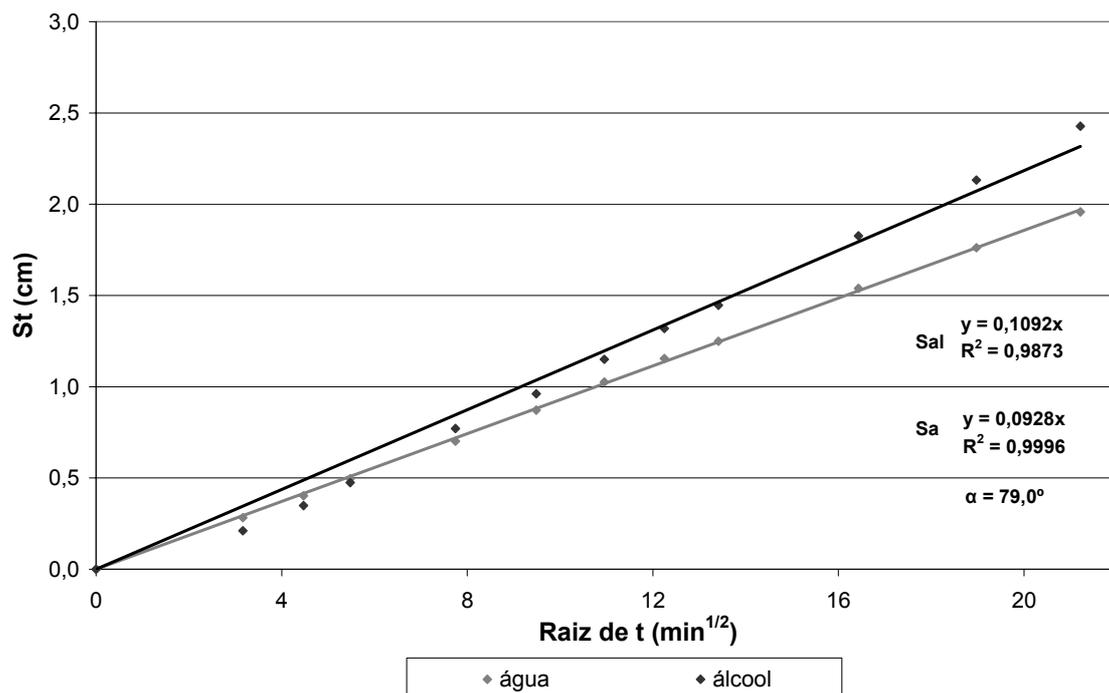
Através dos valores fornecidos nas *Tabelas 26 e 27* foram confeccionados os gráficos das *Figuras 60 a 65*. Estes gráficos apresentam as curvas referentes ao estoque infiltrado de água e álcool em função do tempo para um mesma amostra, sendo que foi através da relação entre a inclinação destas curvas que determinou-se o ângulo de molhamento aparente.



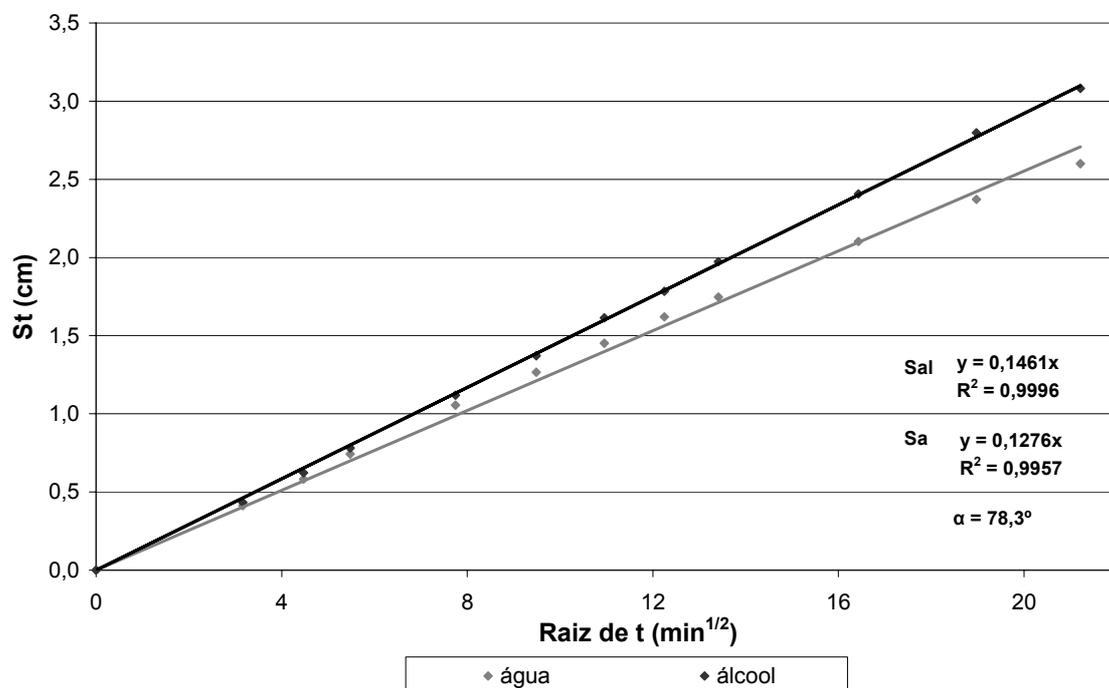
**Figura 60: Argamassa 0% CZP: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo**



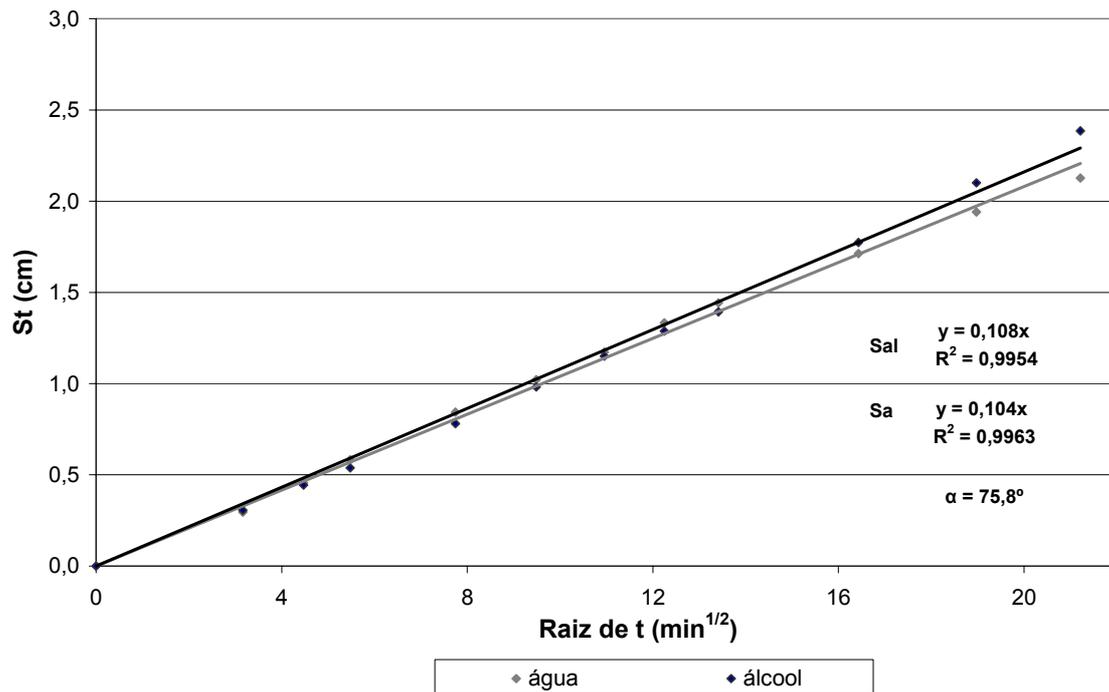
**Figura 61: Argamassa 50% CZP: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo**



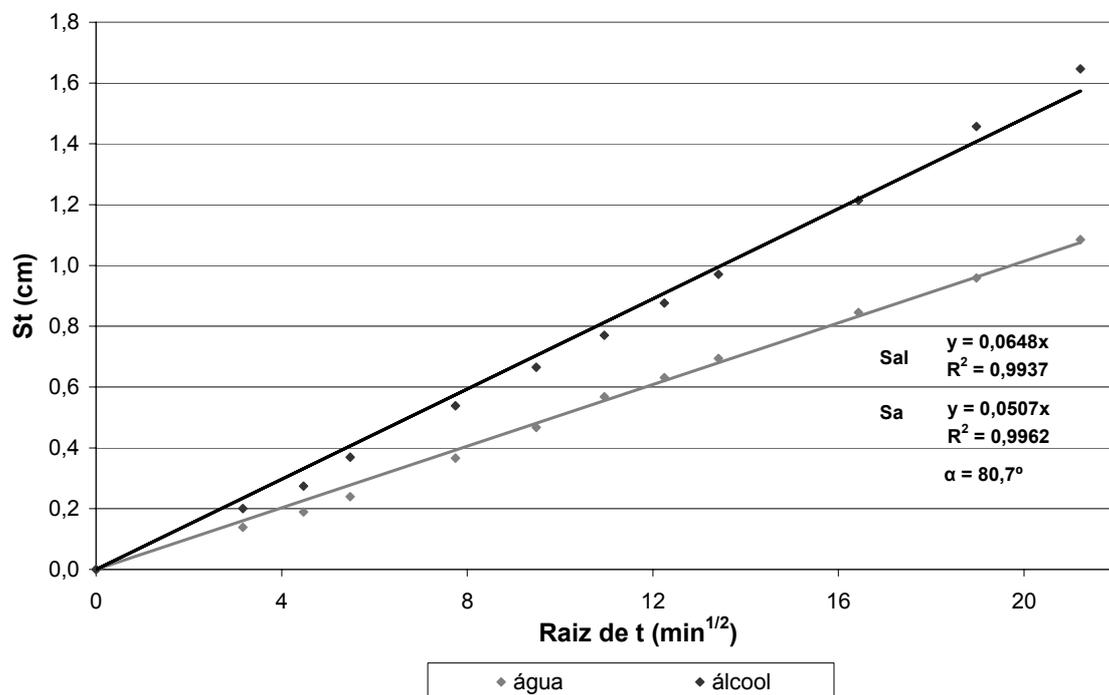
**Figura 62: Argamassa 100% CZP: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo**



**Figura 63: Argamassa 0% CZP+IA: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo**



**Figura 64: Argamassa 50% CZP+IA: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo**



**Figura 65: Argamassa 100% CZP+IA: Estoque de líquido infiltrado em função da raiz do tempo**

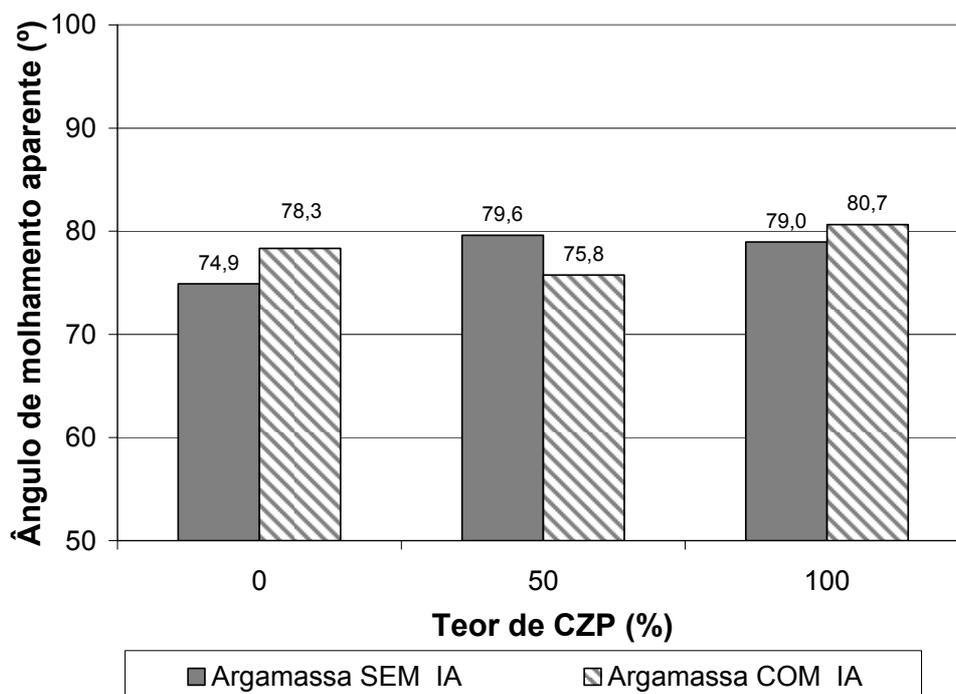
Na *Tabela 28* estão sintetizados os resultados dos gráficos apresentados anteriormente.

**Tabela 28: Estoques de líquido infiltrado e ângulo de molhamento aparente**

Argamassa	Sa (cm x min <sup>1/2</sup> )	Sal (cm x min <sup>1/2</sup> )	Ângulo de molhamento (°)
0% CZP	0,1474	0,1505	74,9
50% CZP	0,1037	0,1257	79,6
100% CZP	0,0928	0,1092	79,0
0% CZP + IA	0,1276	0,1461	78,3
50% CZP + IA	0,1040	0,1080	75,8
100% CZP + IA	0,0507	0,0648	80,7

Na *Figura 66* é apresentado o ângulo de molhamento aparente em função do teor de CZP. Através desta é possível observar que as argamassas com CZP, exceto a 50% CZP+IA, apresentaram maiores ângulo de molhamento do que as argamassas sem cinza pesada, logo apresentaram menor molhabilidade. Isto já era esperado em função das argamassas com cinzas no ensaio de absorção de água apresentarem maior tempo de ascensão da franja capilar e menor sorptividade.

No entanto, não foi verificada uma relação nítida entre o teor de CZP e o ângulo de molhamento.



**Figura 66: Ângulo de molhamento aparente em função do teor de CZP**

Ainda tem-se que, a exemplo do verificado para o coeficiente de sorptividade, as argamassas com 50% de CZP apresentam comportamento distinto das com 0 e 100% de substituição. Enquanto que para as argamassas com 0% e 100% de CZP o ângulo de molhamento aparente aumentou com o emprego de IA, como era esperado em função de pretender-se com a adição do incorporador de ar reduzir-se a molhabilidade, para as argamassas com 50% de CZP o ângulo diminuiu.

Assim sendo, temos que a mescla de cinza pesada e areia apresenta comportamento dispar do esperado tanto para o coeficiente de sorptividade quanto para o ângulo de molhamento.

#### 4.3.5 Secagem ao ar

Nas *Tabelas 29 e 30* são mostrados os valores médios de variação de massa, fluxo de secagem e a conteúdo de umidade mássico das argamassas em função do tempo, sendo que estes foram calculados através dos dados obtidos da pesagem dos corpos-de-prova em diferentes tempos durante a secagem ao ar (ver ANEXO 5). Após os 18 dias (432 horas) de leitura, a massa das amostras de todas as argamassas não diminuiu mais, sendo portanto considerada a constância de massa.

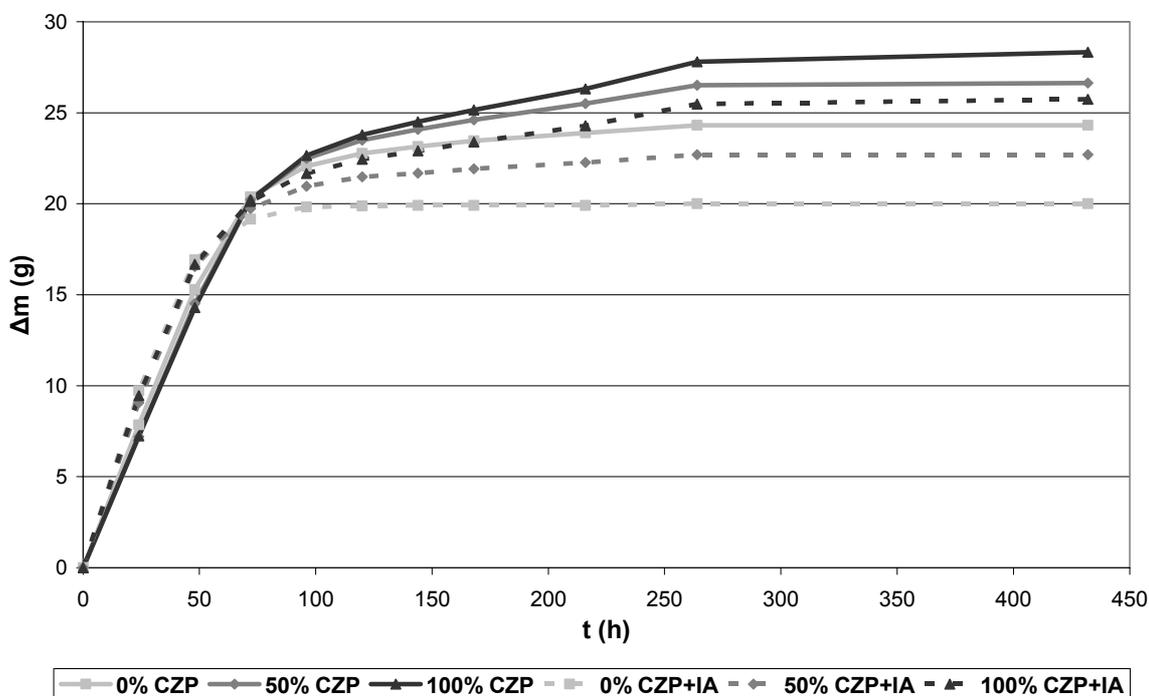
**Tabela 29: Variação de massa, fluxo de secagem e conteúdo de umidade mássico em função do tempo das argamassas sem IA**

Tempo (h)	0% CZP			50% CZP			100% CZP		
	$\Delta m$ (g)	Fluxo ( $\times 10^{-6}$ kg/m <sup>2</sup> xs)	W (%)	$\Delta m$ (g)	Fluxo ( $\times 10^{-6}$ kg/m <sup>2</sup> xs)	W (%)	$\Delta m$ (g)	Fluxo ( $\times 10^{-6}$ kg/m <sup>2</sup> xs)	W (%)
0	0,00	xxx	17,34	0,00	xxx	22,40	0,00	xxx	29,49
24	7,86	46,31	12,33	7,20	42,45	17,16	7,24	42,70	23,18
48	15,28	45,04	7,59	14,52	42,78	11,84	14,29	42,12	17,03
72	20,38	40,04	4,34	20,23	39,75	7,69	20,21	39,72	11,87
96	22,06	32,51	3,26	22,49	33,14	6,06	22,66	33,39	9,74
120	22,77	26,84	2,81	23,49	27,69	5,33	23,79	28,05	8,75
144	23,15	22,74	2,57	24,08	23,66	4,90	24,51	24,08	8,12
168	23,46	19,75	2,37	24,61	20,73	4,51	25,16	21,18	7,56
216	23,89	15,65	2,09	25,50	16,70	3,87	26,31	17,23	6,55
312	24,31	11,02	1,83	26,52	12,02	3,14	27,80	12,61	5,25
432	24,31	7,96	1,83	26,63	8,72	3,05	28,33	9,28	4,79

**Tabela 30: Variação de massa, fluxo de secagem e conteúdo de umidade mássico em função do tempo das argamassas com IA**

Tempo (h)	0% CZP+IA			50% CZP+IA			100% CZP+IA		
	$\Delta m$ (g)	Fluxo ( $\times 10^{-6}$ kg/m <sup>2</sup> xs)	W (%)	$\Delta m$ (g)	Fluxo ( $\times 10^{-6}$ kg/m <sup>2</sup> xs)	W (%)	$\Delta m$ (g)	Fluxo ( $\times 10^{-6}$ kg/m <sup>2</sup> xs)	W (%)
0	0,00	xxx	18,52	0,00	xxx	23,38	0,00	xxx	31,19
24	9,72	57,33	10,84	9,07	53,45	15,47	9,45	55,72	21,88
48	16,91	49,85	5,17	16,54	48,76	8,94	16,67	49,14	14,77
72	19,15	37,63	3,41	19,73	38,77	6,17	20,13	39,56	11,36
96	19,83	29,22	2,87	20,97	30,90	5,09	21,67	31,93	9,84
120	19,88	23,44	2,77	21,47	25,31	4,65	22,44	26,46	9,08
144	19,90	19,56	2,81	21,67	21,29	4,47	22,90	22,50	8,63
168	19,90	16,76	2,81	21,91	18,45	4,26	23,39	19,70	8,15
216	19,91	13,04	2,81	22,27	14,58	3,96	24,29	15,91	7,26
312	20,01	9,07	2,73	22,69	10,29	3,59	25,48	11,55	6,08
432	20,01	6,55	2,73	22,69	7,43	3,59	25,75	8,43	5,82

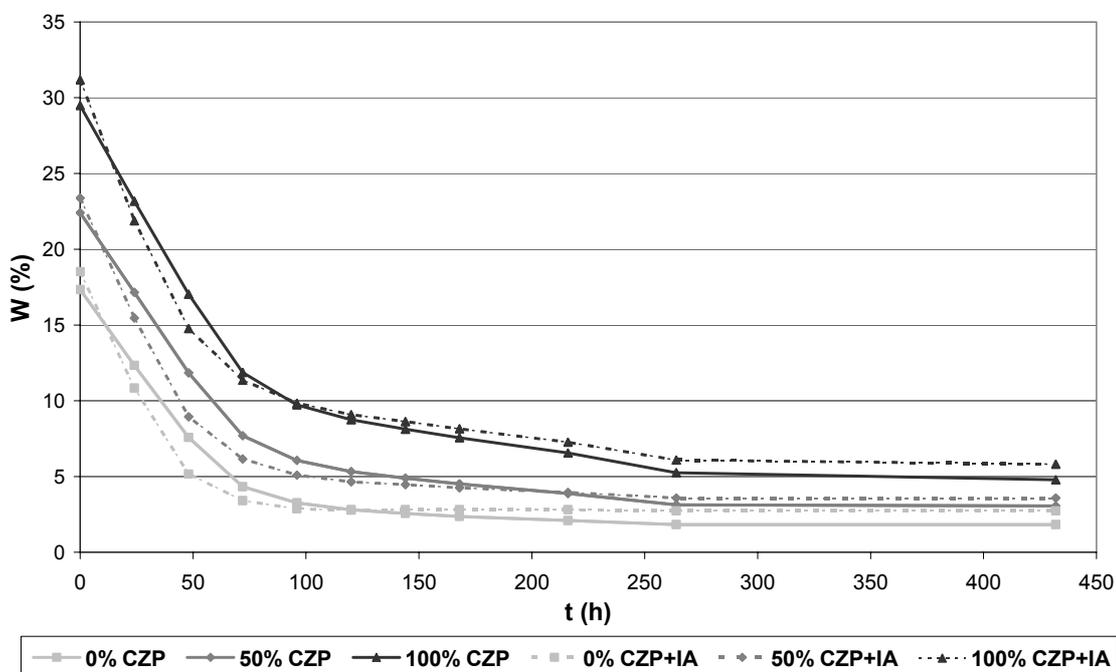
Na *Figura 67* é apresentada a variação de massa das amostras em função do tempo de secagem. Através deste observa-se que quanto maior o teor de cinza pesada maior é a quantidade de água perdida, sendo que quando da presença de aditivo este comportamento se mantém ocorrendo apenas uma redução da quantidade de água perdida para todos os casos. A maior perda de água pelas argamassas com CZP pode ser simplesmente explicado pelo fato de quanto maior o teor de CZP, maior a umidade inicial das amostras ensaiadas.



**Figura 67: Variação de massa em função do tempo no ensaio de secagem**

Na *Figura 68* é avaliada a variação do conteúdo de umidade mássico ( $W$ ) em função do tempo. Pode-se verificar através desta avaliação que em termos da razão entre a quantidade de água e a massa seca da amostra, que ao contrário do observado quando se relaciona a variação de massa em função do tempo no ensaio de secagem, o aditivo incorporador de ar não produz efeito significativo.

Além disso, é interessante observar que para nenhuma das argamassas, para as condições de exposição empregadas, conseguiu-se retornar ao conteúdo de umidade mássico considerado como nulo, sendo que esta umidade residual é maior quanto maior o teor de CZP.

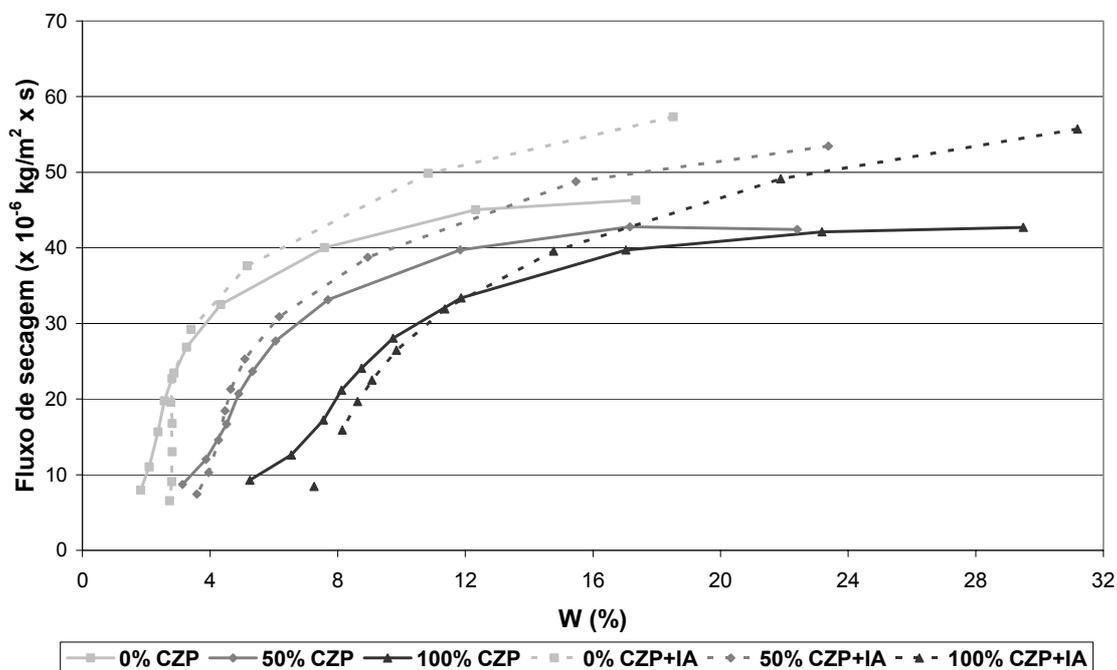


**Figura 68: Conteúdo de umidade mássico em função do tempo**

Através da *Figura 69* é possível verificar que para valores de conteúdo de umidade mássico superiores a 12% todas as argamassas com incorporador de ar apresentam maior fluxo de secagem do que as argamassas sem, sugerindo que o aditivo de ar por ser um tensoativo modifica as tensões intersticiais no estado endurecido. No entanto, para valores de conteúdo de umidade mássico inferior a 12% o fluxo de secagem passa a ser bastante parecido para um mesmo teor de CZP.

Ainda tem-se que quanto maior o teor de CZP menor é o fluxo de secagem, o que revela que a incorporação de cinzas piora a comunicação entre os poros, talvez em função do refinamento dos poros e da existência uma maior quantidade de poros do tipo garganta pela textura porosa da cinza. Logo, para a verificação da causa desta pior comunicação é bastante interessante a realização de ensaios de análise da estrutura porosa, como por exemplo porosimetria por intrusão de mercúrio e análise de imagem.

Quando emprega-se o aditivo incorporador de ar, de maneira geral, para mesmos valores de  $W$  e mesmos teores de cinza pesada o fluxo de secagem aumenta para teores de conteúdo mássico elevados.



**Figura 69: Fluxo de secagem em função do conteúdo de umidade mássico**

É sabido que o fluxo de secagem é muito mais lento do que o de absorção de água. Assim sendo, através das *Figuras 70 e 71* é possível verificar que o fluxo de secagem é mais do que  $10^7$  vezes mais lento do que o fluxo de absorção de água por capilaridade e que quanto maior o teor de CZP menor são os fluxos de secagem e absorção nos tempos iniciais.

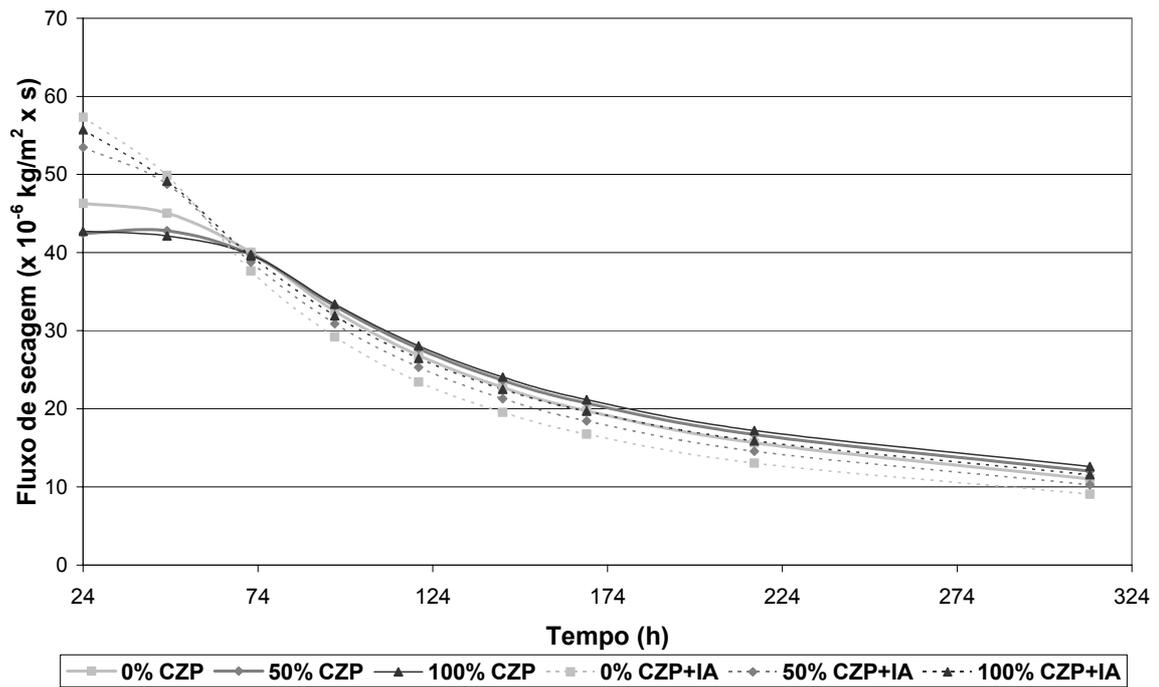


Figura 70: Fluxo de secagem em função do tempo

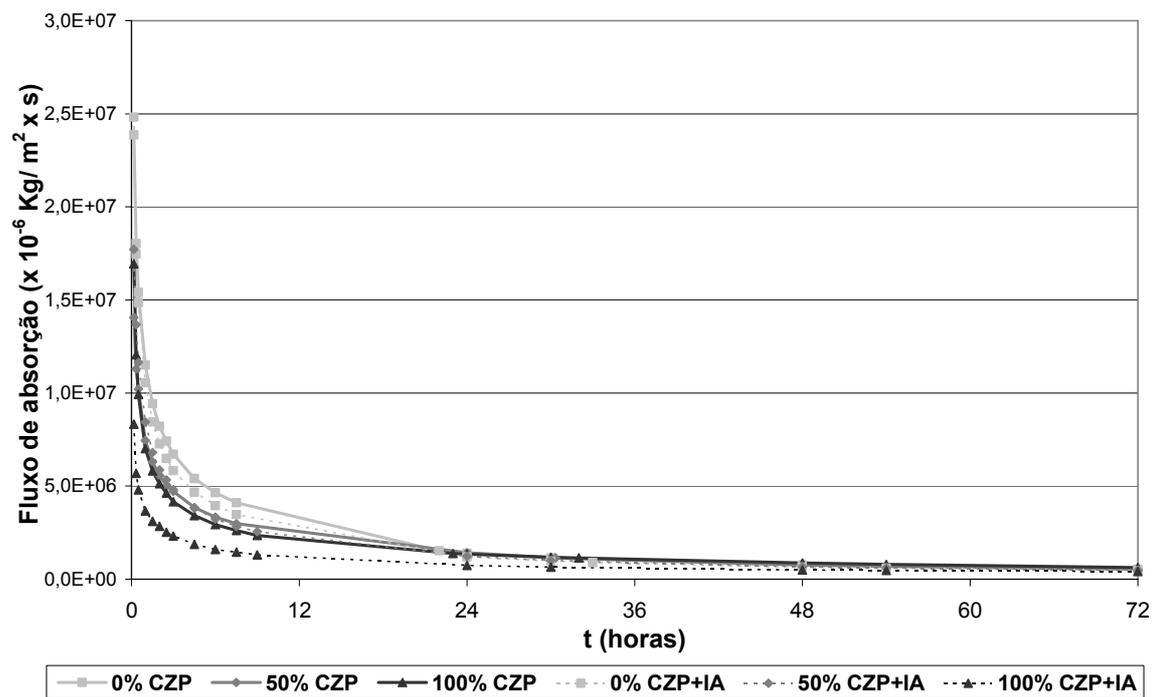


Figura 71: Fluxo de absorção de água por capilaridade em função do tempo

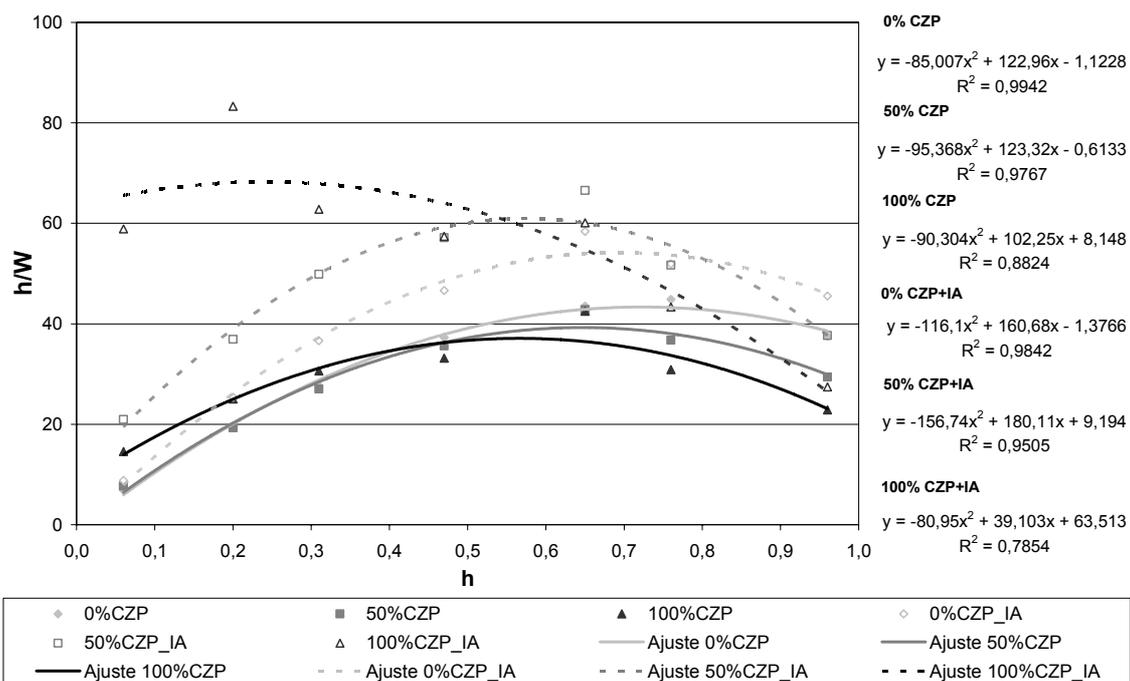
### 4.3.6 Adsorção

Na *Tabela 31* é apresentado o conteúdo de umidade mássico em função da umidade relativa das argamassas.

**Tabela 31: Conteúdo de umidade mássico em função da umidade relativa**

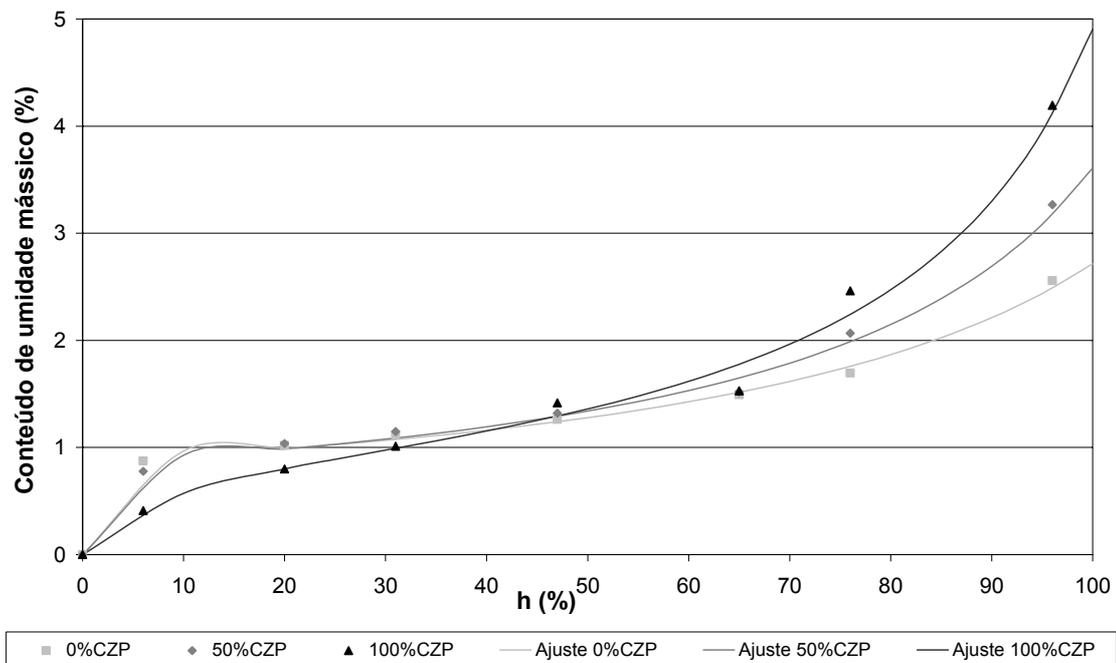
Solução salina	UR (%)	h	Conteúdo de Umidade Mássico (%)					
			0%CZP	50%CZP	100%CZP	0%CZP+IA	50%CZP+IA	100%CZP+IA
Hidróxido de Potássio	6	0,06	0,9	0,8	0,4	0,7	0,3	0,1
Acetato de Potássio	20	0,20	1,0	1,0	0,8	0,8	0,5	0,2
Cloreto de Magnésio	31	0,31	1,1	1,1	1,0	0,8	0,6	0,5
Bicromato de Sódio	47	0,47	1,3	1,3	1,4	1,0	0,8	0,8
Nitrito de Sódio	65	0,65	1,5	1,5	1,5	1,1	1,0	1,1
Cloreto de Sódio	76	0,76	1,7	2,1	2,5	1,5	1,5	1,8
Sulfato de Potássio	96	0,96	2,6	3,3	4,2	2,1	2,5	3,5

A partir dos dados experimentais obtidos no ensaio de adsorção apresentados na *Tabela 31* obteve-se os coeficientes A, B e C da quadrática que ajusta estes dados ao modelo GAB, bem como os valores do coeficiente de correlação através do gráfico da *Figura 72*. Através dos valores encontrados de correlação, que variam de 0,7854 a 0,9942, verifica-se que os dados experimentais ajustam-se bem ao modelo GAB. Tem-se também que quanto menor o teor de CZP melhor é o valor encontrado para a correlação.

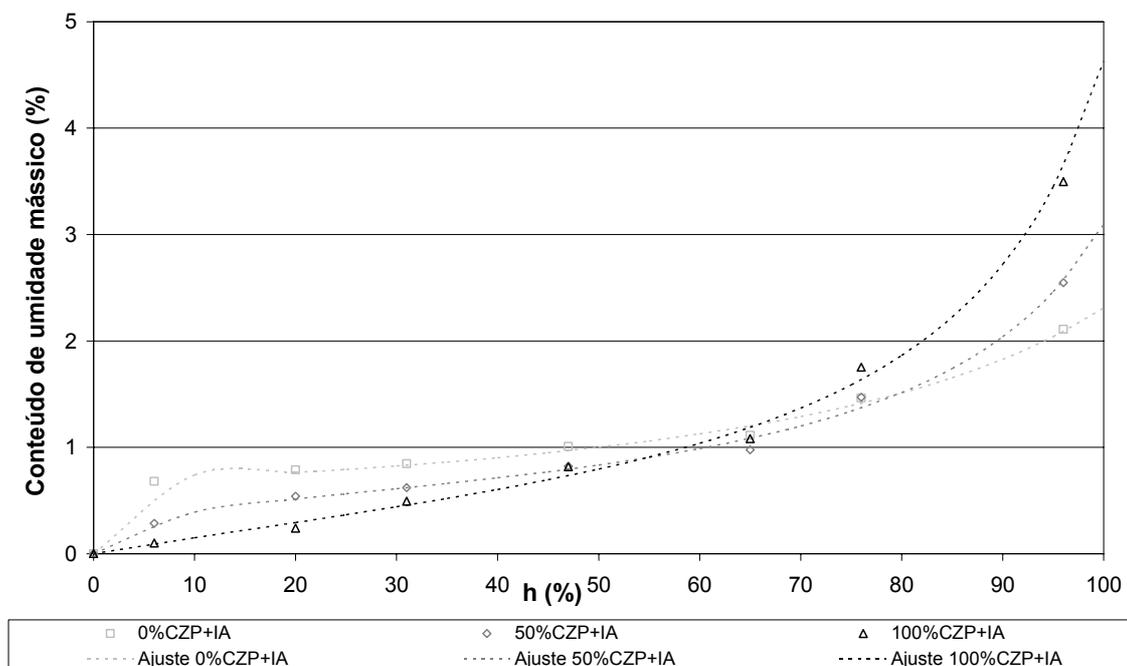


**Figura 72: Curva para determinação dos coeficientes A, B e C do modelo GAB**

Por meio da determinação dos coeficientes A, B e C do ajuste dos dados experimentais ao modelo GAB foram traçadas as curvas que relacionam  $W$  com a umidade relativa. Estas curvas estão apresentadas nas *Figuras 73 e 74* para as argamassas sem e com IA juntamente com os dados experimentais, e permitem novamente a verificação do bom ajuste dos dados experimentais ao modelo GAB.



**Figura 73: Ajuste dos dados experimentais das argamassas sem IA ao modelo GAB**



**Figura 74: Ajuste dos dados experimentais das argamassas com IA ao modelo GAB**

Através das *Figuras 73 e 74* é possível verificar que quanto maior o teor de cinza pesada maior é a quantidade de água presente nos poros das argamassas para teores de umidade relativa elevados. Este aumento pode ser decorrente de um volume maior de microporos (raio inferior a 20 Å) e mesoporos (raio entre 20 e 500 Å), já que para o material com macroporos (raio superior a 500 Å) a adsorção desempenha um papel pouco significativo e a condensação capilar começa apenas para valores de umidade relativa muito próximos de 100%.

Em tratando-se da condensação capilar, de acordo com a Lei de Kelvin-Laplace, ocorre somente nos poros de raio menor que o raio crítico, sendo que este é função da umidade relativa. Os valores do raio crítico para a temperatura de 50°C estão apresentados na *Tabela 32*.

Através dos dados apresentados nesta tabela verifica-se que para valores de UR até cerca de 60% a condensação capilar apenas ocorre nos microporos, para valores de UR entre 60 e 96% esta ocorre nos mesoporos.

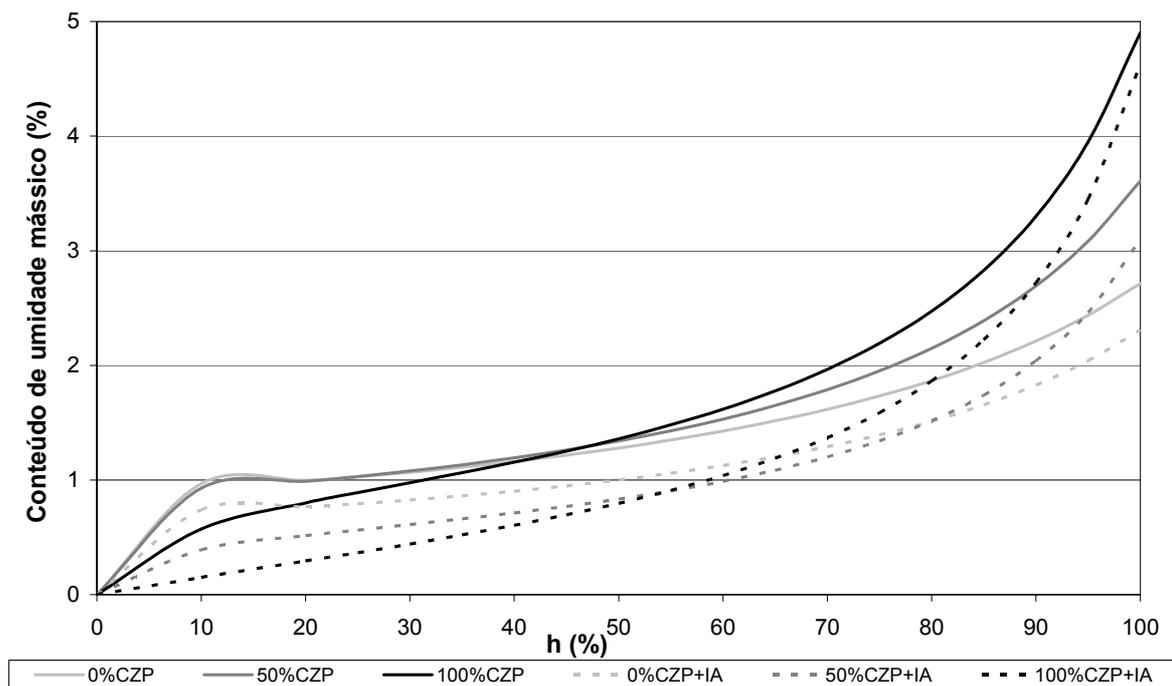
**Tabela 32: Raio crítico em função da umidade relativa (T=50°C)**

UR (%)	6	20	31	47	65	76	96
Raio crítico (Å)	4	6	9	13	23	37	246

Na *Figura 75* são apresentadas conjuntamente as curvas das argamassas com e sem IA através das quais verifica-se que para um mesmo teor de cinza o formato das curvas com e sem IA são bastante semelhantes, sendo que as com IA apresentam praticamente apenas um deslocamento vertical para baixo.

Quanto a análise da forma é interessante uma vez que através desta podem ser distinguidas três fases. Na primeira fase ocorre principalmente a adsorção monomolecular, a segunda é a caracterizada pela adsorção plurimolecular e a terceira pela condensação capilar dos mesoporos.

Na *Figura 75* é possível observar estas fases, sendo que os pontos que separam estas fases estão localizados nas faixas de umidade relativa entre 10 e 30% e 60 e 70%, que correspondem respectivamente ao primeiro e ao segundo ponto. Verifica-se, portanto, que a condensação capilar é mais significativa para valores de umidade superiores a 60%, na qual a condensação começa a ocorrer nos mesoporos.



**Figura 75: Curvas do ajuste através do modelo GAB das diferentes argamassas**

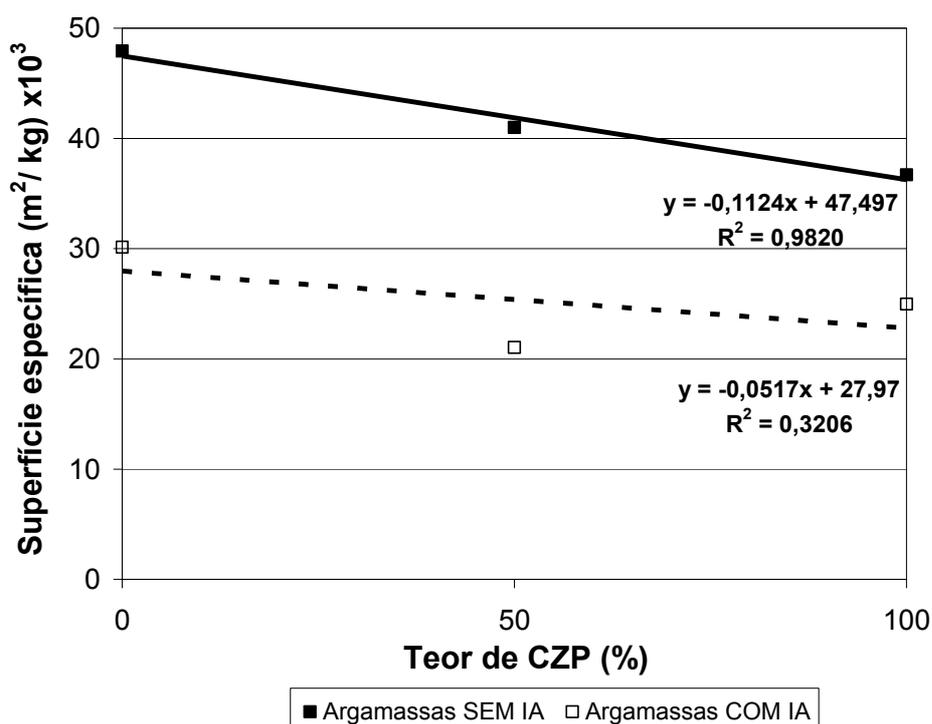
Na *Figura 75* nota-se ainda que ocorre nas curvas uma inversão de comportamento para teores de umidade entre 40% e 50% no caso das argamassas sem IA e entre 60% e 70% para as argamassas com IA. Esta inversão consiste em que as argamassas com cinzas superam a quantidade de umidade adsorvida pela argamassa confeccionada com 100% de areia somente a partir destes trechos.

Na *Tabela 33* são apresentados sintetizados os coeficientes A,B,C das curvas do ajuste através do modelo GAB e o ajuste destas curvas aos dados experimentais, bem como o parâmetro  $W_m$  (conteúdo de umidade mássico de uma monocamada) calculado a partir destes coeficientes. Além disso, é apresentado o valor de superfície específica das argamassas.

**Tabela 33: Coeficientes, parâmetros e superfície específica determinados através do modelo GAB**

Argamassa	Coeficientes				$W_m \times 10^3$	Se (m <sup>2</sup> /g)
	A	B	C	R <sup>2</sup>		
<b>0%CZP</b>	-85,007	122,960	-1,123	0,9942	8,237	47,94
<b>50%CZP</b>	-95,368	123,320	-0,613	0,9767	8,172	41,00
<b>100%CZP</b>	-90,304	102,250	8,148	0,8824	8,639	36,69
<b>0%CZP+IA</b>	-116,100	160,680	-1,377	0,9420	6,302	30,14
<b>50%CZP+IA</b>	-156,740	180,110	9,194	0,9842	5,116	21,05
<b>100%CZP+IA</b>	-80,950	39,103	63,513	0,7854	6,728	24,97

Em tratando-se da superfície específica das argamassas, tem-se que o emprego de cinzas pesadas e/ou incorporador de ar provoca uma redução nesta. No entanto, apenas para as argamassas sem aditivo é que foi verificada uma relação nítida entre o teor de CZP e a superfície específica. Comparando-se a redução da superfície específica proporcionada pelo aditivo e pelas cinzas, verifica-se que a influência do aditivo é mais significativa. Estas constatações podem ser realizadas através da *Figura 76*.



**Figura 76: Superfície específica das argamassas em função do teor de CZP**

#### 4.3.7 Condutividade térmica

Nas *Tabelas 34 e 35* são apresentados os valores médios de condutividade térmica em função do conteúdo de umidade mássico das argamassas sem e com incorporador de ar respectivamente, bem como, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Já os valores da inclinação da reta que relaciona a temperatura com o logaritmo neperiano do tempo são apresentados no ANEXO 6.

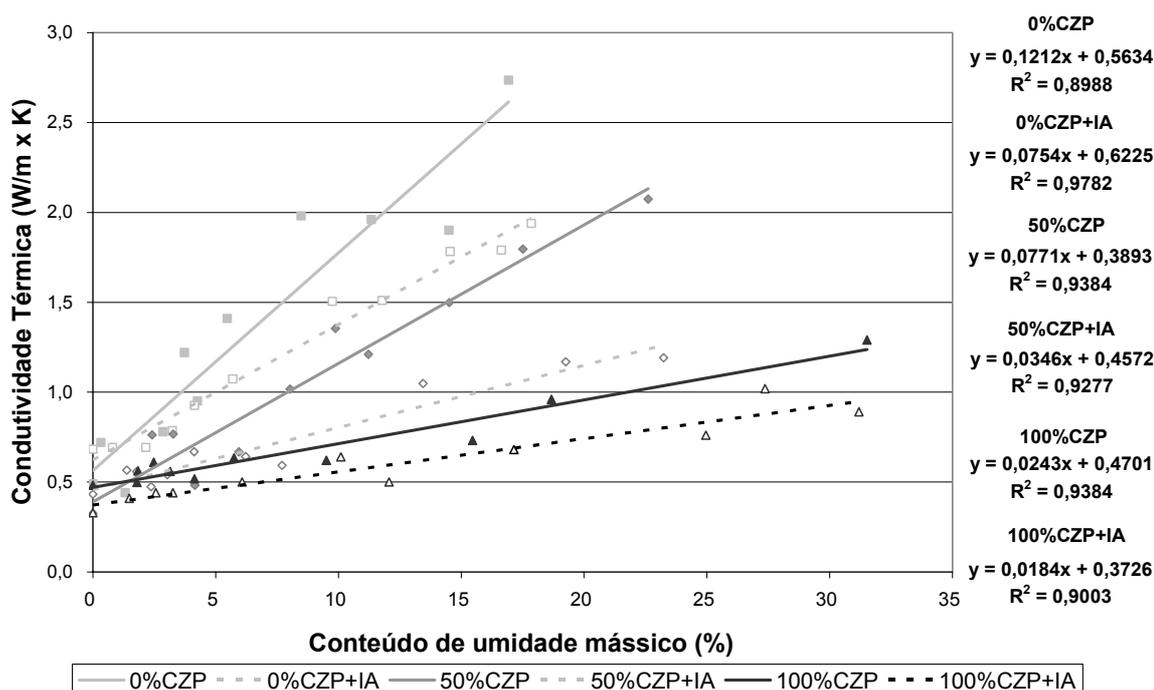
**Tabela 34: Condutividade térmica em função do conteúdo de umidade mássico das argamassas sem IA**

0%CZP				50%CZP				100%CZP			
W(%)	$\lambda$ médio (W/mK)	Desvio	CV (%)	W(%)	$\lambda$ médio (W/mK)	Desvio	CV (%)	W(%)	$\lambda$ médio (W/mK)	Desvio	CV (%)
0,00	0,49	0,03	5,86	0,00	0,33	0,01	2,10	0,00	0,48	0,03	6,12
0,33	0,72	0,00	0,37	2,41	0,76	0,04	5,78	1,80	0,50	0,01	1,86
1,32	0,44	0,01	1,55	3,27	0,77	0,03	3,91	1,84	0,56	0,01	2,27
2,86	0,78	0,08	9,78	4,15	0,48	0,02	4,42	2,48	0,61	0,00	0,45
3,73	1,22	0,02	1,46	5,94	0,67	0,00	0,39	3,15	0,56	0,01	2,50
4,26	0,95	0,13	7,34	8,03	1,02	0,04	3,81	4,14	0,52	0,02	3,40
5,47	1,41	0,10	1,19	9,88	1,35	0,10	7,05	5,75	0,63	0,01	0,91
8,48	1,98	0,02	6,70	11,22	1,21	0,14	11,48	9,51	0,62	0,01	2,25
11,34	1,96	0,13	11,77	14,51	1,50	0,06	3,90	15,46	0,73	0,01	2,00
14,50	1,90	0,22	10,00	17,51	1,80	0,14	7,73	18,67	0,96	0,03	3,19
16,93	2,74	0,24	8,83	22,61	2,07	0,13	6,07	31,52	1,29	0,08	5,87

**Tabela 35: Condutividade térmica em função do conteúdo de umidade mássico das argamassas com IA**

0%CZP+IA				50%CZP+IA				100%CZP+IA			
W(%)	$\lambda$ médio (W/mK)	Desvio	CV (%)	W(%)	$\lambda$ médio (W/mK)	Desvio	CV (%)	W(%)	$\lambda$ médio (W/mK)	Desvio	CV (%)
0,00	0,68	0,01	1,17	0,00	0,43	0,01	3,06	0,00	0,33	0,01	2,70
0,80	0,69	0,01	1,69	1,38	0,57	0,00	0,88	1,48	0,41	0,01	1,34
2,16	0,69	0,01	1,69	1,78	0,56	0,01	1,60	2,57	0,44	0,00	0,18
3,24	0,78	0,00	0,32	2,37	0,47	0,01	1,19	3,26	0,44	0,01	2,90
4,14	0,93	0,01	0,93	3,03	0,54	0,01	1,65	6,08	0,50	0,00	0,62
5,70	1,07	0,04	3,89	4,12	0,67	0,02	2,61	10,10	0,64	0,01	1,31
9,75	1,50	0,00	0,06	6,22	0,64	0,01	1,41	12,06	0,50	0,01	1,55
11,78	1,51	0,08	5,18	7,70	0,59	0,00	0,56	17,15	0,68	0,02	2,73
14,55	1,78	0,04	1,98	13,44	1,05	0,00	0,28	24,96	0,76	0,02	3,06
16,64	1,79	0,05	2,93	19,25	1,17	0,01	1,18	27,37	1,02	0,03	3,19
17,85	1,94	0,02	1,16	23,24	1,19	0,05	4,07	31,19	0,89	0,05	5,12

Como pode ser observado na *Figura 77*, para todos os teores de cinzas a condutividade térmica aumenta com o conteúdo de umidade mássico, sendo que isto já era esperado em virtude da água contida nos mesmos, que possui isolamento inferior ao do ar (a água tem uma condutividade aproximadamente 25 vezes maior do que o ar), substituir parte do gás existente no interior dos poros.



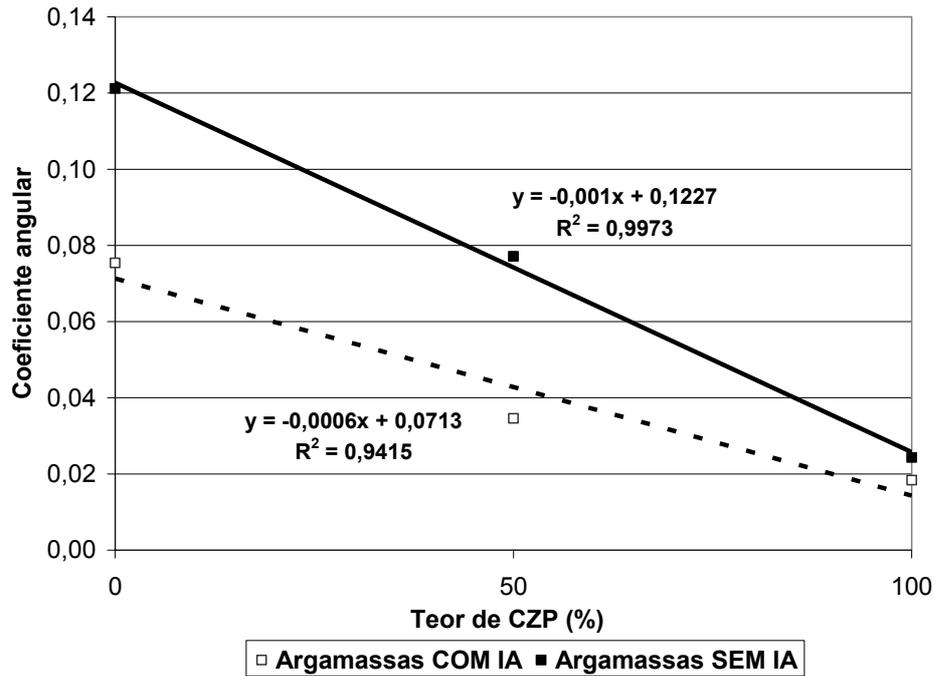
**Figura 77: Condutividade térmica das argamassas em função do conteúdo de umidade mássica**

Na *Tabela 36* estão apresentados o coeficiente angular (inclinação), o coeficiente linear (valor da condutividade térmica correspondente a  $W=0\%$ ) e o coeficiente de correlação linear.

**Tabela 36: Dados da reta que relaciona a condutividade térmica com o conteúdo de umidade**

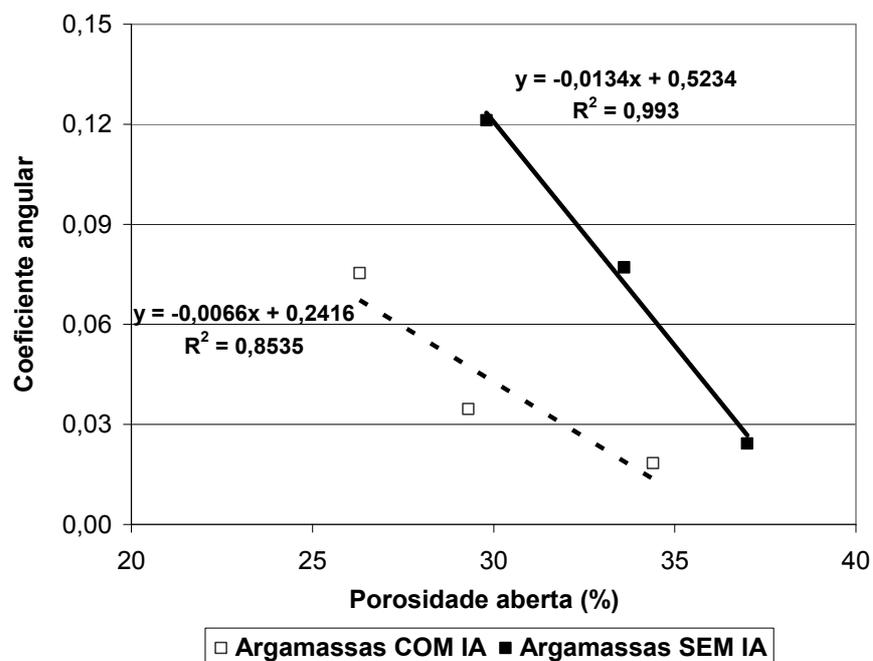
Argamassa	Coeficiente angular	Coeficiente linear	$R^2$
<b>0% CZA</b>	0,1212	0,5634	0,8988
<b>50% CZA</b>	0,0771	0,3893	0,9384
<b>100% CZA</b>	0,0243	0,4701	0,9384
<b>0% CZA + IA</b>	0,0754	0,6225	0,9782
<b>50% CZA + IA</b>	0,0346	0,4572	0,9277
<b>100% CZA + IA</b>	0,0184	0,3726	0,9003

Analisando-se o coeficiente angular das retas que relacionam a condutividade térmica com o conteúdo de umidade mássica é interessante verificar que quanto maior o conteúdo de cinza, tanto menor é a influência da umidade na condutividade térmica das argamassas, sendo que este comportamento ocorre tanto nas argamassas sem IA quanto nas com IA conforme ilustrado na *Figura 78*.



**Figura 78: Variação do coeficiente angular da reta que relaciona a condutividade térmica com "W" em função do teor de CZP**

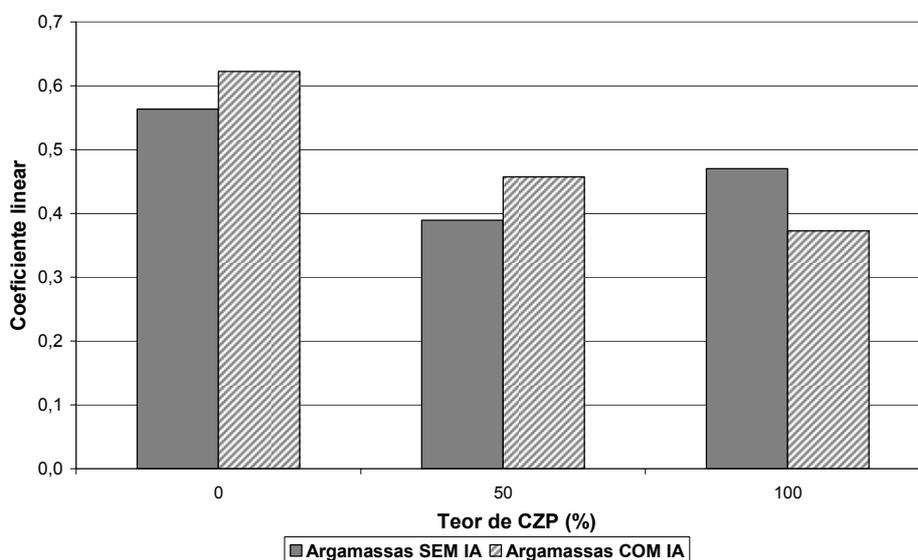
Esta menor suscetibilidade da condutividade ao conteúdo de umidade das argamassas com CZP, ou seja, a menor inclinação da reta que relaciona a condutividade com W, é decorrente da influência porosidade aberta na condutividade conforme mostrado na *Figura 79*.



**Figura 79: Variação do coeficiente angular com a porosidade aberta das argamassas**

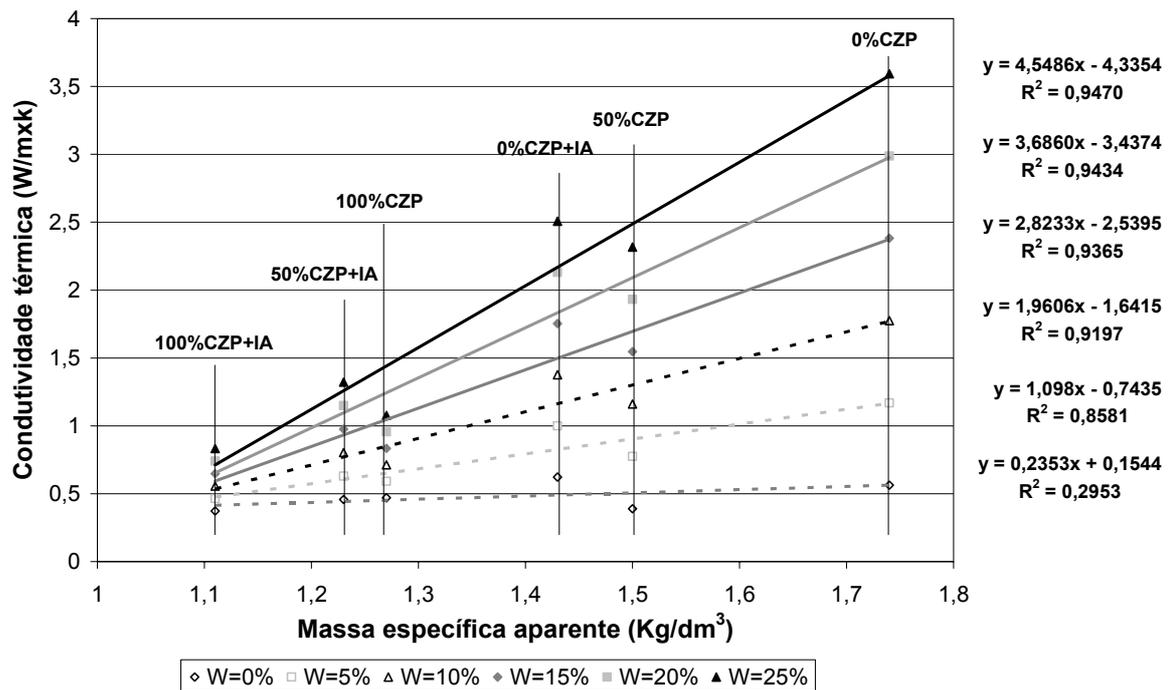
Tanto quando aborda-se os valores de condutividade térmica no estado seco obtidos experimentalmente quanto os obtidos através de regressão linear dos dados que relacionam a condutividade com o conteúdo de umidade mássico (coeficiente linear) verifica-se que não existe uma relação nítida entre o teor de CZP e a condutividade térmica, conforme pode ser verificado na *Figura 80*. Também não é verificada uma relação entre a massa específica e a condutividade.

No entanto, é observada uma tendência da cinza pesada reduzir a condutividade térmica no estado seco sendo por esta razão levantada a hipótese de que a condutividade da cinza é inferior a da areia. Sendo assim, mostra-se interessante a realização da medida da condutividade dos agregados isoladamente.



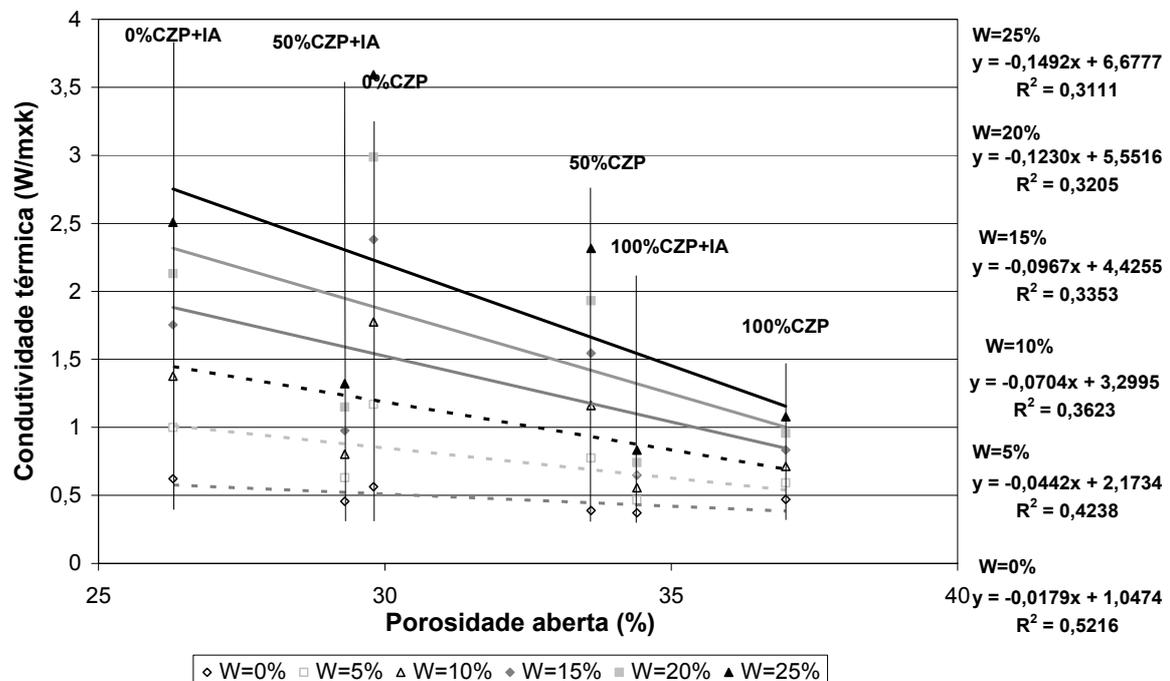
**Figura 80: Coeficiente linear em função do teor de CZP**

Através da *Figura 81* é possível perceber que não existe uma relação nítida entre a massa específica aparente e a condutividade térmica para conteúdos de umidade mássico nulo ( $W=0\%$ ). Isto também pode ser constatado quando faz-se a análise dos coeficientes lineares das retas que relacionam a condutividade com  $W$ . No entanto, a condutividade térmica das argamassas para conteúdos de umidade diferentes de zero apresentam nitidamente uma relação linear com a massa específica aparente, sendo que esta relação melhora quanto maior é o valor de  $W\%$ .



**Figura 81: Variação da condutividade térmica com a massa específica aparente das argamassas**

Através da *Figura 82* é possível perceber que não existe uma relação nítida entre a porosidade aberta e a condutividade térmica, conforme verificado para diferentes conteúdos de umidade mássico.

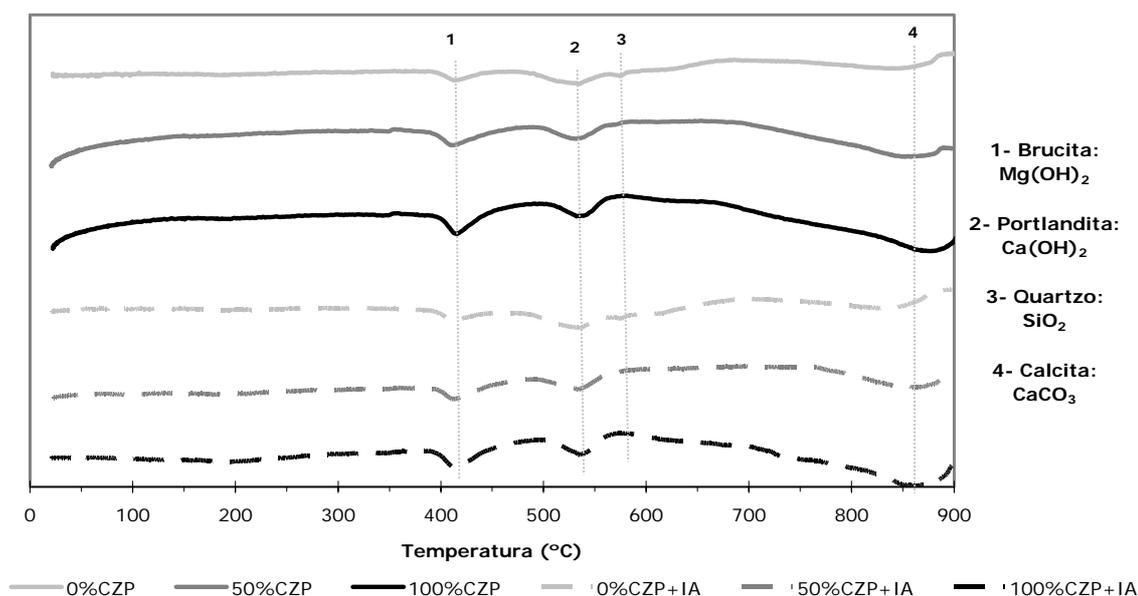


**Figura 82: Variação da condutividade térmica com a porosidade aberta das argamassas**

Em síntese, os resultados obtidos indicam que os fatores dominantes na condutividade térmica são o conteúdo de umidade mássico, e a porosidade aberta que está relacionada com a massa específica aparente. Logo, a cinza pesada produz uma redução na condutividade térmica das argamassas já que promove o aumento da porosidade aberta, sendo que esta redução é ainda mais acentuada com o emprego do incorporador de ar que promove uma estrutura com maior volume total de vazios (poros abertos e poros fechados).

#### 4.4 Grau de hidratação

Na *Figura 83* seguem os termogramas resultantes da análise térmica diferencial das argamassas.



**Figura 83: Análise térmica diferencial das argamassas**

Na análise térmica diferencial das argamassas apenas foram identificados os picos correspondentes a brucita, a portlandita, o quartzo e a calcita. Quanto a estes compostos tem-se que:

- A brucita é formada pela hidratação do óxido de magnésio que compõe 22% da cal utilizada nesta pesquisa;
- A área do pico de hidróxido de cálcio é maior quanto maior o teor de CZP presente nas argamassas;

- O quartzo que apresenta uma mudança de fase ( $\alpha$  para  $\beta$ ) a cerca de 573°C foi identificado apenas nas argamassas sem CZP. Assim, pode-se afirmar que a sílica existente na cinza pesada não possui essa estrutura cristalina hexagonal;
- A calcita é decorrente da carbonatação da cal.

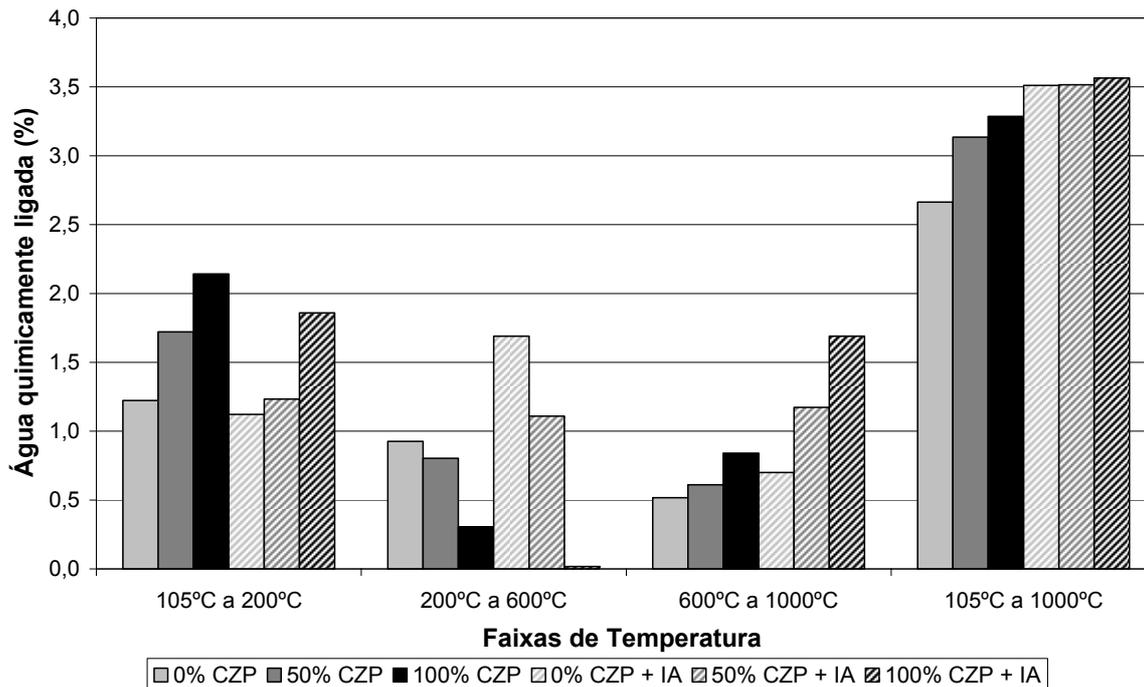
De maneira geral, quando comparam-se os termogramas das argamassas verifica-se que para um mesmo teor de CZP as argamassas com e sem IA não diferem entre si. Já quando compara-se argamassas com diferentes teores de CZP, nota-se uma nítida diferença na área dos picos.

Na *Tabela 37* são apresentados os valores médios de perda de massa ao fogo total (PF total) e a parcela atribuída a perda de água quimicamente ligada (PF água) obtidos na calcinação de duas amostras de cada argamassa, bem como de seus constituintes.

**Tabela 37: Perda de massa ao fogo total e a atribuída a água quimicamente ligada**

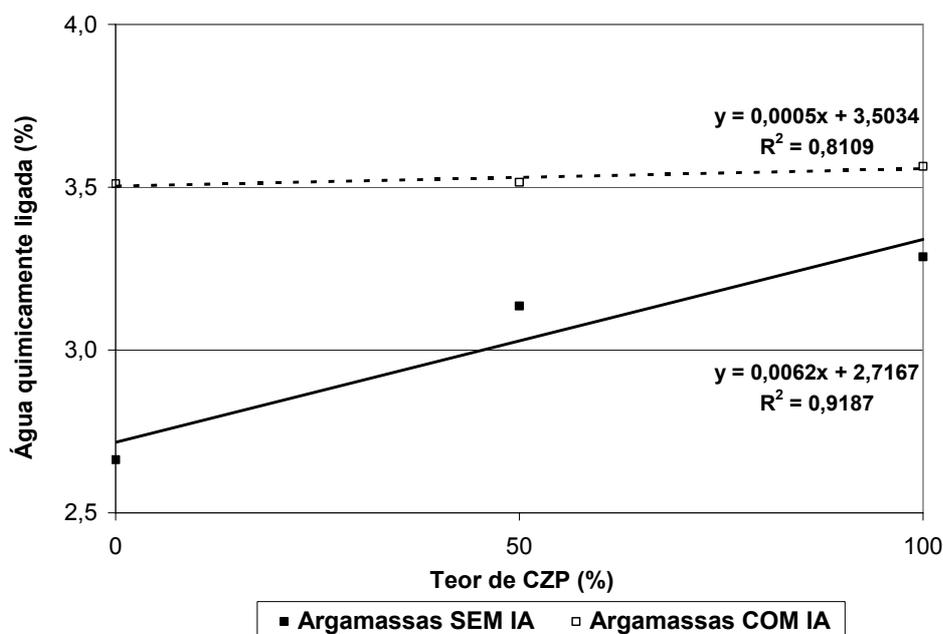
Argamassa	105°C a 200°C		200°C a 600°C		600°C a 1000°C		105°C a 1000°C	
	PF total	PF água	PF total	PF água	PF total	PF água	PF total	PF água
<b>0% CZP</b>	1,41	1,22	2,99	0,92	5,54	0,52	9,94	2,66
<b>50% CZP</b>	1,97	1,72	3,37	0,80	6,97	0,61	12,31	3,14
<b>100% CZP</b>	2,51	2,14	3,69	0,30	9,4	0,84	15,60	3,29
<b>0% CZP + IA</b>	1,31	1,12	3,76	1,69	5,74	0,70	10,80	3,51
<b>50% CZP + IA</b>	1,49	1,23	3,67	1,11	7,54	1,17	12,70	3,52
<b>100% CZP + IA</b>	2,23	1,86	3,41	0,02	10,26	1,69	15,89	3,56
<b>cimento</b>	0,08	x	1,51	x	3,89	x	5,48	x
<b>cal</b>	0,36	x	6,81	x	22,45	x	29,62	x
<b>CZP</b>	0,46	x	1,75	x	0,94	x	3,15	x
<b>areia</b>	0,15	x	0,79	x	0,21	x	1,15	x
<b>IA</b>	10,62	x	3,98	x	35	x	49,59	x

Na *Figura 84* é apresentada a quantidade de água quimicamente ligada correspondente as diferentes faixas de temperatura. Através desta é possível observar quanto maior o teor de CZP maior é a quantidade de água perdida dos hidratos de silicatos e aluminatos e na descabornatação da calcita, e menor é a quantidade de cal hidratada presente.



**Figura 84: Água quimicamente ligada**

A partir da *Figura 85* é possível observar que quanto maior o teor de CZP maior é a quantidade total de água quimicamente ligada no caso das argamassas sem aditivo. No entanto isto não é verificado para as argamassas com IA, pois para estas a quantidade de água quimicamente ligada praticamente não difere.



**Figura 85: Água quimicamente ligada em função do teor de CZP**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

As propriedades higrotérmicas das argamassas apresentam grande relevância em função de estarem intimamente relacionadas com os mecanismos de transferência de umidade e calor. A compreensão destas é necessária no que se refere à durabilidade, à estanqueidade, à degradação de aspecto e ao desempenho higrotérmico dos materiais de construção civil. Essa compreensão se torna ainda mais necessária quando se faz uso de materiais alternativos como resíduos industriais e o emprego de aditivos.

O procedimento experimental utilizado nesta pesquisa foi capaz de evidenciar a variabilidade das propriedades higrotérmicas das argamassas em função dos parâmetros teor de cinza pesada e emprego de aditivo incorporador de ar, bem como determinar quais destes parâmetros influem significativamente em cada propriedade e os seus efeitos.

Assim sendo, na *Tabela 38* são apresentados os parâmetros que influem, com 95% de confiabilidade, nas propriedades abordadas das argamassas. Estes parâmetros foram determinados estatisticamente através de análise de variância (teste ANOVA) dos resultados conforme apresentado no ANEXO 7.

Na *Tabela 38* estão sintetizadas algumas das principais conclusões a que pôde-se chegar através da presente pesquisa. Estas conclusões e outras advindas da metodologia e dos ensaios empregados na presente pesquisa são apresentadas a seguir.

As cinzas pesadas diminuem significativamente a consistência das argamassas, sendo que esta diminuição é maior quanto maior o teor de cinza pesada.

O aditivo incorporador de ar não apresentou efeito significativo na consistência. Isto pode ser atribuído ao fato das argamassas com cinzas sem aditivo já apresentarem elevado espalhamento e/ou em função do método da mesa de espalhamento, de acordo com o citado na bibliografia nacional, ser ineficiente para a avaliação do efeito do incorporador de ar.

No caso da retenção de água não conseguiu-se provar estatisticamente, com 95% de confiabilidade, que algum dos parâmetros analisados influem nesta propriedade. No entanto, verifica-se uma tendência do emprego da CZP reduzir a capacidade de retenção de água e do aditivo incorporador de ar aumentar. Assim sendo, estudos adicionais poderiam comprovar esta tendência.

**Tabela 38: Resumo dos parâmetros que influem significativamente nas propriedades das argamassas e seus efeitos**

Propriedades/ Características	Parâmetros que influem significativamente e o seu efeito			Parâmetro que mais influência	Efeito do parâmetro que mais influencia
	CZP	IA	CZPxIA		
Consistência	↓	–	*	CZP	diminui
Retenção de água	–	–	*	–	–
Massa específica no estado fresco	–	↓	*	IA	diminui
Massa específica no estado endurecido	↓	↓	↓	IA	diminui
Porosidade aberta	↑	↓	x	CZP	aumenta
Volume de água perdida durante a secagem da água de cura	↑	↓	–	IA	diminui
Volume de água absorvida por imersão	↑	↓	–	CZP	aumenta
Volume de água absorvida por capilaridade	↑	↓	x	IA	diminui
Sorptividade	↓	↓	↓	CZP	diminui
Ângulo de molhamento aparente	–	–	–	–	–
Volume de água perdida durante a secagem ao ar	↑	↓	–	IA	diminui
Adsorção p/ UR=20%	–	–	*	–	–
Adsorção p/ UR=65%	–	↓	*	IA	diminui
Adsorção p/ UR=96%	↑	↓	*	CZP	aumenta
Superfície específica	–	↓	*	IA	diminui
Condutividade térmica no estado seco	↓	↓	↓	CZP	diminui
Variação da condutividade térmica com a umidade	–	–	*	–	–
Água ligada quimicamente	–	–	–	–	–

Notas: ↑ (aumenta), ↓ (diminui), – (não se aplica), x (caso nos quais foi verificada uma inter-relação entre a CZP e o aditivo, mas que no entanto não pode-se precisar o seu efeito), \* (casos nos quais a inter-relação entre a CZP e o IA não pode ser verificada através da análise de variância em função de não se ter repetições para cada tratamento estatístico).

Na massa específica das argamassas no estado fresco verificou-se que o parâmetro que influencia de fato é o aditivo incorporador de ar. Logo, a quantidade de ar incorporado supera a redução de massa específica provocada pelo emprego do agregado mais leve, que é a cinza quando comparada com a areia.

Os valores obtidos para a massa específica no estado endurecido a partir de duas metodologias distintas (mercúrio e geométrico) diferem pouco entre si, pois apesar das massas específicas determinadas através do mercúrio serem sempre superiores, a diferença não ultrapassa 5%. Logo, o método geométrico pode ser empregado sem maiores implicações.

Verificou-se que na massa específica no estado endurecido os parâmetros que influem são o teor de CZP, o IA, bem como a inter-relação entre estes. No entanto, destes parâmetros o mais significativo é o incorporador de ar, seguido da CZP que possui praticamente a mesma influência. Ambos provocam a redução da massa específica, o que está de acordo com o fato da massa específica da CZP ser cerca de 30% menor do que a da areia e com a ação do incorporador de ar na promoção de um aumento do teor de ar incorporado.

Na porosidade aberta das argamassas o teor de cinza, o incorporador de ar e a inter-relação entre estes parâmetros influem significativamente, sendo que a cinza pesada promove o aumento da porosidade, enquanto o aditivo a sua redução. Dentre estes parâmetros é a cinza pesada o que mais influi.

É interessante observar que apesar das argamassas com incorporador de ar apresentarem maior quantidade de ar incorporado (vazios) apresentam menor porosidade aberta. Logo, grande parte destes vazios não é permeável a água, ou seja, encontram-se na forma de poros não interligados.

Em função da redução da porosidade aberta promovida pelo incorporador de ar tem-se que o emprego destes implica em argamassas menos penetráveis à água.

Em função do aumento da porosidade aberta promovida pela CZP tem-se que o emprego destas implica em argamassas mais penetráveis à água.

No volume de água perdido durante a secagem da água de cura, verifica-se que o teor de cinza e o emprego do aditivo influem significativamente, sendo o efeito destes contrário, já que a cinza promove o aumento e o incorporador de ar a sua redução. Dentre estes, o que mais influi é o incorporador de ar.

Com o emprego do IA ocorre uma redução no tempo necessário para a secagem da água da cura.

No volume de água absorvida por imersão o teor de CZP e o emprego do aditivo são os parâmetros que influem significativamente, promovendo respectivamente ou aumento e a redução desta. Dentre estes é o teor de CZP o mais significativo.

No volume de água absorvida por capilaridade os parâmetros que influem são o teor de CZP, o aditivo e a inter-relação entre estes, no entanto o parâmetro principal é o aditivo. Isto indica que o aumento indesejado de água absorvida pela cinza pode ser sanado com o emprego de aditivo que atua na diminuição da conectividade entre os poros.

No aparato experimental adotado para a medida da capilaridade de água, apesar da leitura no tubo superestimar os valores da absorção de água por causa do efeito da evaporação, os resultados apresentam a mesma tendência de comportamento obtido pela medição da massa. Além disso, o efeito de evaporação é reduzido nas primeiras horas de ensaio ( $t < 8$  horas). Logo, o uso do aparato em virtude da pouca variabilidade entre as leituras de amostras de uma mesma argamassa e a boa correlação linear obtida para os coeficientes de sorptividade está validado, sendo no entanto mais indicado para ensaios com duração até o momento em que a mancha capilar atinge o topo da amostra.

O coeficiente de sorptividade é influenciado pelo teor de CZP, o emprego de IA e a inter-relação entre estes parâmetros, sendo que todos eles promovem a sua redução. Porém, a redução promovida pela cinza pesada é bem mais marcante e pode ocorrer em função do refinamento dos poros das argamassas com cinza pesada. Este refinamento pode ser função da CZP, por sua finura, promover um efeito filler e em virtude do seu potencial pozolânico. Quanto ao incorporador de ar, este parece estar atuando na redução dos capilares acessíveis à água e/ou tornando mais heterogêneo o circuito dos raios de um poro.

Através dos resultados obtidos para o ângulo de molhamento aparente não foi possível comprovar a influência de nenhum parâmetro. Atribuí-se isto ao fato dos valores encontrados não diferirem significativamente em função do traço das argamassas.

São recomendados estudos adicionais do ângulo de molhamento aparente, já que foi observada uma tendência da CZP e do aditivo promoverem uma redução na molhabilidade. Esta redução é esperada em função das argamassas com cinzas no ensaio de absorção de água apresentarem maior tempo de ascensão da franja capilar e menor sorptividade, e do aditivo incorporador reduzir as tensões intersticiais.

No volume de água perdido durante a secagem ao ar, em concordância com o volume de água perdido na secagem da água de cura, os parâmetros que influem são o teor de CZP e o aditivo, que promovem, respectivamente, o aumento e redução do volume, sendo que é o aditivo que promove efeito mais significativo.

Tem-se então que nos fenômenos de secagem, conforme comprovado através de análise estatística, que o parâmetro governante é o aditivo. Isto também pode ser observado experimentalmente através do menor tempo de secagem das argamassas aditivadas. Esta redução do tempo de secagem sugere que o aditivo incorporador de ar por ser um tensoativo modifica as tensões intersticiais no estado endurecido

As argamassas com cinzas apesar de possuírem maior conteúdo de umidade inicial, apresentaram menor fluxo de secagem e maior conteúdo de umidade residual, sendo que isto sugere que as cinzas pioram a comunicação entre os poros. Caso isto de fato ocorra pode ser função do refinamento dos poros e de uma maior quantidade de poros do tipo garganta.

É sabido que o fluxo de secagem é muito mais lento do que o de absorção de água. No caso das argamassas estudadas o fluxo de secagem é mais de  $10^7$  vezes mais lento do que o fluxo de absorção de água por capilaridade.

Na adsorção de água, para a umidade relativa de 20% não é verificada a influência de nenhum parâmetro, já para a umidade de 65% é comprovada a influência do aditivo. No caso da umidade de 96% os parâmetros que influem são tanto o aditivo como a cinza, sendo a cinza o parâmetro mais significativo. Quanto ao efeito destes parâmetros é na diminuição da adsorção no caso do IA e no aumento no caso da CZP.

Os dados experimentais do ensaio de adsorção ajustam-se bem ao modelo GAB em todo o domínio de umidades relativas. No entanto este ajuste é melhor quanto menor o teor de CZP.

Quanto maior o teor de cinza pesada maior é a quantidade de água adsorvida nas paredes dos poros das argamassas para teores de umidade relativa elevados, logo o emprego da cinza pesada aumenta o volume total de microporos e mesoporos.

O emprego do IA promove a redução da quantidade de água adsorvida, sendo que a forma da curva permanece praticamente inalterada.

A diferença nas isotermas das argamassas revela diferenças na distribuição de tamanhos de poros.

Na superfície específica das argamassas, determinada por meio das isotermas de adsorção, o parâmetro que governa é o aditivo incorporador de ar, sendo que o efeito deste é reduzir a adsorção. Quanto ao efeito da CZP não conseguiu-se comprovar sua influência, mas no entanto foi observada uma tendência de redução.

A condutividade térmica no estado seco é influenciada pelo teor de CZP, o uso do aditivo e a inter-relação entre estes fatores, onde o teor de cinza pesada é o fator mais significativo. Todos estes parâmetros atuam na redução da condutividade e também na porosidade aberta que foi a propriedade correlacionada com a condutividade.

Percebeu-se que a condutividade térmica é governada pelo conteúdo de umidade e, e a porosidade aberta que está relacionada com a massa específica aparente. Logo, a cinza pesada produz uma redução na condutividade térmica das argamassas já que promove o aumento da porosidade aberta, sendo que esta redução é ainda mais acentuada com o emprego do incorporador de ar que promove uma estrutura com maior volume total de vazios (poros abertos e poros fechados).

A condutividade térmica aumenta com o conteúdo de umidade mássico para todas as argamassas analisadas. Isto já era esperado em virtude da água contida nos mesmos, que possui isolamento inferior ao do ar substituir parte do gás existente no interior dos poros.

Apesar de não conseguir-se comprovar estatisticamente, foi observado que o teor de cinza e o emprego de aditivo promovem a redução da influência da umidade na condutividade térmica das argamassas. Assim sendo, são sugeridas investigações adicionais.

Não conseguiu-se comprovar estatisticamente a influência dos parâmetros teor de CZP e aditivo na quantidade atribuída a água quimicamente ligada. No entanto, aparentemente as argamassas com IA possuem maior quantidade de água quimicamente ligada.

Em síntese, tem-se que tanto os teores de cinza pesada abordados quanto o emprego de aditivo incorporador de ar são parâmetros que influem significativamente nas propriedades higrotérmicas das argamassas. Dentre estes dois parâmetros torna-se difícil precisar qual tem maior influência. Já a inter-relação destes dois parâmetros foi comprovada no caso das seguintes propriedades: massa específica no estado endurecido, porosidade aberta, volume de água absorvida por capilaridade, sorptividade e condutividade térmica no estado seco.

Quanto ao emprego conjunto da cinza pesada e do incorporador de ar mostrou-se bastante interessante já que em muitas das propriedades relacionadas com a transferência de umidade, como por exemplo na absorção de água por capilaridade e imersão, na adsorção de água para umidades relativas elevadas, no tempo necessário para a secagem e na porosidade aberta, a cinza pesada provoca um aumento indesejado, que é minimizado ou eliminado com o emprego do aditivo.

Assim sendo, recomenda-se o emprego das cinzas pesadas em conjunto com o aditivo incorporador de ar, a fim de melhorar o seu comportamento higrotérmico.

## **5.2 Sugestões para pesquisas futuras**

A presente pesquisa procurou contribuir para o conhecimento tecnológico de algumas das propriedades higrotérmicas das argamassas de cimento e cal apresentando o estudo de caso com cinzas pesadas provenientes da queima do carvão mineral em substituição ao agregado natural e o emprego de aditivo incorporador de ar. Com o intuito de dar continuidade a pesquisa e aprofundar o tema, sugere-se a realização das seguintes pesquisas:

- avaliação do teor ideal de aditivo na dosagem de argamassas contendo ou não cinzas pesadas;
- avaliação de outras propriedades higrotérmicas como a difusividade hídrica, calor específico, permeabilidade a água e permeabilidade ao vapor de água;
- avaliação das propriedades higrotérmicas simultaneamente com a análise da estrutura porosa por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio e análise de imagens;
- criação de um banco de dados com as propriedades higrotérmicas dos principais materiais de construção empregados no Brasil;
- simulação dos mecanismos de transferência de umidade e calor em programas computacionais que empreguem como dados de entrada as propriedades higrotérmicas para avaliação do desempenho higrotérmico dos materiais e susceptibilidade do desempenho a variação destas propriedades;
- avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas com idades avançadas em função da reatividade pozolânica das cinzas;
- monitoramento das transferências de umidade e calor em protótipos submetidos a condições reais de exposição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Análise química do cimento Portland – Determinação da perda de massa ao Fogo, **NBR5743**. Rio de Janeiro, 1977.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da Massa Específica. **NBR 6474**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. Agregado para concreto. **NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. Agregados – Determinação da Composição Granulométrica, **NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Determinação do teor de material pulverulento, **NBR7219**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Determinação de impurezas orgânicas húmicas, **NBR7220**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária, **NBR 7251**. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. Argamassa de assentamento para alvenaria de blocos de concreto. Determinação da retenção de água, **NBR 9287**. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica, **NBR 9778**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, **NBR 9779**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão, **NBR13276**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, **NBR 13278**. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Argamassa de assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, **NBR13280**. Rio de Janeiro, 1995.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2002, p. 199.

ALVES, S.M.; PIETROBON, C.L.R.; PIETROBON, C. E. Determinação da condutividade térmica de materiais da construção civil e sua variação com umidade e densidade. In: Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2º, Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 5º, Fortaleza, CE, 1999. **Anais...** Fortaleza, CE, 1999.

ANDRADE, L. B. **Metodologia de avaliação para uso de cinzas pesadas de termelétricas como agregado natural para concreto.** Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. p. 268.

ASTM C 1498-01, **Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials.** 2001.

ASTM C 618, **Standard specification for coal fly ash and raw of calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete.** Philadelphia, 1995.

BARBARE, N.; SHUKLA, A.; BOSE, A. Uptake and loss of water in a cenosphere–concrete composite material. **Cement and Concrete Research**, Volume 33, Issue 10, October 2003, P. 1681-1686.

BAROGHEL, B. V.; MAINGUY, M.; LASSABATERE, T.; COUSSY, O. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, Volume 29, Issue 8, August 1999, P. 1225-1238

BLANCO, F.; GARCÍA, P.; MATEOS, P.; AYALA, J. Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with **cenospheres**. **Cement and Concrete Research**, Volume 30, Issue 11, November 2000, Pages 1715-1722

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de reometria por squeeze-flow. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas/ I International Symposium on Mortars Technology, 2005, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis, SC, p. 121-143.

CARPENTER, T.A., DAVIES, E.S., HALL C., HALL, D.L, HOFF, W.E., WILSON, M.A. Capillary water migration in rock: process and materials properties examined by NMR imaging. **Materials and Structures**, v.26, p. 286-292, 1993.

CAVANI, G. R.; JOHN, V. M.; ANTUNES, R. Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas mistas. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997. **Anais...**, Salvador, 1997, p.110-119.

CHERIAF, M.; ROCHA, J. C.. Caracterização dos resíduos industriais do estado de Santa Catarina e as possibilidades de valorização na construção civil. In: Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1º. **Anais...**, Canela, 1997, p. 81-92.

DAIAN, J. F. **Processus de condensation et de transfert deau dans un matériau meso et macroporeux. Étude expérimentale du mortier de ciment.** These Docteur Es-Sciences Physiques. Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembre de 1986.

DAN W.; QUÉNARD, D.; SALLÉE, H.; COPÉ, R. Comportement hydrique d'un composite ciment-polymère-verre (CCPV) et influence de l'humidité sur ses propriétés mécaniques. **Cahiers du CSTB**. Livraison 295, Cahier 2304, Décembre 1988.

DEMIRBOGA R. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. **Energy and Buildings**. February de 2003, vol. 35, no. 2, p. 189-192.

DEMIRBOGA, R.; ÖRÜNG, I.; GÜL, R. Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. **Cement and Concrete Research**, Volume 31, Issue 11, November de 2001, p. 1627-1632.

DE VRIES, D. A. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 7, 1987, p. 1343-1350.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Testing of thermal insulating materials. Determination of thermal conductivity by means of the guarded hot plate apparatus. **DIN 52612**, (Provisional Standard Part 2), 1979.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Determination of the water absorption coefficient of construction materials, **DIN 52617**, Berlin, 1987.

DOE. <http://www.eere.energy.gov/buildings/tech/enveloperd/hygrothermal.html>. Acesso em novembro de 2005.

FARHAT, G. M. Métodos de medição de condutibilidade térmica em materiais de construção civil: utilizados no IPT. In: Simpósio Latino-Americano de Racionalização da Construção e sua Aplicação às Habitações de Interesse Social. **Anais...**, São Paulo, 1981, p. 537-542.

FARIA, E. F. **Predição da Exotermia da Reação de Hidratação do Concreto Através de Modelo Termo-Químico e Modelo de Dados**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2004, p. 145.

FERNANDES, C. P. **Estudo dos processos de condensação e migração de umidade em meios porosos consolidados: análise experimental de uma argamassa de cal e cimento**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 1990, p. 135.

FERNANDES, C. P.; PHILIPPI, P. C.; PEDRINI, A. A influência do conteúdo de umidade sobre a condutividade térmica aparente de materiais porosos consolidados : análise experimental para uma argamassa de cal e cimento. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1º. **Anais...** Gramado, 1990, p. 79-86.

FREITAS, V. P.; ABRANTES, V.; CRAUSSE, P. Moisture migration in building walls—Analysis of the interface phenomena. **Building and Environment**, Volume 31, Issue 2, March 1996, p 99-108.

FREITAS, V. **Transferência de umidade em paredes de edifícios - Análise do fenómeno de interface**. Tese (Pós graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto., 1992, p. 200.

- GALLÉ, C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. **Cement and Concrete Research**, Volume 31, Issue 10, October 2001, p. 1467-1477
- GEIKER, M.; GRUBE, H.; LUPING, T.; NILLSON, L.; ANDRADE, C. Laboratory Test Methods. Performance Criteria for Concrete Durability, **RILEM Report 12**, J Kropp, and H K Hilsdorf, (ed), p. 327 .
- HADDAD, E.; ANUATI, F.; LOPES, M. et al. **Políticas públicas para a utilização de resíduos em habitação**. [Relatório IPT/DES – AETEC/DIGEO/DEC n.34904196 – Interessado: FINEP]. São Paulo: IPT, 1997. p.158.
- HALL, C. Barrier performance of concrete: a review of fluid transport theory. **Materials and Structures**, n. 27, 1994, p. 291-306.
- HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. **Magazine of concrete research**, v.41, n. 147, 1989, p. 51-61.
- HANEHARA ,S.; TOMOSAWA, F.; KOBAYAKAWAL, M.; KWANGRYUL, H. Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. **Cement and Concrete Research**, Volume 31, Issue 1, January 2001, p. 31-39.
- HANZIC, L.; ILIC, R. Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete. **Cement and Concrete Research**, Volume 33, Issue 9, September 2003, p. 1385-1388.
- HELENE, P. R. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Pós - graduação em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993, p. 231.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTADÍSTICA (IBGE). **Censo 2000**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 25 de maio de 2004.
- KHAN , M. I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. **Building and Environment**, Volume 37, Issue 6, June 2002, p. 607-614
- KOII, V. D. **Moisture transport in cellular concrete roofs**. Ph.D. Thesis, University of Technology, Waltman Delft, 1971.
- KREUZ, A. L. **Utilização de cinzas pesadas de termoelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- KUMARAN, K.; LACKEY, J.; NORMANDIN, N.; VAN REENEN, D.; TARIKU, F, **Summary Report from Task 3 of MEWS Project**. Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, Canada, (NRCC-45369), 2002, p. 1-68.

KUMARAN, K.; LACKEY, J.; NORMANDIN, N.; VAN REENEN, D.; TARIKU, F. **Heat, Air and Moisture Transport Properties of Several North American Bricks and Mortar Mixes**. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 32, No. 5, 2004, p. 383-389.

KUMARAN, M. K. **Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts**. Final Report, Volume 3, Task 3: Material Properties, International Energy Agency Annex 24, Laboratorium Bouwfysica, K. U. -Leuven, Belgium. 1996.

KULA, I.; OLGUN, A.; SEVINC, V.; ERDOGAN, Y. An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash, and coal bottom ash as Portland cement replacement materials. **Cement and Concrete Research**, Volume 32, Issue 2, February 2002, p. 227-232

LENZI, E. J. **Influência do uso de cinzas da combustão de carvão mineral em argamassas de revestimento**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2001, p. 132.

MALHOTRA, V. M.; VALIMBE, P. S. AND WRIGHT, M. A. Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites. **Fuel**, Volume 81, Issue 2, January 2002, p. 235-244.

MANZ, O. E. Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products. **Fuel**, Volume 76, Issue 8, June 1997, p. 691-696.

MARGON, P. V. **Influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento: dosagem por curvas granulométricas**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, p.127.

MARTYS, N. S.; FERRARIS, C. F. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, Volume 27, Issue 5, May 1997, p. 747-760

MEROUANI, L. **Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade**. Thèse Docteur 3 Cycle. Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembro de 1987.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto : estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo : Pini, 1994.

MONTE, R.; UEMOTO, K. L.; SELMO, S. M. S. Qualificação de aditivos incorporadores de ar para argamassas de assentamento e revestimento. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 5°. **Anais...** São Paulo, 2003, p. 181-194.

MONTEIRO, P. Disponível em: <http://www.ce.berkeley.edu/~paulmont/CE60New>. Acesso em 25 de Agosto de 2005.

MUSTELIER, N. L. **Avaliação do desempenho de blocos e argamassas com cinzas de carvão mineral incorporada para aproveitamento em conjuntos habitacionais**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, p. 127.

NAKAKURA, E. H. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a MERUC**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003, p. 198.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo : Pini, 1997.

PAES, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassas nos momentos iniciais de pós-aplicação**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, 2004.

PANDEY S. P.; SHARMA, R. L. The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, Volume 30, Issue 1, January 2000, p. 19-23.

PERRIN, B. **Etude des transferts couples de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil**. These Docteur d'État Université Paul Sabatier de Toulouse, Janeiro de 1985.

PHILIPPI, P. C.; FERNANDES, C. P.; YUNES, P. R. Higroscopicidade e capilaridade nos materiais de construção. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2°. **Anais...** Florianópolis, 1993, p.171-178.

PIAZZA, J. L.; RUI, V. Comportamento das cinzas pesadas de carvão mineral como substituto da areia quartzosa em argamassas. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. **Anais...** Vitória, 1999, p. 389-401.

POZZOBON, C. E. **Estudo sobre aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. p.122.

RANGANATH, R. V.; BHATTACHARJEE, P.; KRISHNAMOORTHY, S. Influence of Size Fraction of Pondered Ash on its Pozzolanic Activity. **Cement and Concrete Research**, Volume 28, Issue 5, May 1998, p. 749-761.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.; POZZOBON, C.; MAIA, M. S., MAGRI, L.; XAVIER, S.M.T. Reaproveitamento das cinzas pesadas do Complexo Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: aspectos tecnológicos e ambientais. In: XV Seminário nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. **Anais...** Foz do Iguaçu, Paraná, 1999.

SAFIUDDIN, M.; HEARN, N. Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. **Cement and Concrete Research**, In Press, Corrected Proof, Available online 23 Dezembro 2004.

SANTOS, F. I. G., LENZI, E. J.; ROCHA, J. C., CHERIAF, M., Avaliação de resíduos para uso em argamassas - estudo com cinza pesada. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável/ ENTAC04 - 10 Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**, São Paulo, 2004.

SANTOS, F. I. G.; LENZI, E. J. ; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Estudo de argamassas com cinzas pesadas de termelétricas. In: VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. **Anais...**, São Paulo, 2003.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concreto com vistas à avaliação de suas durabilidades.** Tese (Pós- graduação em Engenharia Civil)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998, p. 172.

VALEN, M.S. **Moisture transfer in organic coatings on porous materials--the influence of varying environmental conditions,** 1998. Disponível em: [www.bygg.ntnu.no/batek/personal/valen/dravh.htm](http://www.bygg.ntnu.no/batek/personal/valen/dravh.htm).

XI, Y.; BAZANT, Z. P.; MOLINA, L.,JENNINGS, H. M. Moisture diffusion in cementitious materials Adsorption isotherms. **Advanced Cement Based Materials,** Volume 1, Issue 6, November 1994, p. 248-257.

XI, Y.; BAZANT, Z. P.; MOLINA, L.,JENNINGS, H. M. Moisture diffusion in cementitious materials Moisture capacity and diffusivity. **Advanced Cement Based Materials,** Volume 1, Issue 6, November 1994, p. 258-266.

## **ANEXOS:**

- ANEXO 1: Dados do ensaio de massa específica aparente**
- ANEXO 2: Dados do ensaio de absorção de água por imersão**
- ANEXO 3: Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade**
- ANEXO 4: Dados do ensaio de ângulo de molhamento aparente**
- ANEXO 5: Dados do ensaio de secagem ao ar**
- ANEXO 6: Dados do ensaio de condutividade térmica**
- ANEXO 7: Análise de variância dos resultados**

## ANEXO 1: Dados dos ensaio de massa específica aparente

Imersão em mercúrio

Argamassa	Massa amostra (g)	V amostra (cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão
0% CZP	37,22	21,43	1,74	1,74	0,01
	39,36	22,57	1,74		
	56,72	32,86	1,73		
50% CZP	40,20	26,76	1,50	1,50	0,01
	34,83	23,26	1,50		
	47,31	31,76	1,49		
100% CZP	24,03	19,01	1,26	1,27	0,01
	28,55	22,41	1,27		
	35,79	28,28	1,27		
0% CZP+IA	39,056	28,03	1,39	1,43	0,04
	35,15	23,96	1,47		
	58,476	41,19	1,42		
50% CZP+IA	31,872	25,79	1,24	1,23	0,00
	35,478	28,82	1,23		
	52,223	42,21	1,24		
100% CZP+IA	25,782	22,92	1,12	1,11	0,02
	29,38	26,84	1,09		
	51,01	45,68	1,12		

NBR13280/95

Argamassa	Massa da amostra (g)	D1 (mm)	D2 (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	V amostra (cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão
0% CZP	322,3	50,10	50,05	98,85	98,30	98,80	194,28	1,66	1,67	0,01
	319,3	49,20	49,90	98,90	98,20	99,10	190,39	1,68		
	318,1	49,40	48,95	99,15	99,40	99,45	188,66	1,69		
50% CZP	280,5	49,90	50,10	98,75	100,10	100,05	195,63	1,43	1,45	0,02
	285,7	50,10	49,90	99,40	99,90	100,10	195,96	1,46		
	282,8	50,10	49,30	99,05	99,60	99,90	193,06	1,46		
100% CZP	237,1	49,10	49,10	100,35	100,50	100,40	190,13	1,25	1,24	0,01
	238,1	49,50	49,50	100,25	100,10	100,20	192,79	1,23		
	237,7	49,10	49,90	99,90	100,50	100,10	192,76	1,23		
0% CZP + IA	266,8	49,25	49,65	99,30	99,65	98,55	190,45	1,40	1,42	0,05
	286,6	50,00	50,05	98,00	99,50	99,90	194,84	1,47		
	264,8	49,40	49,65	99,00	99,95	99,25	191,48	1,38		
50% CZP + IA	234,2	50,00	50,30	99,40	99,00	99,30	196,02	1,19	1,22	0,02
	232,0	49,30	49,40	99,25	100,20	99,85	190,83	1,22		
	236,2	50,00	49,15	98,30	98,65	98,50	190,10	1,24		
100% CZP + IA	209,3	49,90	50,10	100,95	100,60	99,95	197,33	1,06	1,06	0,01
	208,8	49,80	51,05	99,20	99,25	98,70	197,80	1,06		
	207,0	49,30	49,80	99,90	100,30	100,20	193,09	1,07		

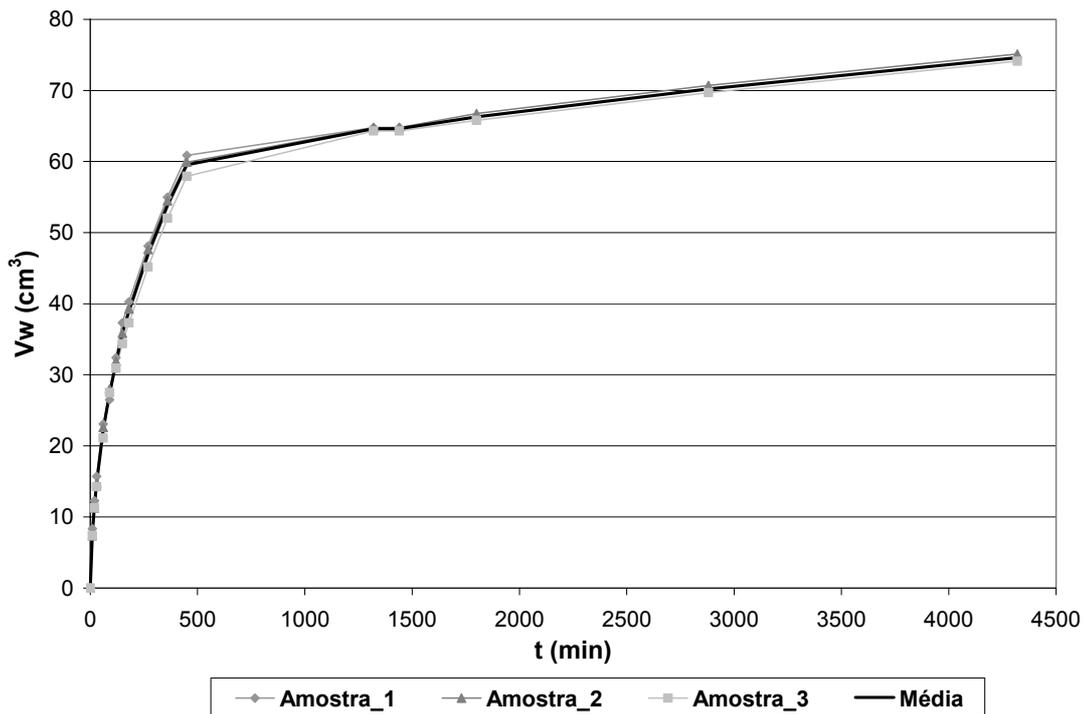
## ANEXO 2: Dados do ensaio de absorção de água por imersão

Argamassa	Massa seca (g)	Massa imersão (g)					Massa balança hidrostática (g)
		4 h	8 h	24 h	48 h	72 h	
0% CZP	157,268	183,304	183,514	184,022	184,110	184,257	93,2
	158,575	184,747	184,940	185,302	185,527	185,633	94,0
	154,254	180,870	181,008	181,464	181,466	181,721	91,3
50% CZP	138,841	168,607	168,827	169,259	169,592	169,628	77,4
	140,227	170,481	170,698	171,093	171,336	171,544	78,4
	133,867	163,298	163,392	163,805	163,953	164,263	74,7
100% CZP	115,533	148,371	148,657	149,152	149,499	149,752	57,6
	112,954	143,906	144,648	145,117	145,437	145,747	56,1
	115,495	148,430	148,899	149,417	149,786	149,931	57,5
0% CZP + IA	127,924	150,630	150,831	151,134	151,228	151,228	61,2
	129,747	152,827	152,996	153,262	153,301	153,345	62,7
	122,748	145,723	145,876	146,229	146,236	146,259	59,1
50% CZP + IA	117,091	143,700	143,947	144,354	144,383	144,383	51,2
	114,232	139,903	140,129	140,517	140,567	140,640	48,7
	112,578	138,583	138,810	139,258	139,259	139,283	50,3
100% CZP + IA	98,804	124,801	128,487	128,964	129,184	129,380	40,4
	101,895	127,480	132,336	132,867	133,091	133,303	41,2
	103,678	135,286	135,766	136,280	136,444	136,642	42,1

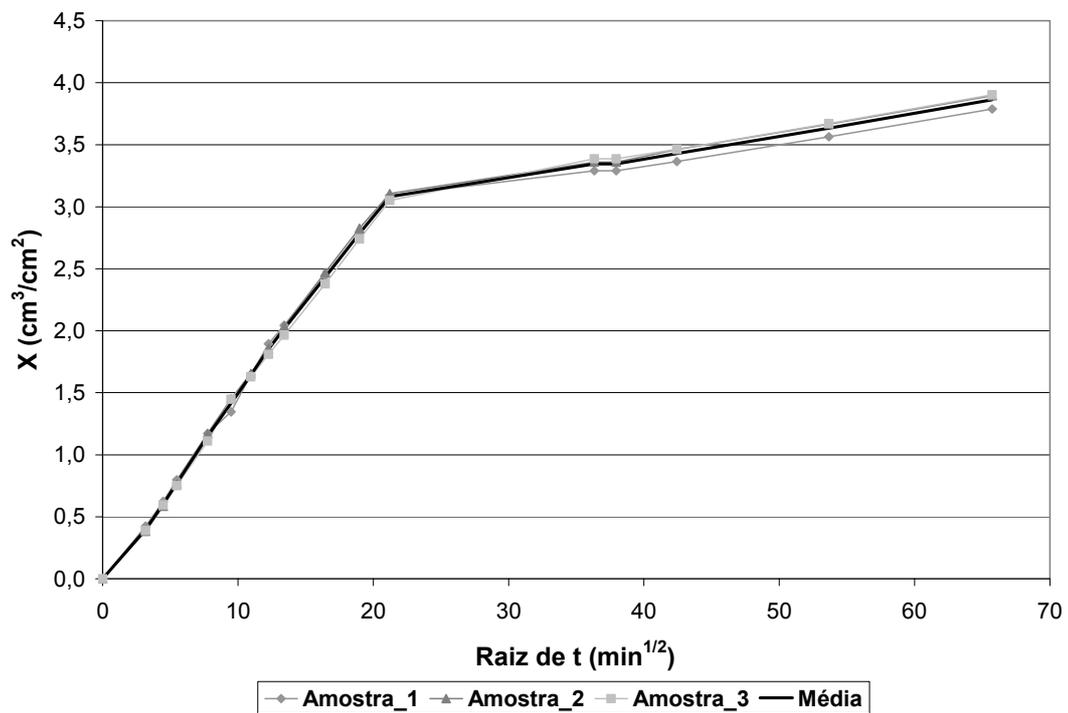
### ANEXO 3: Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade

Dados do ensaio: 0% CZP			
Amostra	1	2	3
A tubo (cm <sup>2</sup> )	4,91	4,91	4,91
A amostra (cm <sup>2</sup> )	19,69	19,28	18,99
V amostra (cm <sup>3</sup> )	194,28	190,39	188,66
ρ da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	1,66	1,68	1,69
m amostra seca (g)	322,3	319,3	318,1
m amostra após 72 horas (g)	379,2	375,5	374,3
m H <sub>2</sub> O (g)	56,9	56,2	56,2
Δ Vw total do tubo (g)	74,6	75,1	74,1
m H <sub>2</sub> O que evaporou (g)	17,7	18,9	17,9
t em que a mancha capilar atinge o topo do cp (min)	450	450	450

0% CZP		Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3				Média		
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)
0	0,00	25,2	0,0	0,0	0,0	25,3	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	0,0
10	3,16	23,5	1,7	8,3	0,4	23,8	1,5	7,4	0,4	23,9	1,5	7,4	0,4	25,0	7,4	0,4
20	4,47	22,7	2,5	12,3	0,6	23,0	2,3	11,3	0,6	23,1	2,3	11,3	0,6	24,8	11,3	0,6
30	5,48	22,0	3,2	15,7	0,8	22,3	3,0	14,7	0,8	22,5	2,9	14,2	0,7	24,7	14,2	0,7
60	7,75	20,5	4,7	23,1	1,2	20,7	4,6	22,6	1,2	21,1	4,3	21,1	1,1	24,3	21,1	1,1
90	9,49	19,8	5,4	26,5	1,3	19,6	5,7	28,0	1,5	19,8	5,6	27,5	1,4	24,0	27,5	1,4
120	10,95	18,6	6,6	32,4	1,6	18,8	6,5	31,9	1,7	19,1	6,3	30,9	1,6	23,8	30,9	1,6
150	12,25	17,6	7,6	37,3	1,9	18,0	7,3	35,8	1,9	18,4	7,0	34,4	1,8	23,6	34,4	1,8
180	13,42	17,0	8,2	40,3	2,0	17,3	8,0	39,3	2,0	17,8	7,6	37,3	2,0	23,4	37,3	2,0
270	16,43	15,4	9,8	48,1	2,4	15,6	9,7	47,6	2,5	16,2	9,2	45,2	2,4	23,0	45,2	2,4
360	18,97	14,0	11,2	55,0	2,8	14,2	11,1	54,5	2,8	14,8	10,6	52,0	2,7	22,7	52,0	2,7
450	21,21	12,8	12,4	60,9	3,1	13,1	12,2	59,9	3,1	13,6	11,8	57,9	3,0	22,4	57,9	3,0
1320	36,33	12,0	13,2	64,8	3,3	12,1	13,2	64,8	3,4	12,3	13,1	64,3	3,4	22,0	64,3	3,4
1440	37,95	12,0	13,2	64,8	3,3	12,1	13,2	64,8	3,4	12,3	13,1	64,3	3,4	22,0	64,3	3,4
1800	42,43	11,7	13,5	66,3	3,4	11,7	13,6	66,8	3,5	12,0	13,4	65,8	3,5	21,9	65,8	3,5
2880	53,67	10,9	14,3	70,2	3,6	10,9	14,4	70,7	3,7	11,2	14,2	69,7	3,7	21,7	69,7	3,7
4320	65,73	10,0	15,2	74,6	3,8	10,0	15,3	75,1	3,9	10,3	15,1	74,1	3,9	21,5	74,1	3,9



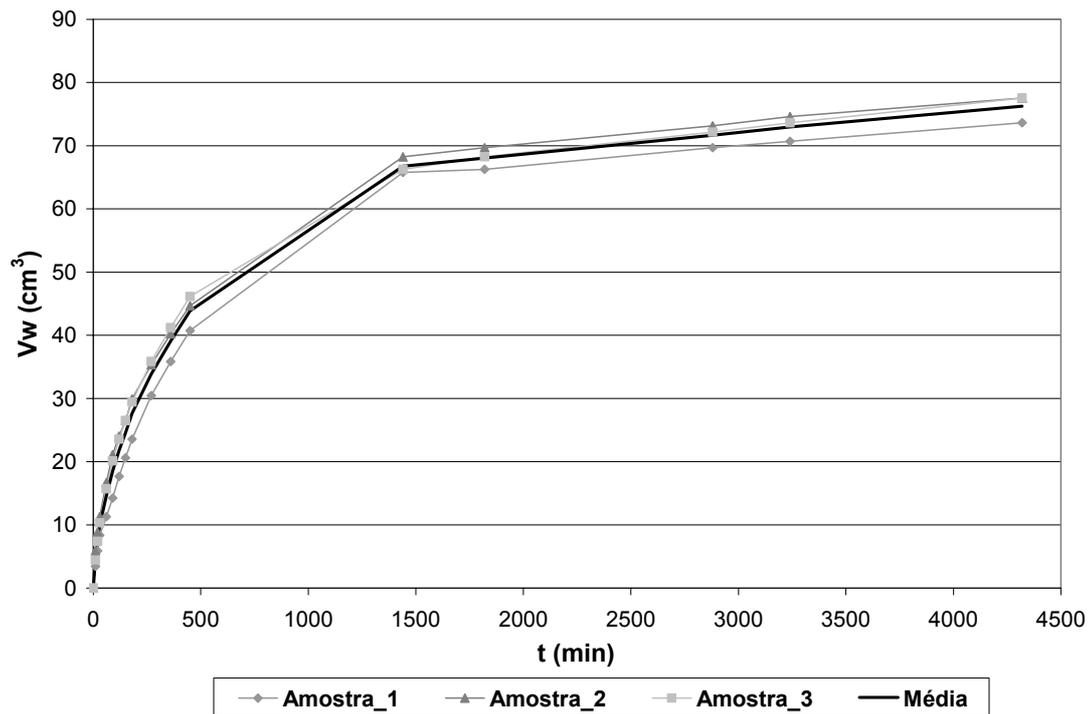
Argamassa 0 % CZP: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo



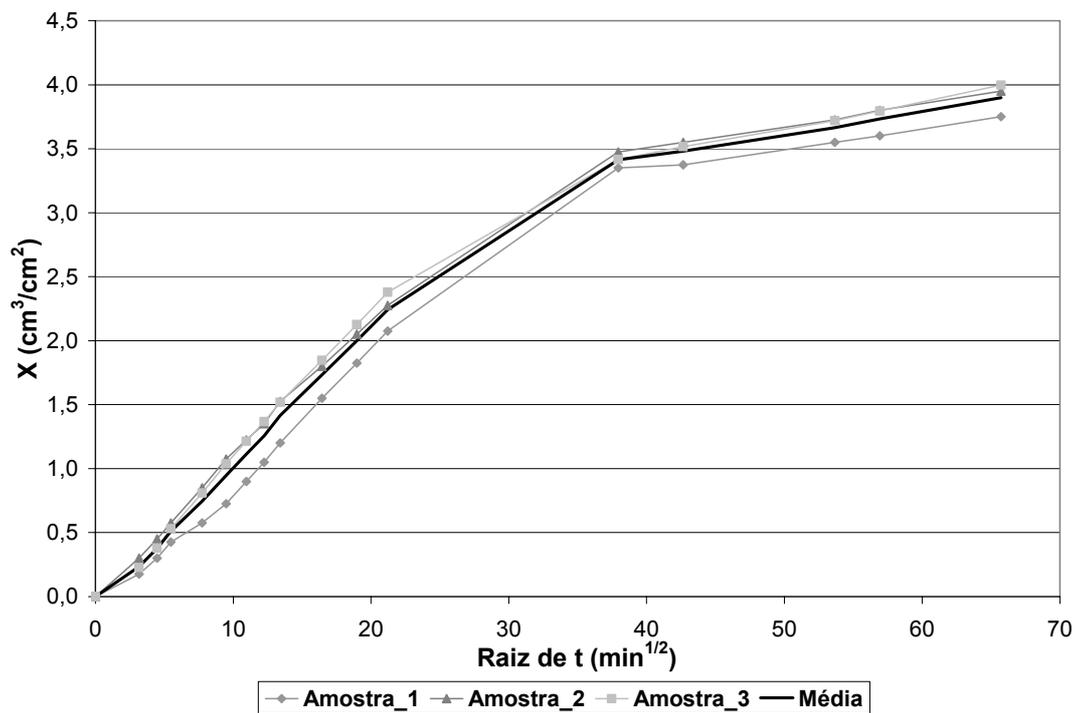
Argamassa 0% CZP: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo

Dados do ensaio: 50% CZP			
Amostra	1	2	3
A tubo (cm <sup>2</sup> )	4,91	4,91	4,91
A amostra (cm <sup>2</sup> )	19,63	19,63	19,40
V amostra (cm <sup>3</sup> )	195,63	195,96	193,06
$\rho$ da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	1,43	1,46	1,46
m amostra seca (g)	280,5	285,7	282,8
m amostra após 72 horas (g)	344,3	350,4	347
m H <sub>2</sub> O (g)	63,8	64,7	64,2
$\Delta$ Vw total do tubo (g)	73,6	77,6	77,6
m H <sub>2</sub> O que evaporou (g)	9,8	12,9	13,4
t em que a mancha capilar atinge o topo do cp (min)	450 <t< 1440	450 <t< 1440	450 <t< 1440

50% CZP		Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3				Média		
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)
0	0,00	25,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	0,0	0,0	25,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	24,8	0,7	3,4	0,2	24,2	1,2	5,9	0,3	24,2	0,9	4,4	0,2	0,9	4,6	0,2
20	4,47	24,3	1,2	5,9	0,3	23,6	1,8	8,8	0,4	23,6	1,5	7,4	0,4	1,5	7,4	0,4
30	5,48	23,8	1,7	8,3	0,4	23,1	2,3	11,3	0,6	23,0	2,1	10,3	0,5	2,0	10,0	0,5
60	7,75	23,2	2,3	11,3	0,6	22,0	3,4	16,7	0,9	21,9	3,2	15,7	0,8	3,0	14,6	0,7
90	9,49	22,6	2,9	14,2	0,7	21,1	4,3	21,1	1,1	21,0	4,1	20,1	1,0	3,8	18,5	0,9
120	10,95	21,9	3,6	17,7	0,9	20,5	4,9	24,1	1,2	20,3	4,8	23,6	1,2	4,4	21,8	1,1
150	12,25	21,3	4,2	20,6	1,1	20,0	5,4	26,5	1,4	19,7	5,4	26,5	1,4	5,0	24,5	1,3
180	13,42	20,7	4,8	23,6	1,2	19,3	6,1	29,9	1,5	19,1	6,0	29,5	1,5	5,6	27,7	1,4
270	16,43	19,3	6,2	30,4	1,6	18,2	7,2	35,3	1,8	17,8	7,3	35,8	1,8	6,9	33,9	1,7
360	18,97	18,2	7,3	35,8	1,8	17,2	8,2	40,3	2,1	16,7	8,4	41,2	2,1	8,0	39,1	2,0
450	21,21	17,2	8,3	40,7	2,1	16,3	9,1	44,7	2,3	15,7	9,4	46,1	2,4	8,9	43,9	2,2
1440	37,95	12,1	13,4	65,8	3,4	11,5	13,9	68,2	3,5	11,6	13,5	66,3	3,4	13,6	66,8	3,4
1820	42,66	12,0	13,5	66,3	3,4	11,2	14,2	69,7	3,6	11,2	13,9	68,2	3,5	13,9	68,1	3,5
2880	53,67	11,3	14,2	69,7	3,6	10,5	14,9	73,1	3,7	10,4	14,7	72,2	3,7	14,6	71,7	3,7
3240	56,92	11,1	14,4	70,7	3,6	10,2	15,2	74,6	3,8	10,1	15,0	73,6	3,8	14,9	73,0	3,7
4320	65,73	10,5	15,0	73,6	3,8	9,6	15,8	77,6	4,0	9,3	15,8	77,6	4,0	15,5	76,2	3,9



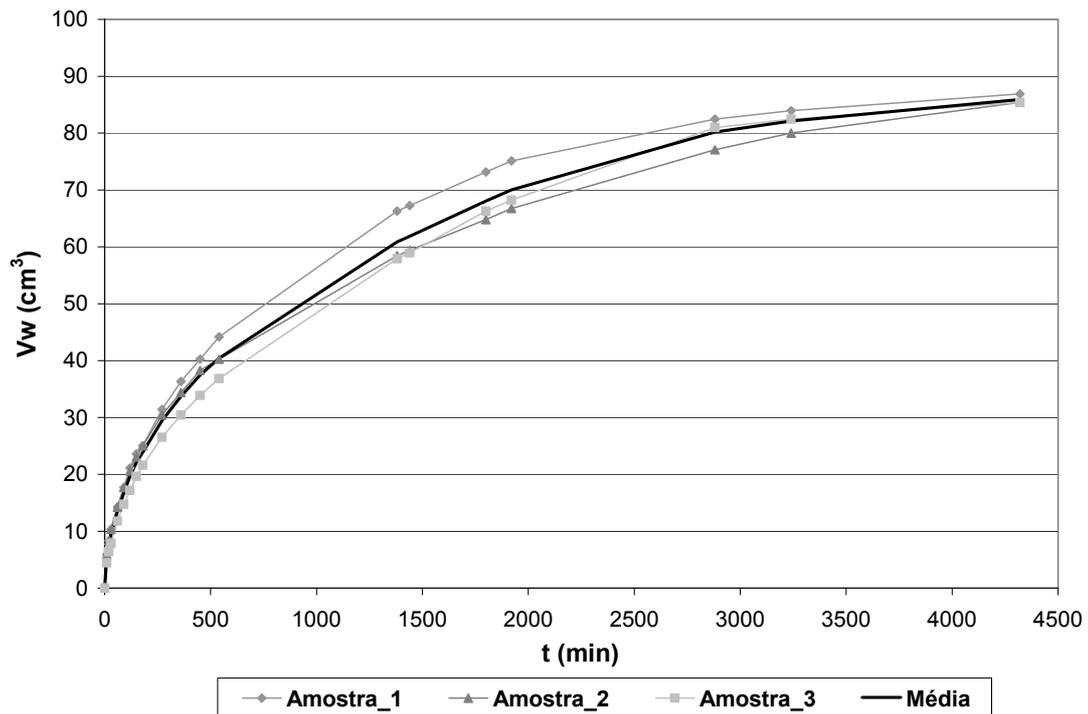
Argamassa 50 % CZP: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo



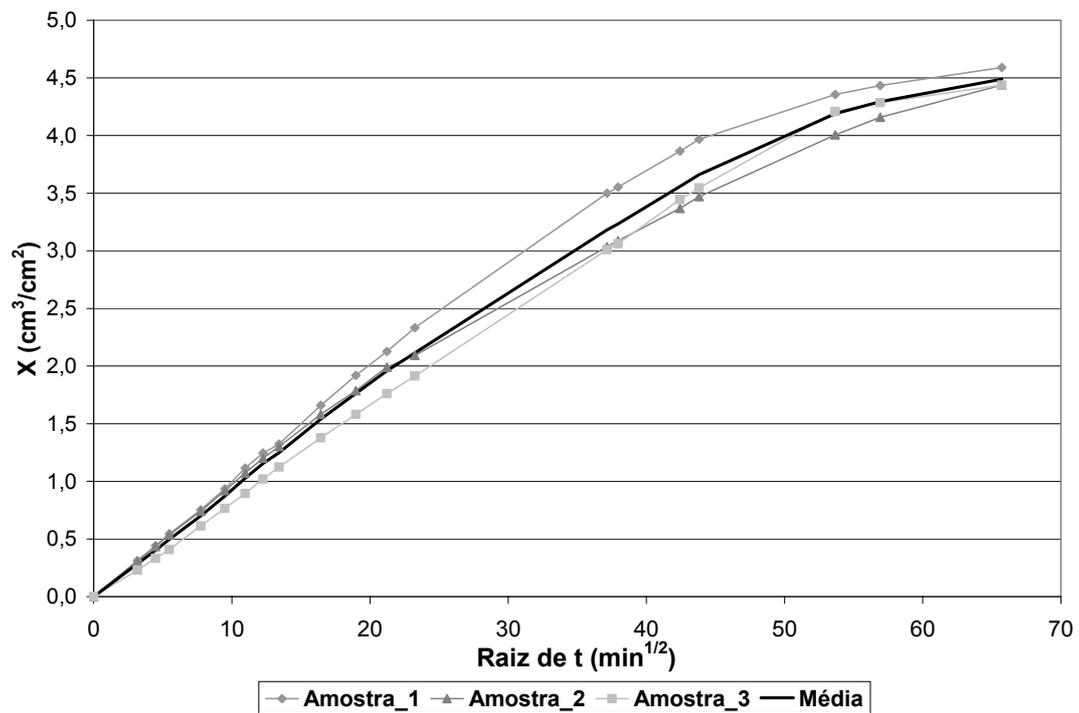
Argamassa 50% CZP: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo

Dados do ensaio: 100% CZP			
Amostra	1	2	3
A tubo (cm <sup>2</sup> )	4,91	4,91	4,91
A amostra (cm <sup>2</sup> )	18,93	19,24	19,24
V amostra (cm <sup>3</sup> )	190,13	192,80	192,76
$\rho$ da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	1,25	1,23	1,23
m amostra seca (g)	237,1	238,1	237,7
m amostra após 72 horas (g)	308,7	309,9	310
m H <sub>2</sub> O (g)	71,6	71,8	72,3
$\Delta$ Vw total do tubo (g)	86,9	85,4	85,4
m H <sub>2</sub> O que evaporou (g)	15,3	13,6	13,1
t em que a mancha capilar atinge o topo do cp (min)	1800<t<2040	1800<t<2040	1800<t<2040

100% CZP		Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3				Média		
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)
0	0,00	26,1	0,0	0,0	0,0	26,3	0,0	0,0	0,0	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	24,9	1,2	5,9	0,3	25,1	1,2	5,9	0,3	25,3	0,9	4,4	0,2	1,1	5,4	0,3
20	4,47	24,4	1,7	8,3	0,4	24,6	1,7	8,3	0,4	24,9	1,3	6,4	0,3	1,6	7,7	0,4
30	5,48	24,0	2,1	10,3	0,5	24,2	2,1	10,3	0,5	24,6	1,6	7,9	0,4	1,9	9,5	0,5
60	7,75	23,2	2,9	14,2	0,8	23,4	2,9	14,2	0,7	23,8	2,4	11,8	0,6	2,7	13,4	0,7
90	9,49	22,5	3,6	17,7	0,9	22,7	3,6	17,7	0,9	23,2	3,0	14,7	0,8	3,4	16,7	0,9
120	10,95	21,8	4,3	21,1	1,1	22,1	4,2	20,6	1,1	22,7	3,5	17,2	0,9	4,0	19,6	1,0
150	12,25	21,3	4,8	23,6	1,2	21,6	4,7	23,1	1,2	22,2	4,0	19,6	1,0	4,5	22,1	1,2
180	13,42	21,0	5,1	25,0	1,3	21,2	5,1	25,0	1,3	21,8	4,4	21,6	1,1	4,9	23,9	1,2
270	16,43	19,7	6,4	31,4	1,7	20,1	6,2	30,4	1,6	20,8	5,4	26,5	1,4	6,0	29,5	1,5
360	18,97	18,7	7,4	36,3	1,9	19,3	7,0	34,4	1,8	20,0	6,2	30,4	1,6	6,9	33,7	1,8
450	21,21	17,9	8,2	40,3	2,1	18,5	7,8	38,3	2,0	19,3	6,9	33,9	1,8	7,6	37,5	2,0
540	23,24	17,1	9,0	44,2	2,3	18,1	8,2	40,3	2,1	18,7	7,5	36,8	1,9	8,2	40,4	2,1
1380	37,15	12,6	13,5	66,3	3,5	14,4	11,9	58,4	3,0	14,4	11,8	57,9	3,0	12,4	60,9	3,2
1440	37,95	12,4	13,7	67,2	3,6	14,2	12,1	59,4	3,1	14,2	12,0	58,9	3,1	12,6	61,9	3,2
1800	42,43	11,2	14,9	73,1	3,9	13,1	13,2	64,8	3,4	12,7	13,5	66,3	3,4	13,9	68,1	3,6
1920	43,82	10,8	15,3	75,1	4,0	12,7	13,6	66,8	3,5	12,3	13,9	68,2	3,5	14,3	70,0	3,7
2880	53,67	9,3	16,8	82,5	4,4	10,6	15,7	77,1	4,0	9,7	16,5	81,0	4,2	16,3	80,2	4,2
3240	56,92	9,0	17,1	83,9	4,4	10,0	16,3	80,0	4,2	9,4	16,8	82,5	4,3	16,7	82,1	4,3
4320	65,73	8,4	17,7	86,9	4,6	8,9	17,4	85,4	4,4	8,8	17,4	85,4	4,4	17,5	85,9	4,5



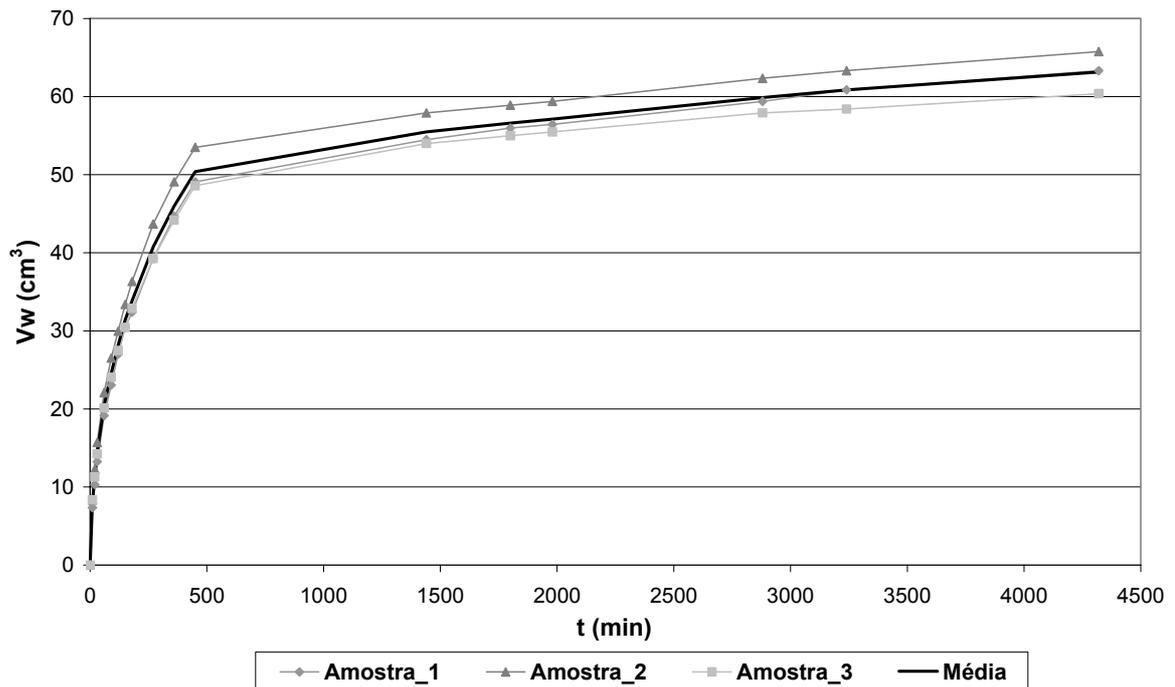
Argamassa 100 % CZP: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo



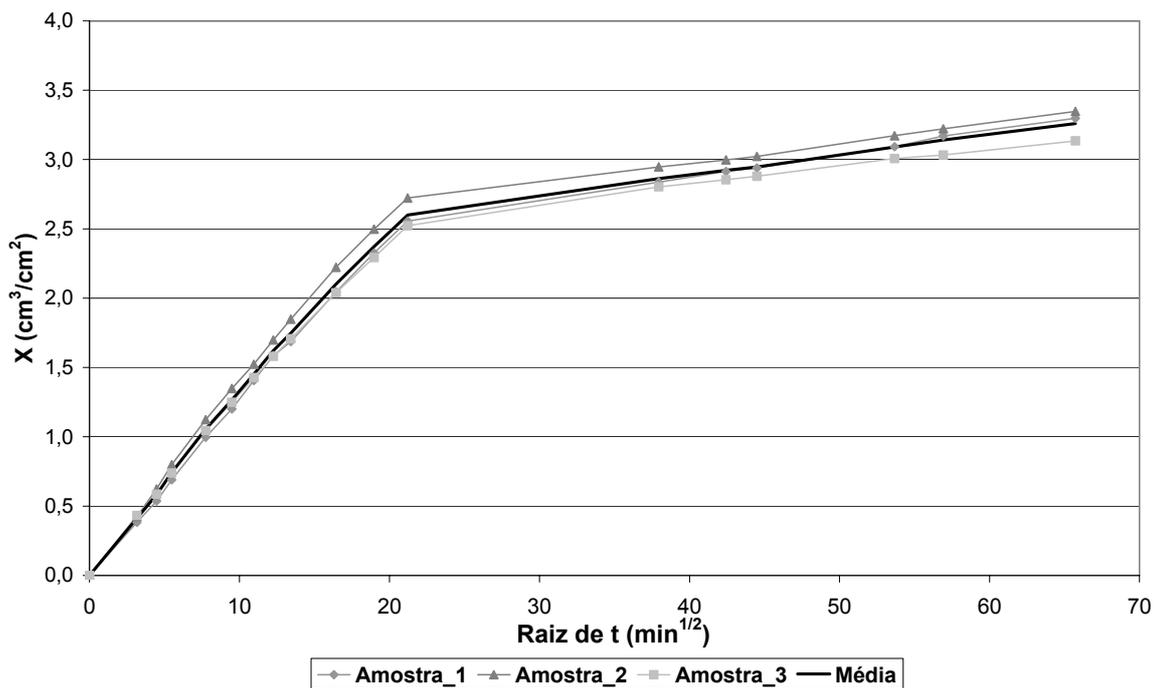
Argamassa 100% CZP: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo

Dados do ensaio: 0% CZP+IA			
Amostra	1	2	3
A tubo (cm <sup>2</sup> )	4,91	4,91	4,91
A amostra (cm <sup>2</sup> )	19,21	19,65	19,26
V amostra (cm <sup>3</sup> )	190,45	194,84	191,48
$\rho$ da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	1,40	1,47	1,38
m amostra seca (g)	266,8	286,6	264,8
m amostra após 72 horas (g)	315,3	337,9	313,4
m H <sub>2</sub> O (g)	48,5	51,3	48,6
$\Delta Vw$ total do tubo (g)	63,3	65,8	60,4
m H <sub>2</sub> O que evaporou (g)	14,8	14,5	11,8
t em que a mancha capilar atinge o topo do cp (min)	450	450	450

0% CZP+IA		Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3				Média		
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)
0	0,00	25,5	0,0	0,0	0,0	25,6	0,0	0,0	0,0	25,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	24,0	1,5	7,4	0,4	23,9	1,7	8,3	0,4	24,0	1,7	8,3	0,4	1,6	8,0	0,4
20	4,47	23,4	2,1	10,3	0,5	23,1	2,5	12,3	0,6	23,4	2,3	11,3	0,6	2,3	11,3	0,6
30	5,48	22,8	2,7	13,3	0,7	22,4	3,2	15,7	0,8	22,8	2,9	14,2	0,7	2,9	14,4	0,7
60	7,75	21,6	3,9	19,1	1,0	21,1	4,5	22,1	1,1	21,6	4,1	20,1	1,0	4,2	20,5	1,1
90	9,49	20,8	4,7	23,1	1,2	20,2	5,4	26,5	1,3	20,8	4,9	24,1	1,2	5,0	24,5	1,3
120	10,95	20,0	5,5	27,0	1,4	19,5	6,1	29,9	1,5	20,1	5,6	27,5	1,4	5,7	28,1	1,5
150	12,25	19,3	6,2	30,4	1,6	18,8	6,8	33,4	1,7	19,5	6,2	30,4	1,6	6,4	31,4	1,6
180	13,42	18,9	6,6	32,4	1,7	18,2	7,4	36,3	1,8	19,0	6,7	32,9	1,7	6,9	33,9	1,7
270	16,43	17,5	8,0	39,3	2,0	16,7	8,9	43,7	2,2	17,7	8,0	39,3	2,0	8,3	40,7	2,1
360	18,97	16,4	9,1	44,7	2,3	15,6	10,0	49,1	2,5	16,7	9,0	44,2	2,3	9,4	46,0	2,4
450	21,21	15,5	10,0	49,1	2,6	14,7	10,9	53,5	2,7	15,8	9,9	48,6	2,5	10,3	50,4	2,6
1440	37,95	14,4	11,1	54,5	2,8	13,8	11,8	57,9	2,9	14,7	11,0	54,0	2,8	11,3	55,5	2,9
1800	42,43	14,1	11,4	56,0	2,9	13,6	12,0	58,9	3,0	14,5	11,2	55,0	2,9	11,5	56,6	2,9
1980	44,50	14,0	11,5	56,5	2,9	13,5	12,1	59,4	3,0	14,4	11,3	55,5	2,9	11,6	57,1	2,9
2880	53,67	13,4	12,1	59,4	3,1	12,9	12,7	62,3	3,2	13,9	11,8	57,9	3,0	12,2	59,9	3,1
3240	56,92	13,1	12,4	60,9	3,2	12,7	12,9	63,3	3,2	13,8	11,9	58,4	3,0	12,4	60,9	3,1
4320	65,73	12,6	12,9	63,3	3,3	12,2	13,4	65,8	3,3	13,4	12,3	60,4	3,1	12,9	63,2	3,3



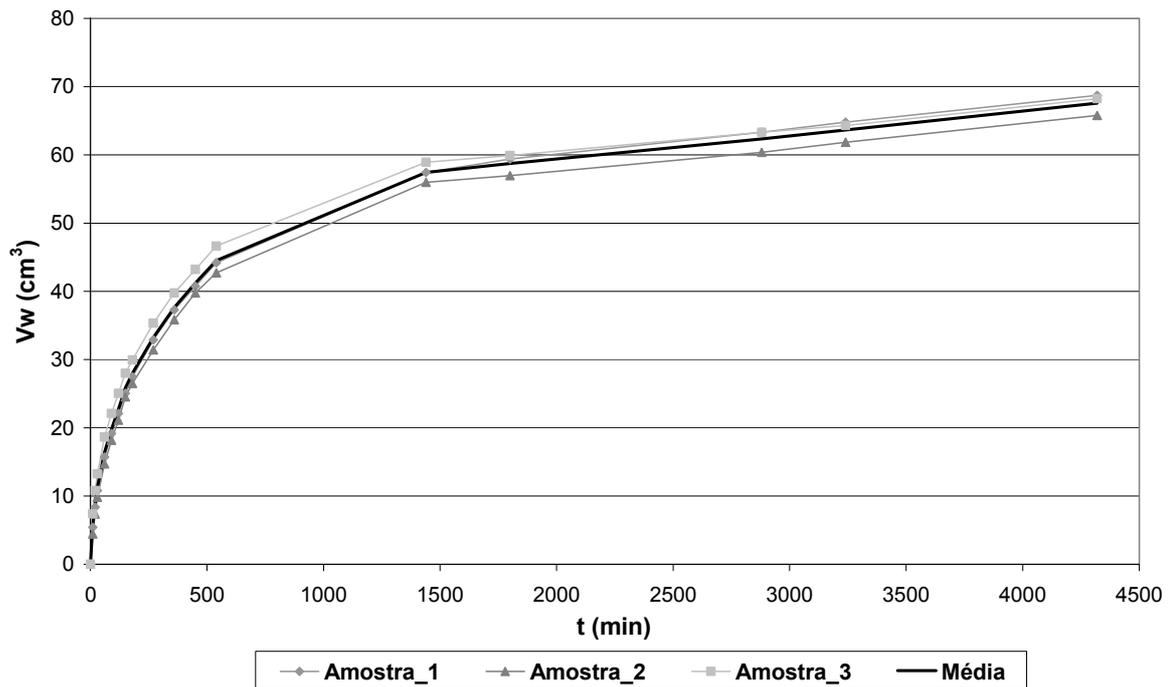
Argamassa 0% CZP+IA: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo



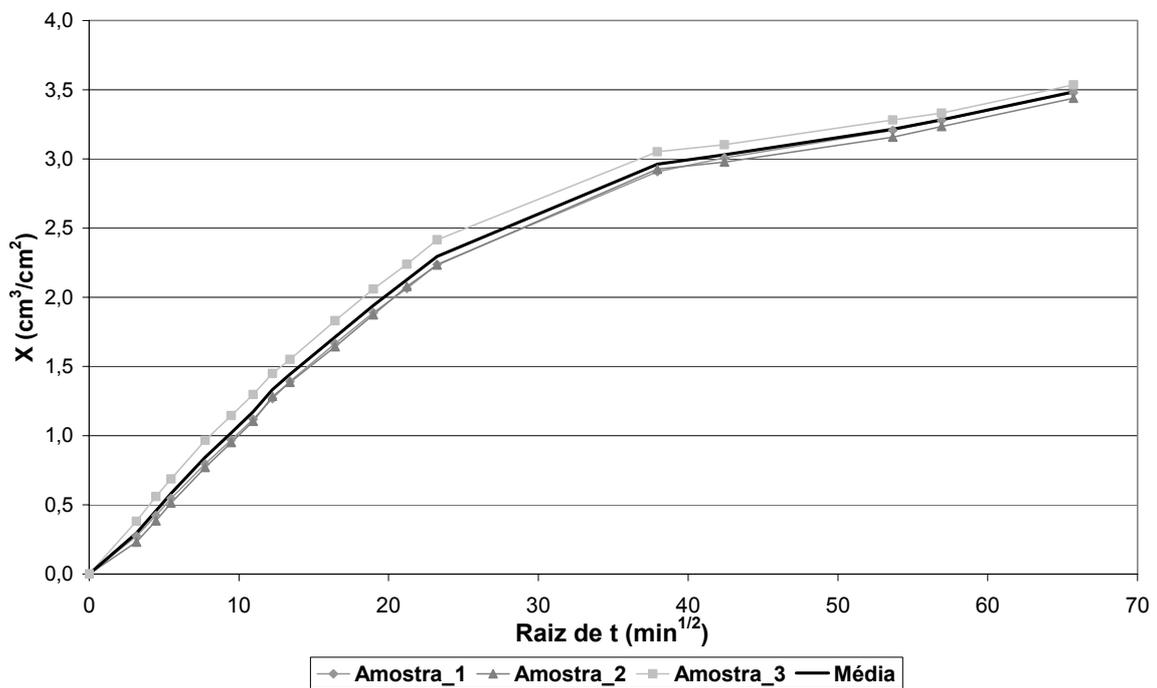
Argamassa 0% CZP+IA: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo

Dados do ensaio: 50% CZP+IA			
Amostra	1	2	3
A tubo (cm <sup>2</sup> )	4,91	4,91	4,91
A amostra (cm <sup>2</sup> )	19,75	19,13	19,30
V amostra (cm <sup>3</sup> )	196,02	190,83	190,10
$\rho$ da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	1,19	1,21	1,24
m amostra seca (g)	234,1	231,8	236,1
m amostra após 72 horas (g)	287,3	284,4	290,1
m H <sub>2</sub> O (g)	53,2	52,6	54
$\Delta$ Vw total do tubo (g)	68,7	65,8	68,2
m H <sub>2</sub> O que evaporou (g)	15,5	13,2	14,2
t em que a mancha capilar atinge o topo do cp (min)	540 <t< 1440	540 <t< 1440	540 <t< 1440

50% CZP		Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3				Média		
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)
0	0,00	25,5	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0	0,0	0,0	25,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	24,8	0,7	3,4	0,2	24,2	1,2	5,9	0,3	24,2	0,9	4,4	0,2	0,9	4,6	0,2
20	4,47	24,3	1,2	5,9	0,3	23,6	1,8	8,8	0,4	23,6	1,5	7,4	0,4	1,5	7,4	0,4
30	5,48	23,8	1,7	8,3	0,4	23,1	2,3	11,3	0,6	23,0	2,1	10,3	0,5	2,0	10,0	0,5
60	7,75	23,2	2,3	11,3	0,6	22,0	3,4	16,7	0,9	21,9	3,2	15,7	0,8	3,0	14,6	0,8
90	9,49	22,6	2,9	14,2	0,7	21,1	4,3	21,1	1,1	21,0	4,1	20,1	1,0	3,8	18,5	1,0
120	10,95	21,9	3,6	17,7	0,9	20,5	4,9	24,1	1,2	20,3	4,8	23,6	1,2	4,4	21,8	1,2
150	12,25	21,3	4,2	20,6	1,1	20,0	5,4	26,5	1,4	19,7	5,4	26,5	1,4	5,0	24,5	1,4
180	13,42	20,7	4,8	23,6	1,2	19,3	6,1	29,9	1,5	19,1	6,0	29,5	1,5	5,6	27,7	1,5
270	16,43	19,3	6,2	30,4	1,6	18,2	7,2	35,3	1,8	17,8	7,3	35,8	1,8	6,9	33,9	1,8
360	18,97	18,2	7,3	35,8	1,8	17,2	8,2	40,3	2,1	16,7	8,4	41,2	2,1	8,0	39,1	2,1
450	21,21	17,2	8,3	40,7	2,1	16,3	9,1	44,7	2,3	15,7	9,4	46,1	2,4	8,9	43,9	2,4
1440	37,95	12,1	13,4	65,8	3,4	11,5	13,9	68,2	3,5	11,6	13,5	66,3	3,4	13,6	66,8	3,4
1820	42,66	12,0	13,5	66,3	3,4	11,2	14,2	69,7	3,6	11,2	13,9	68,2	3,5	13,9	68,1	3,5
2880	53,67	11,3	14,2	69,7	3,6	10,5	14,9	73,1	3,7	10,4	14,7	72,2	3,7	14,6	71,7	3,7
3240	56,92	11,1	14,4	70,7	3,6	10,2	15,2	74,6	3,8	10,1	15,0	73,6	3,8	14,9	73,0	3,8
4320	65,73	10,5	15,0	73,6	3,8	9,6	15,8	77,6	4,0	9,3	15,8	77,6	4,0	15,5	76,2	4,0



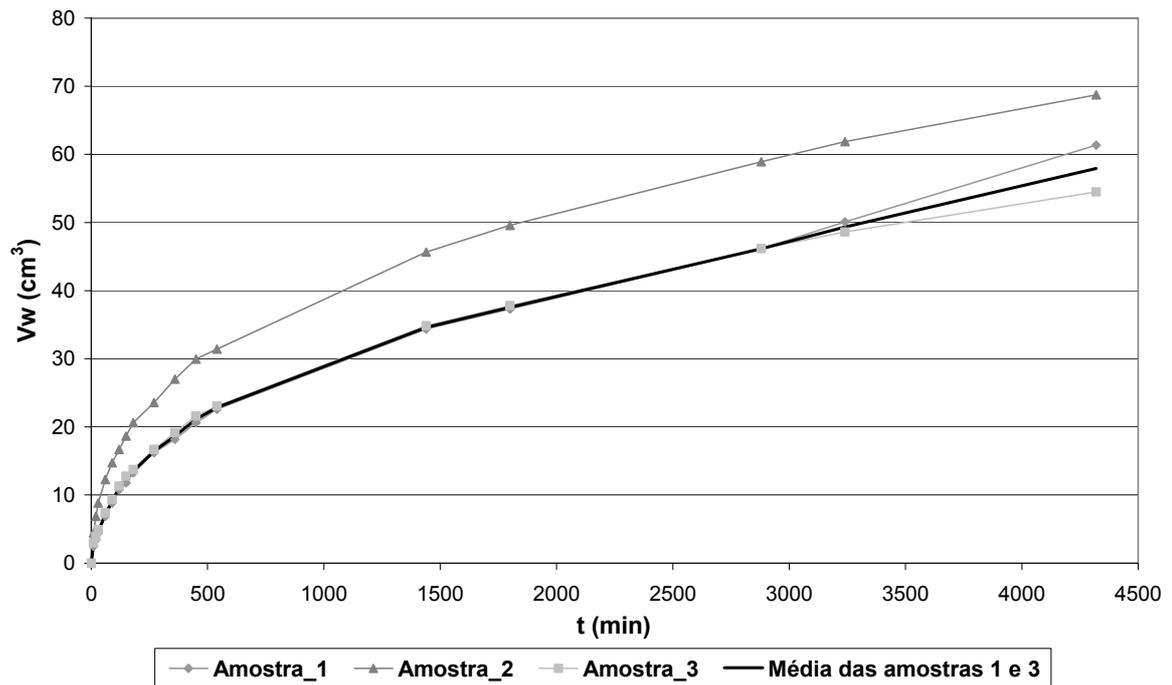
Argamassa 50 % CZP+IA: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo



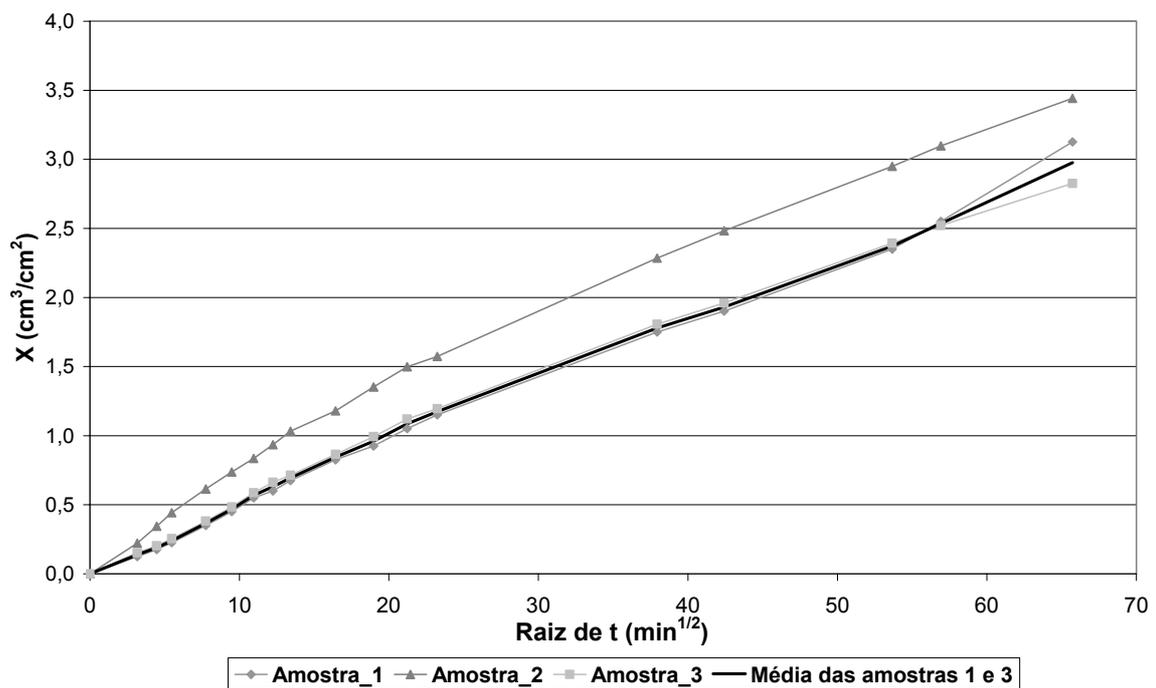
Argamassa 50% CZP+IA: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo

Dados do ensaio: 100% CZP+IA			
Amostra	1	2	3
A tubo (cm <sup>2</sup> )	4,91	4,91	4,91
A amostra (cm <sup>2</sup> )	19,63	19,97	19,28
V amostra (cm <sup>3</sup> )	197,33	197,80	193,09
$\rho$ da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	1,06	1,06	1,07
m amostra seca (g)	209,4	208,8	207
m amostra após 72 horas (g)	265,1	268,7	256,4
m H <sub>2</sub> O (g)	55,7	59,9	49,4
$\Delta$ Vw total do tubo (g)	61,4	68,7	54,5
m H <sub>2</sub> O que evaporou (g)	5,7	8,8	5,1
t em que a mancha capilar atinge o topo do cp (min)	não atingiu	3240 <t< 4320	não atingiu

100% CZP+IA		Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3				Média das amostras 1 e 3		
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	leitura (cm)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)	h (cm)	Vw (cm <sup>3</sup> )	X (Vw/A)
0	0,00	26,7	0,0	0,0	0,0	26,4	0,0	0,0	0,0	26,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	26,2	0,5	2,5	0,1	25,5	0,9	4,4	0,2	26,0	0,6	2,9	0,2	0,6	2,7	0,1
20	4,47	26,0	0,7	3,4	0,2	25,0	1,4	6,9	0,3	25,8	0,8	3,9	0,2	0,8	3,7	0,2
30	5,48	25,8	0,9	4,4	0,2	24,6	1,8	8,8	0,4	25,6	1,0	4,9	0,3	0,9	4,7	0,2
60	7,75	25,3	1,4	6,9	0,4	23,9	2,5	12,3	0,6	25,1	1,5	7,4	0,4	1,5	7,1	0,4
90	9,49	24,9	1,8	8,8	0,5	23,4	3,0	14,7	0,7	24,7	1,9	9,3	0,5	1,9	9,1	0,5
120	10,95	24,5	2,2	10,8	0,6	23,0	3,4	16,7	0,8	24,3	2,3	11,3	0,6	2,3	11,0	0,6
150	12,25	24,3	2,4	11,8	0,6	22,6	3,8	18,7	0,9	24,0	2,6	12,8	0,7	2,5	12,3	0,6
180	13,42	24,0	2,7	13,3	0,7	22,2	4,2	20,6	1,0	23,8	2,8	13,7	0,7	2,8	13,5	0,7
270	16,43	23,4	3,3	16,2	0,8	21,6	4,8	23,6	1,2	23,2	3,4	16,7	0,9	3,4	16,4	0,8
360	18,97	23,0	3,7	18,2	0,9	20,9	5,5	27,0	1,4	22,7	3,9	19,1	1,0	3,8	18,7	1,0
450	21,21	22,5	4,2	20,6	1,1	20,3	6,1	29,9	1,5	22,2	4,4	21,6	1,1	4,3	21,1	1,1
540	23,24	22,1	4,6	22,6	1,2	20,0	6,4	31,4	1,6	21,9	4,7	23,1	1,2	4,7	22,8	1,2
1440	37,95	19,7	7,0	34,4	1,8	17,1	9,3	45,7	2,3	19,5	7,1	34,9	1,8	7,1	34,6	1,8
1800	42,43	19,1	7,6	37,3	1,9	16,3	10,1	49,6	2,5	18,9	7,7	37,8	2,0	7,7	37,6	1,9
2880	53,67	17,3	9,4	46,1	2,4	14,4	12,0	58,9	2,9	17,2	9,4	46,1	2,4	9,4	46,1	2,4
3240	56,92	16,5	10,2	50,1	2,6	13,8	12,6	61,9	3,1	16,7	9,9	48,6	2,5	10,1	49,3	2,5
4320	65,73	14,2	12,5	61,4	3,1	12,4	14,0	68,7	3,4	15,5	11,1	54,5	2,8	11,8	57,9	3,0



Argamassa 100 % CZP+IA: Volume de água absorvido por capilaridade em função do tempo

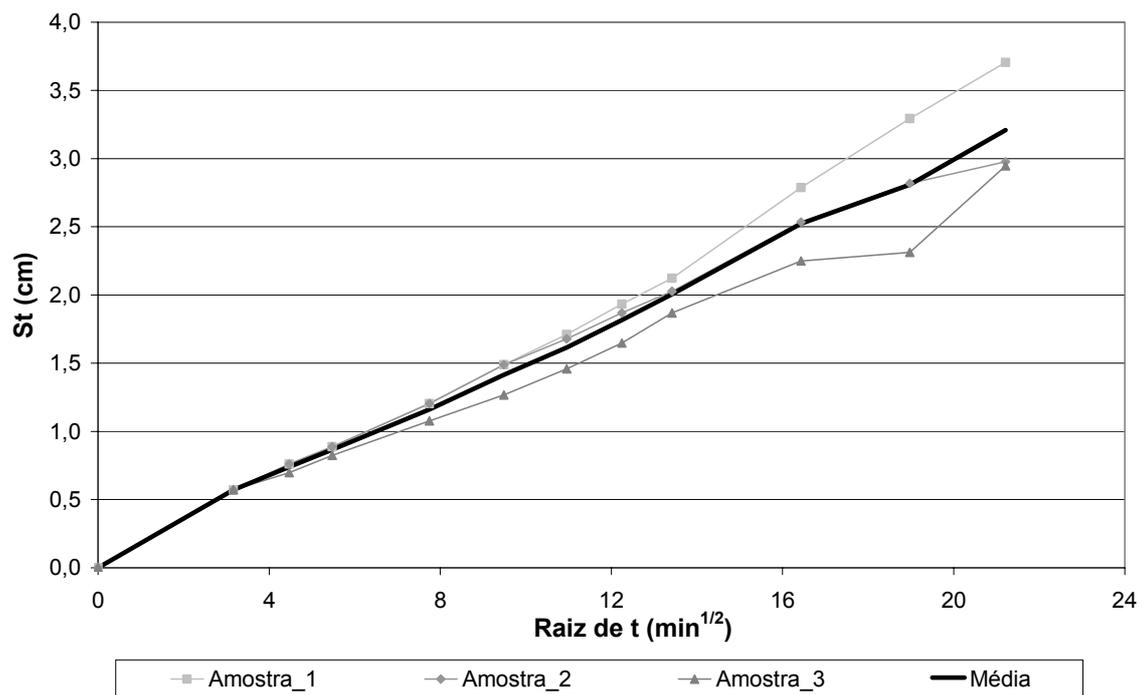


Argamassa 100% CZP+IA: Volume de líquido absorvido por área da seção transversal em função da raiz do tempo

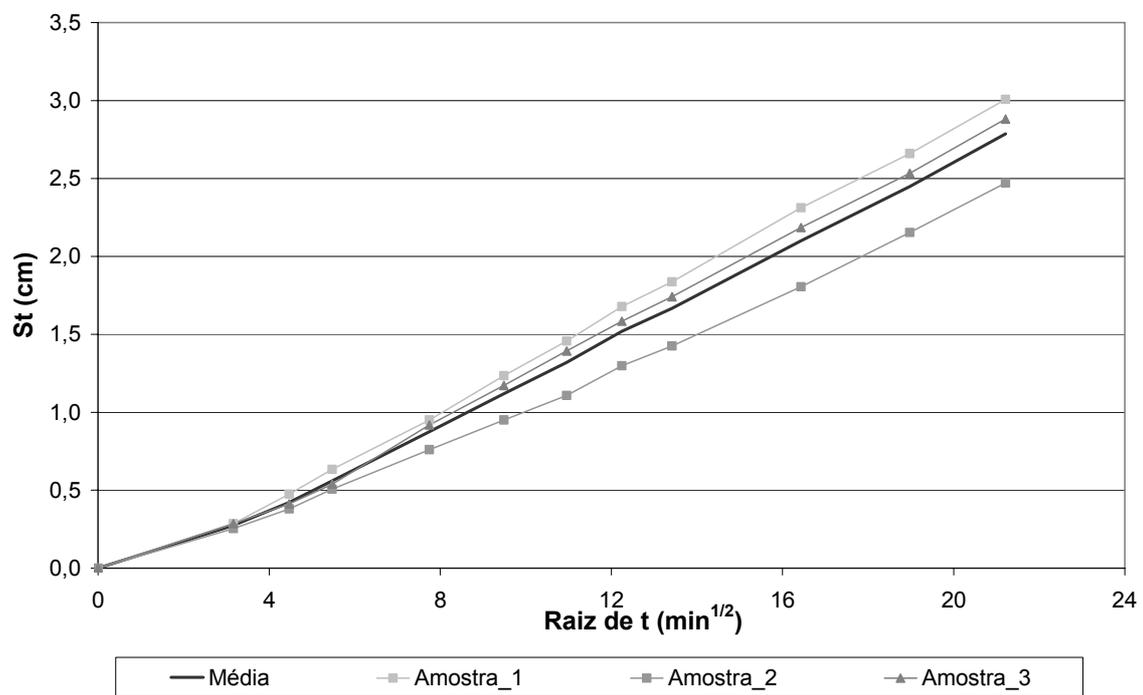
## ANEXO 4: Dados do ensaio de ângulo de molhamento aparente

t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	0% CZP						50% CZP						100% CZP						
		h <sub>1</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>3</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>1</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>3</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>1</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>3</sub> (cm)	St (cm)	
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	1,8	0,6	1,8	0,6	1,8	0,6	0,9	0,3	0,8	0,3	0,9	0,3	0,2	0,1	1,0	0,3	0,8	0,3	
20	4,47	2,4	0,8	2,4	0,8	2,2	0,7	1,5	0,5	1,2	0,4	1,3	0,4	0,7	0,2	1,4	0,4	1,2	0,4	
30	5,48	2,8	0,9	2,8	0,9	2,6	0,8	2,0	0,6	1,6	0,5	1,7	0,5	1,1	0,3	1,8	0,6	1,6	0,5	
60	7,75	3,8	1,2	3,8	1,2	3,4	1,1	3,0	1,0	2,4	0,8	2,9	0,9	2,1	0,7	2,7	0,9	2,5	0,8	
90	9,49	4,7	1,5	4,7	1,5	4,0	1,3	3,9	1,2	3,0	1,0	3,7	1,2	2,7	0,9	3,3	1,0	3,1	1,0	
120	10,95	5,4	1,7	5,3	1,7	4,6	1,5	4,6	1,5	3,5	1,1	4,4	1,4	3,3	1,0	3,9	1,2	3,7	1,2	
150	12,25	6,1	1,9	5,9	1,9	5,2	1,6	5,3	1,7	4,1	1,3	5,0	1,6	3,8	1,2	4,4	1,4	4,3	1,4	
180	13,42	6,7	2,1	6,4	2,0	5,9	1,9	5,8	1,8	4,5	1,4	5,5	1,7	4,2	1,3	4,8	1,5	4,7	1,5	
270	16,43	8,8	2,8	8,0	2,5	7,1	2,2	7,3	2,3	5,7	1,8	6,9	2,2	5,4	1,7	5,9	1,9	6,0	1,9	
360	18,97	10,4	3,3	8,9	2,8	7,3	2,3	8,4	2,7	6,8	2,2	8,0	2,5	6,4	2,0	6,8	2,2	7,0	2,2	
450	21,21	11,7	3,7	9,4	3,0	9,3	2,9	9,5	3,0	7,8	2,5	9,1	2,9	7,4	2,3	7,7	2,4	7,9	2,5	

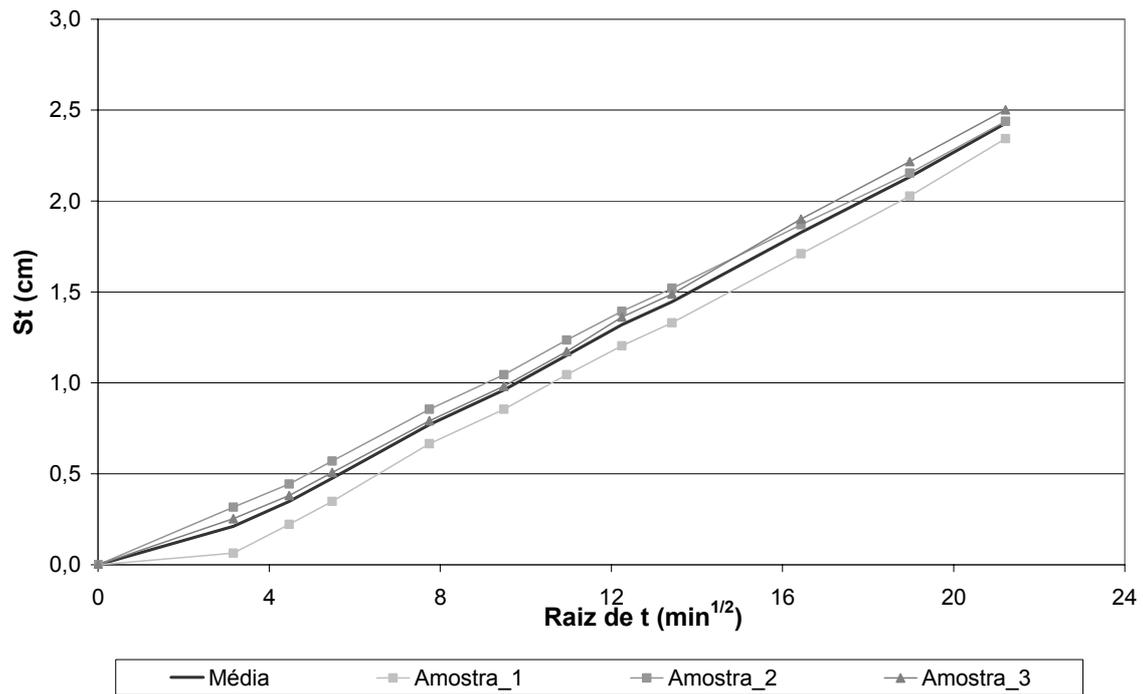
t (min)	raiz t (min <sup>1/2</sup> )	0% CZP+IA						50% CZP+IA						100% CZP+IA					
		h <sub>1</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>3</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>1</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>3</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>1</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	St (cm)	h <sub>3</sub> (cm)	St (cm)
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	3,16	1,5	0,5	1,5	0,5	1,1	0,3	1,4	0,4	0,5	0,2	1,0	0,3	0,7	0,2	0,5	0,2	0,7	0,2
20	4,47	2,1	0,7	2,1	0,7	1,7	0,5	1,9	0,6	0,9	0,3	1,4	0,4	1,0	0,3	0,7	0,2	0,9	0,3
30	5,48	2,6	0,8	2,6	0,8	2,2	0,7	2,3	0,7	1,1	0,3	1,7	0,5	1,3	0,4	1,0	0,3	1,2	0,4
60	7,75	3,7	1,2	3,7	1,2	3,2	1,0	3,2	1,0	1,8	0,6	2,4	0,8	1,9	0,6	1,5	0,5	1,7	0,5
90	9,49	4,5	1,4	4,5	1,4	4,0	1,3	3,9	1,2	2,4	0,8	3,0	1,0	2,3	0,7	1,9	0,6	2,1	0,7
120	10,95	5,3	1,7	5,3	1,7	4,7	1,5	4,5	1,4	2,9	0,9	3,5	1,1	2,7	0,9	2,1	0,7	2,5	0,8
150	12,25	5,9	1,9	5,9	1,9	5,1	1,6	5,0	1,6	3,4	1,1	3,8	1,2	3,1	1,0	2,4	0,8	2,8	0,9
180	13,42	6,5	2,1	6,5	2,1	5,7	1,8	5,4	1,7	3,8	1,2	4,0	1,3	3,4	1,1	2,7	0,9	3,1	1,0
270	16,43	8,1	2,6	8,0	2,5	6,7	2,1	6,6	2,1	5,0	1,6	5,2	1,6	4,3	1,4	3,3	1,0	3,9	1,2
360	18,97	9,5	3,0	9,3	2,9	7,7	2,4	7,7	2,4	6,0	1,9	6,2	2,0	5,2	1,6	4,0	1,3	4,6	1,5
450	21,21	10,5	3,3	10,1	3,2	8,6	2,7	8,6	2,7	6,9	2,2	7,1	2,2	5,9	1,9	4,5	1,4	5,2	1,6



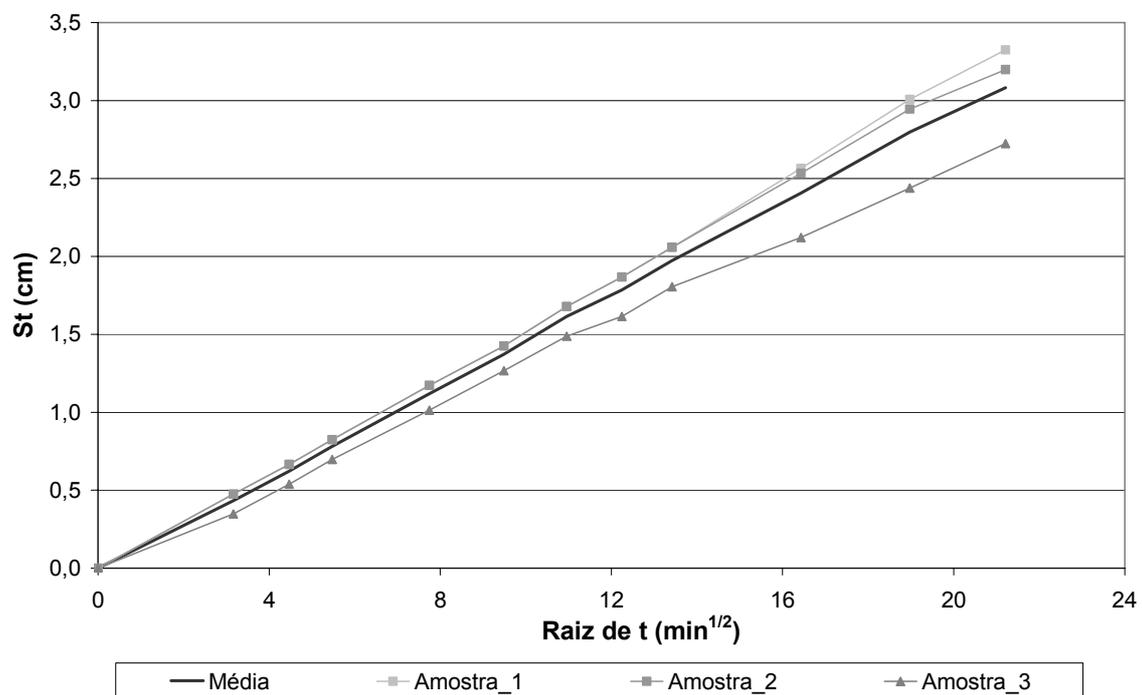
Argamassa 0% CZP: Estoque de álcool infiltrado em função da raiz do tempo



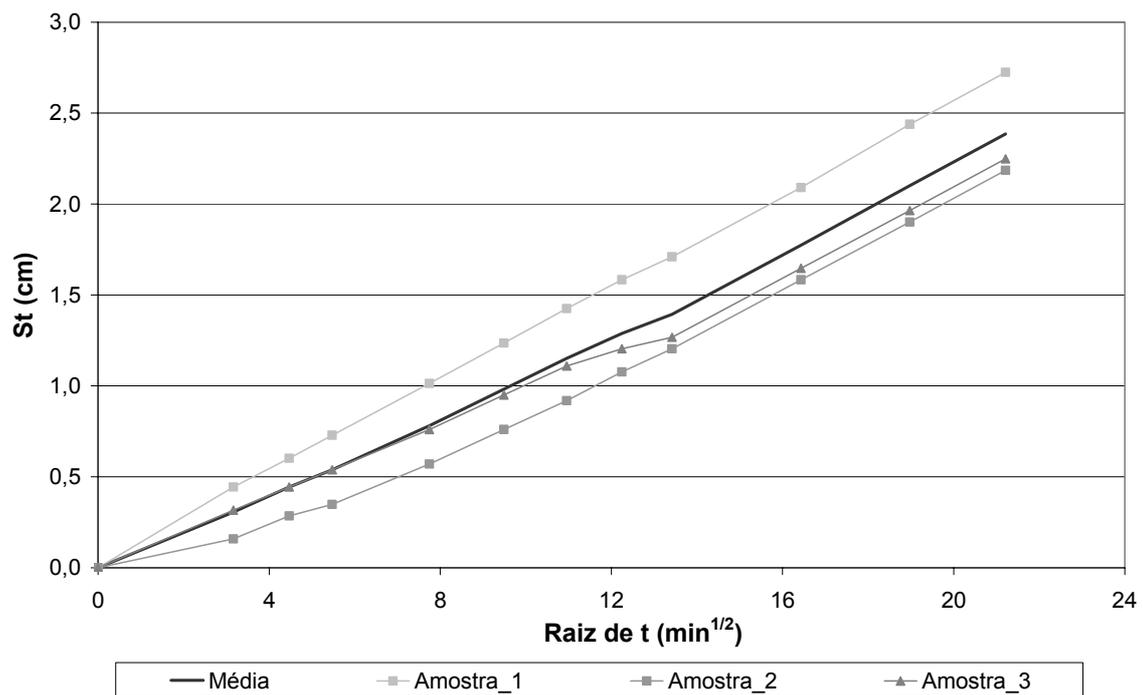
Argamassa 50% CZP: Estoque de álcool infiltrado em função da raiz do tempo



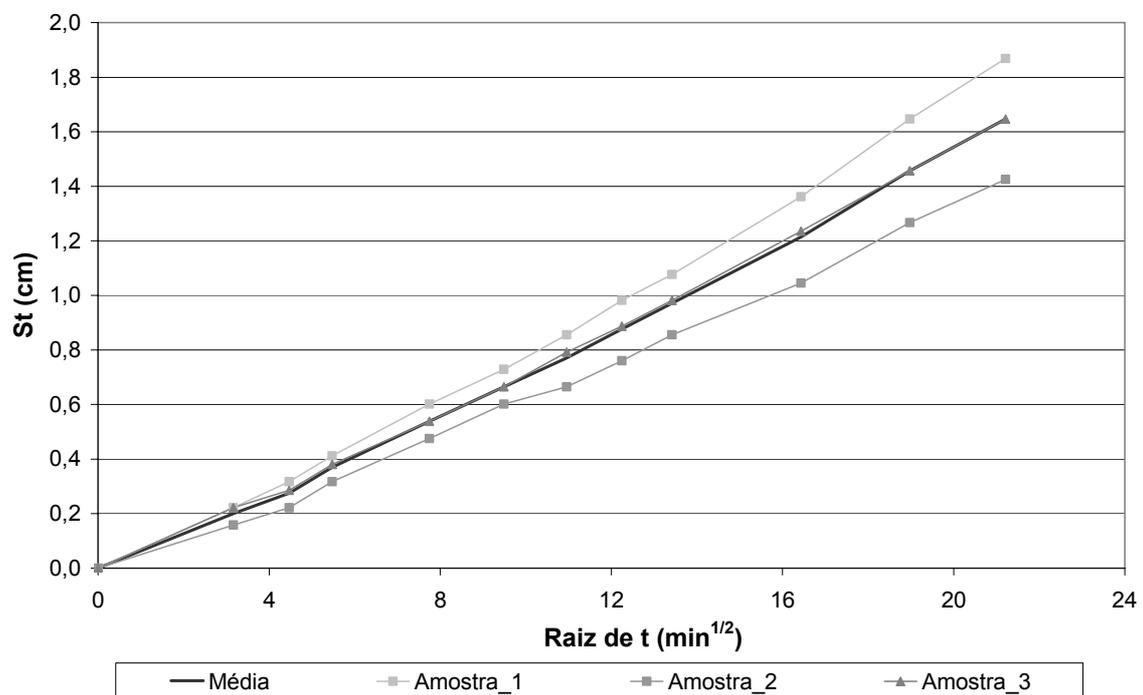
Argamassa 100% CZP: Estoque de álcool infiltrado em função da raiz do tempo



Argamassa 0% CZP+IA: Estoque de álcool infiltrado em função da raiz do tempo



Argamassa 50% CZP+IA: Estoque de álcool infiltrado em função da raiz do tempo



Argamassa 100% CZP+IA: Estoque de álcool infiltrado em função da raiz do tempo

### ANEXO 5: Dados do ensaio de secagem ao ar

Argamassa	Massa inicial (g)	Massa seca (g)	Massa (g)									
			24 hs	48 hs	72 hs	96 hs	120 hs	144 hs	168 hs	216 hs	312 hs	432 hs
0% CZP	184,257	157,268	176,562	169,204	163,980	162,271	161,556	161,176	160,867	160,432	160,028	160,028
	185,633	158,575	177,784	170,459	165,484	163,825	163,116	162,739	162,418	161,961	161,500	161,500
	181,721	154,254	173,698	166,098	161,014	159,338	158,629	158,260	157,955	157,540	157,153	157,153
50% CZP	169,628	138,841	162,766	155,504	149,685	147,406	146,384	145,771	145,233	144,321	143,243	143,079
	171,544	140,227	164,968	157,960	151,790	149,256	148,132	147,466	146,874	145,899	144,760	144,586
	164,263	133,867	156,098	148,426	143,273	141,313	140,448	139,946	139,490	138,721	137,887	137,874
100% CZP	149,752	115,533	142,353	135,182	129,160	126,647	125,497	124,768	124,116	122,963	121,470	120,970
	145,747	112,954	139,409	133,185	127,107	124,574	123,397	122,643	121,969	120,776	119,211	118,560
	149,931	115,495	141,934	134,188	128,523	126,237	125,164	124,496	123,879	122,763	121,341	120,912
0% CZP + IA	151,228	127,924	141,942	134,714	132,362	131,640	131,584	131,524	131,524	131,514	131,407	131,407
	153,345	129,747	143,817	136,484	134,188	133,489	133,382	133,375	133,375	133,357	133,247	133,247
	146,259	122,748	135,898	128,892	126,833	126,224	126,220	126,219	126,219	126,219	126,152	126,152
50% CZP + IA	144,383	117,091	135,541	128,009	124,608	123,290	122,725	122,492	122,226	121,826	121,366	121,366
	140,640	114,232	131,968	124,467	121,308	120,065	119,553	119,339	119,095	118,727	118,300	118,300
	139,283	112,578	129,593	122,199	119,200	118,056	117,613	117,451	117,247	116,953	116,568	116,568
100% CZP + IA	129,380	98,804	120,903	113,838	110,292	108,737	107,948	107,481	106,990	106,093	104,895	104,616
	133,303	101,895	123,988	116,903	113,555	112,046	111,276	110,817	110,331	109,423	108,209	107,908
	136,642	103,678	126,076	118,565	115,084	113,540	112,773	112,325	111,839	110,952	109,783	109,565

## ANEXO 6: Dados do ensaio de condutividade térmica

0%CZP				
W(%)	A	A médio	Desvio	Resíduo
	0,64			1,25
0,00	0,70	0,72	0,06	0,27
	0,79			1,09
	0,75			0,42
	0,51			68,97
0,33	0,51	0,38	0,00	68,59
	0,50			67,08
	0,45			0,40
4,26	0,36	0,42	0,08	0,70
	0,34			0,92
	0,52			1,23
	0,18			0,27
11,34	0,12	0,17	0,04	1,43
	0,18			0,27
	0,20			0,89
	0,14			0,29
14,50	0,21	0,13	0,03	2,29
	0,18			1,34
	0,21			2,04
16,93	0,12	0,12	0,04	0,15
	0,14			0,53
	0,19			0,31
8,48	0,20	0,19	0,01	1,47
	0,18			0,74
	0,18			0,42
	0,43			0,19
2,86	0,52	0,44	0,07	1,16
	0,46			0,27
	0,36			1,24
	0,29			0,11
3,73	0,30	0,28	0,13	0,16
	0,52			1,87
	0,27			0,44
5,47	0,24	0,23	0,09	0,14
	0,41			2,00
	0,84			17,11
1,32	0,82	0,62	0,01	15,35
	0,82			15,40

50%CZP				
W(%)	A	A médio	Desvio	Resíduo
	1,09			0,21
0,00	1,14	1,10	0,04	1,10
	1,11			0,37
	1,05			1,27
	0,50			0,21
2,41	0,45	0,52	0,08	0,85
	0,48			0,39
	0,63			1,44
	0,48			0,58
3,27	0,45	0,42	0,11	0,30
	0,26			1,49
	0,48			0,60
	0,72			0,86
4,15	0,77	0,80	0,10	0,35
	0,94			1,44
	0,78			0,23
	0,54			0,53
5,94	0,67	0,57	0,06	1,50
	0,54			0,51
	0,55			0,46
	0,35			0,54
8,03	0,53	0,40	0,09	1,49
	0,37			0,32
	0,35			0,63
	0,28			0,40
11,22	0,26	0,29	0,04	0,85
	0,34			1,44
	0,29			0,18
	0,25			0,89
9,88	0,35	0,29	0,05	1,41
	0,29			0,07
	0,27			0,45
	0,22			0,39
17,51	0,19	0,21	0,02	0,81
	0,24			1,24
	0,19			0,81
	0,24			0,51
14,51	0,23	0,24	0,01	0,49
	0,25			1,11
	0,22			1,13
	0,17			0,65
22,61	0,28	0,20	0,05	1,48
	0,19			0,25
	0,17			0,58

### Notas:

As amostras da argamassa 0%CZP são as únicas nas quais não foram realizadas quatro leituras para cada teor de conteúdo de umidade mássico.

Para um valor ser considerado espúrio o valor máximo de resíduo admitido para 5% de significância e número de amostras igual a quatro é de 1,46.

Para um valor ser considerado espúrio o valor máximo de resíduo admitido para 5% de significância e número de amostras igual a três é de 1,15.

Os valores de "A" sombreados foram desconsiderados no cálculo da condutividade térmica em função de serem considerados valores espúrios ou por apresentarem o maior resíduo referente as amostras ensaiadas para uma mesma argamassa e um mesmo conteúdo de umidade mássico.

100%CZP				
W(%)	A	A médio	Desvio	Resíduo
	0,81			0,46
0,00	0,74	0,78	0,06	0,62
	0,71			1,01
	0,85			1,17
	0,69			1,26
1,80	0,72	0,72	0,02	0,16
	0,74			1,17
	0,72			0,07
	0,63			0,98
1,84	0,64	0,66	0,03	0,52
	0,69			1,32
	0,66			0,18
	0,59			0,50
2,48	0,79	0,64	0,10	1,50
	0,60			0,47
	0,59			0,53
	0,71			0,40
4,14	0,67	0,73	0,07	0,86
	0,72			0,17
	0,83			1,44
	0,65			0,55
3,15	0,58	0,63	0,04	1,39
	0,66			0,87
	0,63			0,03
	0,57			0,73
5,75	0,61	0,58	0,02	1,46
	0,58			0,19
	0,57			0,54
	0,60			0,34
9,51	0,58	0,59	0,02	0,61
	0,62			1,25
	0,57			0,98
	0,49			0,65
15,46	0,51	0,52	0,04	0,23
	0,58			1,47
	0,49			0,59
	0,39			0,25
18,67	0,38	0,40	0,05	0,53
	0,48			1,47
	0,37			0,70
	0,30			0,37
31,52	0,26	0,33	0,11	0,66
	0,49			1,49
	0,29			0,46

0%CZP+IA				
W(%)	A	A médio	Desvio	Resíduo
	0,54			0,25
0,00	0,53	0,54	0,02	0,45
	0,52			0,76
	0,58			1,47
	0,57			1,43
0,80	0,53	0,53	0,02	0,04
	0,52			0,73
	0,52			0,66
	0,57			1,43
2,16	0,53	0,53	0,02	0,04
	0,52			0,73
	0,52			0,66
	0,46			0,58
3,24	0,46	0,47	0,01	0,28
	0,46			0,63
	0,48			1,48
	0,40			1,26
4,14	0,39	0,39	0,01	1,07
	0,40			0,27
	0,39			0,45
	0,40			1,43
5,70	0,35	0,35	0,03	0,18
	0,34			0,36
	0,32			0,89
	0,25			0,20
11,78	0,25	0,26	0,03	0,33
	0,30			1,43
	0,23			0,90
	0,24			0,56
9,75	0,24	0,24	0,00	0,52
	0,24			0,42
	0,25			1,50
	0,21			1,27
14,55	0,20	0,21	0,01	0,25
	0,20			1,15
	0,21			0,13
	0,20			0,15
16,64	0,20	0,20	0,01	0,21
	0,21			1,02
	0,18			1,38
	0,21			1,48
17,85	0,19	0,19	0,01	0,52
	0,18			0,65
	0,19			0,30

Notas:

Para um valor ser considerado espúrio o valor máximo de resíduo admitido para 5% de significância e número de amostras igual a quatro é de 1,46.

Os valores de "A" sombreados foram desconsiderados no cálculo da condutividade térmica em função de serem considerados valores espúrios ou por apresentarem o maior resíduo referente as amostras ensaiadas para uma mesma argamassa e um mesmo conteúdo de umidade mássico.

50%CZP+IA				
W(%)	A	A médio	Desvio	Resíduo
	0,81			0,85
0,00	0,86	0,88	0,08	0,20
	0,99			1,44
	0,85			0,40
	0,64			0,39
1,38	0,62	0,64	0,01	1,34
	0,65			1,02
	0,63			0,07
	0,77			0,85
2,37	0,71	0,75	0,03	1,45
	0,76			0,25
	0,76			0,36
	0,68			0,13
3,03	0,66	0,68	0,02	1,04
	0,71			1,36
	0,68			0,19
	0,66			1,19
1,78	0,65	0,64	0,02	0,11
	0,62			1,25
	0,64			0,05
	0,55			0,42
4,12	0,53	0,58	0,08	0,67
	0,69			1,49
	0,55			0,40
	0,57			0,27
6,22	0,58	0,57	0,01	1,26
	0,56			1,14
	0,57			0,15
	0,65			1,48
7,70	0,61	0,62	0,02	0,61
	0,61			0,61
	0,62			0,27
	0,35			1,32
13,44	0,34	0,35	0,00	1,11
	0,35			0,02
	0,35			0,20
	0,31			0,34
19,25	0,31	0,32	0,01	0,34
	0,34			1,46
	0,31			0,79
	0,32			1,16
23,24	0,30	0,30	0,02	0,32
	0,28			1,22
	0,29			0,26

100%CZP+IA				
W(%)	A	A médio	Desvio	Resíduo
	1,13			1,00
0,00	1,12	1,09	0,04	0,64
	1,08			0,47
	1,05			1,17
	0,82			1,42
1,48	0,86	0,86	0,03	0,15
	0,89			0,92
	0,87			0,35
	0,80			0,42
3,26	0,77	0,81	0,03	1,19
	0,83			0,60
	0,84			1,02
	0,56			0,77
10,10	0,58	0,57	0,01	0,31
	0,56			0,82
	0,59			1,28
	0,52			0,87
17,15	0,60	0,55	0,04	1,42
	0,55			0,09
	0,53			0,46
	0,72			1,13
6,08	0,72	0,72	0,01	0,06
	0,71			1,31
	0,72			0,12
	0,36			0,45
27,37	0,45	0,38	0,05	1,47
	0,37			0,27
	0,34			0,75
	0,71			0,83
12,06	0,72	0,74	0,03	0,47
	0,79			1,44
	0,73			0,13
	0,82			0,44
2,57	0,82	0,83	0,02	0,48
	0,82			0,58
	0,86			1,50
	0,48			0,46
24,96	0,46	0,51	0,08	0,70
	0,63			1,48
	0,49			0,32
	0,42			0,16
31,19	0,38	0,42	0,04	1,02
	0,48			1,37
	0,42			0,19

Notas:

Para um valor ser considerado espúrio o valor máximo de resíduo admitido para 5% de significância e número de amostras igual a quatro é de 1,46.

Os valores de "A" sombreados foram desconsiderados no cálculo da condutividade térmica em função de serem considerados valores espúrios ou por apresentarem o maior resíduo referente as amostras ensaiadas para uma mesma argamassa e um mesmo conteúdo de umidade mássico.

## ANEXO 7: Análise de variância dos resultados

### Consistência

#### Dados

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	306	285	236	827
com	301	281	241	823
Tj	607	566	477	1650
$\Sigma y^2$	184237	160186	113777	458200

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	4417	2	2208,5	145,6154	F <sub>0,05(2,2)</sub> =19,00
IA	2,666667	1	2,666667	0,175824	F <sub>0,05(1,2)</sub> =18,51
Resíduo	30,33333	2	15,16667		
Total	4450	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que o parâmetro que influi na consistência é o teor de CZP.

### Retenção de água

#### Dados

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	81,75	76,05	77,70	235,50
com	94,61	92,74	81,29	268,64
Tj	176,36	168,79	158,99	504,14
$\Sigma y^2$	15634,11	14384,31	12645,35	42663,78

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	75,84363	2	37,92182	1,67172	F <sub>0,05(2,2)</sub> =19,00
IA	183,0433	1	183,0433	8,069155	F <sub>0,05(1,2)</sub> =18,51
Resíduo	45,36863	2	22,68432		
Total	304,2555	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade não pode-se afirmar que a CZP ou o aditivo são parâmetros que influem na retenção de água.

### Massa específica no estado fresco

#### Dados

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	2,02	1,86	1,63	5,51
com	1,63	1,47	1,42	4,52
Tj	3,65	3,33	3,05	10,03
$\Sigma y^2$	6,74	5,62	4,67	17,03

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,090133	2	0,045067	8,35	F <sub>0,05(2,2)</sub> =19,00
IA	0,16335	1	0,16335	30,25	F <sub>0,05(1,2)</sub> =18,51
Resíduo	0,0108	2	0,0054		
Total	0,264283	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que o parâmetro que influi na massa específica no estado fresco é o aditivo.

**Massa específica no estado endurecido****Dados**

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	1,74	1,50	1,26	13,50
	1,74	1,50	1,27	
	1,73	1,49	1,27	
com	1,39	1,24	1,12	11,32
	1,47	1,23	1,09	
	1,42	1,24	1,12	
Ti	9,49	8,20	7,13	24,82

**Tratamentos**

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	1,74	1,39	1,50	1,24	1,26	1,12
	1,74	1,47	1,50	1,23	1,27	1,09
	1,73	1,42	1,49	1,24	1,27	1,12
Tij	5,21	4,28	4,49	3,71	3,80	3,33

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,12)
Entre tratamento	0,747844	5	0,149569	434,2323
Dentro	0,004133	12	0,000344	
Total	0,751978	17		

$F_{0,05}(5,12) = 3,11$ , como  $F > F_{0,05}(5,12)$  há influência dos tratamentos

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,465478	2	0,232739	675,6935	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
IA	0,264022	1	0,264022	766,5161	$F_{0,05}(1,12) = 4,75$
CZPxIA	0,018344	2	0,009172	26,62903	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
Dentro	0,004133	12	0,000344		
Total	0,751978	17			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem na massa específica no estado endurecido das argamassas são o teor de CZP, o aditivo e inter-relação entre o teor de cinza e o emprego de aditivo. Destes parâmetros o que tem maior influência é o aditivo.

### Porosidade aberta

#### Dados

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	29,64	33,38	37,13	301,46
	29,53	33,62	36,58	
	30,38	33,94	37,26	
com	25,89	29,29	34,36	270,25
	26,03	28,72	34,10	
	26,97	30,01	34,87	
Ti	168,44	188,96	214,30	571,70

#### Tratamentos

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	29,64	25,89	33,38	29,29	37,13	34,36
	29,53	26,03	33,62	28,72	36,58	34,10
	30,38	26,97	33,94	30,01	37,26	34,87
Tij	89,55	78,89	100,94	88,02	110,97	103,33

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,12)
Entre tratamento	232,3634	5	46,47267	208,4182
Dentro	2,675736	12	0,222978	
Total	235,0391	17		

$F_{0,05}(5,12) = 3,11$ , como  $F > F_{0,05}(5,12)$  há influência dos tratamentos

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	175,9144	2	87,95722	394,4660	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
IA	54,11013	1	54,11013	242,6703	$F_{0,05}(1,12) = 4,75$
CZPxIA	2,338785	2	1,169393	5,2444	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
Dentro	2,675736	12	0,222978		
Total	235,0391	17			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem na porosidade aberta das argamassas são o teor de CZP, o emprego do aditivo e a inter-relação entre estes parâmetros.

Destes parâmetros o que tem maior influência é o teor de CZP.

Volume de água de cura/ volume de amostra perdido na secagem em estufa (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

**Dados**

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	0,28	0,31	0,34	1,90
	0,29	0,33	0,35	
com	0,24	0,26	0,31	1,65
	0,26	0,27	0,31	
Ti	1,07	1,17	1,31	3,55

**Tratamentos**

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	0,28	0,24	0,31	0,26	0,34	0,31
	0,29	0,26	0,33	0,27	0,35	0,31
Tij	0,57	0,50	0,64	0,53	0,69	0,62

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,6)
Entre tratamento	0,012742	5	0,002548	27,8
Dentro	0,00055	6	9,17E-05	
Total	0,013292	11		

$F_{0,05}(5,6) = 4,39$ , como  $F > F_{0,05}(5,6)$  há influência dos tratamentos

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,007267	2	0,003633	39,6364	$F_{0,05}(2,6)=5,14$
IA	0,005208	1	0,005208	56,8182	$F_{0,05}(1,6)=5,99$
CZPxIA	0,000267	2	0,000133	1,4545	$F_{0,05}(2,6)=5,14$
Dentro	0,00055	6	9,17E-05		
Total	0,013292	11			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem no volume de água perdido durante a secagem da água de cura das argamassas são o teor de CZP e o aditivo.

Destes parâmetros o que tem maior influência é o aditivo.

### Volume total de água absorvida por imersão (cm<sup>3</sup>)

#### Dados

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	26,989	30,787	34,219	275,462
	27,058	31,317	32,793	
	27,467	30,396	34,436	
com	23,304	27,292	30,576	245,766
	23,598	26,408	31,408	
	23,511	26,705	32,964	
Ti	151,927	172,905	196,396	521,228

#### Tratamentos

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	26,99	23,30	30,79	27,29	34,22	30,58
	27,06	23,60	31,32	26,41	32,79	31,41
	27,47	23,51	30,40	26,71	34,44	32,96
Tij	81,51	70,41	92,50	80,41	101,45	94,95

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,6)
Entre tratamento	216,9283	5	43,38566	46,96108
Dentro	5,543185	6	0,923864	
Total	222,4715	17		

$F_{0,05}(5,6) = 4,39$  , como  $F > F_{0,05}(5,6)$  há influência dos tratamentos

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	164,9664	2	82,48321	89,2807	$F_{0,05}(2,6)=5,14$
IA	48,9918	1	48,9918	53,0292	$F_{0,05}(1,6)=5,99$
CZPxIA	2,97007	2	1,485035	1,6074	$F_{0,05}(2,6)=5,19$
Dentro	5,543185	6	0,923864		
Total	222,4715	17			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem no volume de água absorvido por capilaridade pelas argamassas são o teor de CZP e o aditivo.

Destes parâmetros o que tem maior influência é a CZP.

**Volume total de água absorvida por imersão (cm<sup>3</sup>)****Dados**

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	26,989	30,787	34,219	275,462
	27,058	31,317	32,793	
	27,467	30,396	34,436	
com	23,304	27,292	30,576	245,766
	23,598	26,408	31,408	
	23,511	26,705	32,964	
Ti	151,927	172,905	196,396	521,228

**Tratamentos**

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	26,99	23,30	30,79	27,29	34,22	30,58
	27,06	23,60	31,32	26,41	32,79	31,41
	27,47	23,51	30,40	26,71	34,44	32,96
Tij	81,51	70,41	92,50	80,41	101,45	94,95

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,12)
Entre tratamento	216,9283	5	43,38566	93,92216
Dentro	5,543185	12	0,461932	
Total	222,4715	17		

$F_{0,05}(5,12) = 3,11$ , como  $F > F_{0,05}(5,12)$  há influência dos tratamentos

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $_{\alpha}$
CZP	164,9664	2	82,48321	178,5613	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
IA	48,9918	1	48,9918	106,0585	$F_{0,05}(1,12) = 4,75$
CZPxIA	2,97007	2	1,485035	3,2148	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
Dentro	5,543185	12	0,461932		
Total	222,4715	17			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem no volume de água absorvido por capilaridade pelas argamassas são o teor de CZP e o aditivo.

Destes parâmetros o que tem maior influência é a CZP.

## Sorptividade

### Dados

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	0,1489	0,1109	0,1003	1,0317
	0,1451	0,1092	0,0955	
	0,1481	0,0911	0,0826	
com	0,1241	0,1122	0,0524	0,8699
	0,1345	0,0996	0,049	
	0,1244	0,1003	0,0734	
Ti	0,8251	0,6233	0,4532	1,9016

### Tratamentos

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	0,1489	0,1241	0,1109	0,1122	0,1003	0,0524
	0,1451	0,1345	0,1092	0,0996	0,0955	0,049
	0,1481	0,1244	0,0911	0,1003	0,0826	0,0734
Tij	0,4421	0,3830	0,3112	0,3121	0,2784	0,1748

### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,12)
Entre tratamento	0,013925	5	0,002785	35,69956
Dentro	0,000936	12	7,8E-05	
Total	0,014861	17		

$F_{0,05}(5,12) = 3,11$  , como  $F > F_{0,05}(5,12)$  há influência dos tratamentos

### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,011554	2	0,005777	74,05172	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
IA	0,001454	1	0,001454	18,64353	$F_{0,05}(1,12) = 4,75$
CZPxIA	0,000917	2	0,000458	5,875409	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
Dentro	0,000936	12	7,8E-05		
Total	0,014861	17			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem na sorptividade das argamassas são o teor de CZP, emprego do aditivo e a interação entre estes dois parâmetros.

Destes parâmetros o que tem maior influência é o teor de CZP.

## Ângulo de molhamento aparente

### Dados

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	78,0	83,3	75,0	697,67
	74,8	74,6	79,1	
	72,0	79,0	81,9	
com	80,2	80,7	84,7	695,92
	78,1	72,6	69,8	
	76,0	71,1	82,5	
Ti	459,16	461,36	473,07	1393,59

### Tratamentos

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	78,00	80,25	83,30	80,73	74,99	84,75
	74,80	78,14	74,65	72,60	79,12	69,85
	72,00	75,97	78,96	71,13	81,85	82,52
Tij	224,80	234,36	236,91	224,46	235,96	237,11

### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,12)
Entre tratamento	60	5	12	1
Dentro	271	12	23	
Total	331	17		

$F_{0,05}(5,12) = 3,11$  , como  $F < F_{0,05}(5,12)$  não há influência dos tratamentos

### Volume total de água perdida durante a secagem ao ar (cm<sup>3</sup>)

#### Dados

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	24,23	26,55	28,78	237,81
	24,13	26,96	27,19	
	24,57	26,39	29,02	
com	19,82	23,02	24,76	205,33
	20,10	22,34	25,40	
	20,11	22,72	27,08	
Ti	132,96	147,97	162,22	443,15

#### Tratamentos

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	24,23	19,82	26,55	23,02	28,78	24,76
	24,13	20,10	26,96	22,34	27,19	25,40
	24,57	20,11	26,39	22,72	29,02	27,08
Tij	72,93	60,03	79,90	68,07	84,99	77,24

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,12)
Entre tratamento	132,4695	5	26,4939	58,83015
Dentro	5,404147	12	0,450346	
Total	137,8736	17		

$F_{0,05}(5,12) = 3,11$ , como  $F > F_{0,05}(5,12)$  há influência dos tratamentos

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	71,40053	2	35,70026	79,2730	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
IA	58,60836	1	58,60836	130,1409	$F_{0,05}(1,12) = 4,75$
CZPxIA	2,460594	2	1,230297	2,7319	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
Dentro	5,404147	12	0,450346		
Total	137,8736	17			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem no volume de água perdido durante a secagem ao ar das argamassas são o teor de CZP e o aditivo.

Destes parâmetros o que tem maior influência é o aditivo.

### Adsorção - UR=20%

#### Dados

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	1,0	1,0	0,8	2,8
com	0,8	0,5	0,2	1,5
Tj	1,8	1,5	1,0	4,3
$\Sigma y^2$	1,6	1,3	0,7	3,6

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,163333	2	0,081667	3,77	$F_{0,05}(2,2) = 19,00$
IA	0,281667	1	0,281667	13,00	$F_{0,05}(1,2) = 18,51$
Resíduo	0,043333	2	0,021667		
Total	0,488333	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade não pode-se afirmar que a CZP ou o aditivo são parâmetros que influem na adsorção para a UR=20%.

**Adsorção - UR=65%****Dados**

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	1,5	1,5	1,5	4,5
com	1,1	1,0	1,1	3,2
Tj	2,6	2,5	2,6	7,7
$\Sigma y^2$	3,5	3,3	3,5	10,2

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,003333	2	0,001667	1,00	F <sub>0,05(2,2)</sub> =19,00
IA	0,281667	1	0,281667	169,00	F <sub>0,05(1,2)</sub> =18,51
Resíduo	0,003333	2	0,001667		
Total	0,288333	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que o parâmetro que influi na adsorção quando a UR é de 65% é o aditivo.

**Adsorção - UR=96%****Dados**

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	2,6	3,3	4,2	10,1
com	2,1	2,5	3,5	8,1
Tj	4,7	5,8	7,7	18,2
$\Sigma y^2$	11,2	17,1	29,9	58,2

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	2,303333	2	1,151667	98,71	F <sub>0,05(2,2)</sub> =19,00
IA	0,666667	1	0,666667	57,14	F <sub>0,05(1,2)</sub> =18,51
Resíduo	0,023333	2	0,011667		
Total	2,993333	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem na adsorção quando a UR é de 96% são o teor de CZP e o aditivo.

**Superfície específica das argamassas****Dados**

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	47,94	41,00	36,69	125,63
com	30,14	21,05	24,97	76,16
Tj	78,08	62,05	61,66	201,79
$\Sigma y^2$	3206,66	2124,10	1969,66	7300,42

**Tabela ANOVA**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	87,78823	2	43,89412	4,82	F <sub>0,05(2,2)</sub> =19,00
IA	407,8802	1	407,8802	44,77	F <sub>0,05(1,2)</sub> =18,51
Resíduo	18,2203	2	9,11015		
Total	513,8887	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que o parâmetro que influi na superfície específica das argamassas é o aditivo.

### Condutividade térmica no estado seco

#### Dados

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	0,52	0,33	0,45	3,90
	0,46	0,32	0,49	
	0,49	0,33	0,51	
com	0,68	0,45	0,32	4,33
	0,68	0,42	0,32	
	0,69	0,43	0,34	
Ti	3,52	2,28	2,43	8,23

#### Tratamentos

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	0,52	0,68	0,33	0,45	0,45	0,32
	0,46	0,68	0,32	0,42	0,49	0,32
	0,49	0,69	0,33	0,43	0,51	0,34
Tij	1,47	2,05	0,98	1,30	1,45	0,98

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,12)
Entre tratamento	0,262628	5	0,052526	139,0382
Dentro	0,004533	12	0,000378	
Total	0,267161	17		

$F_{0,05}(5,12) = 3,11$ , como  $F > F_{0,05}(5,12)$  há influência dos tratamentos

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,152678	2	0,076339	202,0735	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
IA	0,010272	1	0,010272	27,1912	$F_{0,05}(1,12) = 4,75$
CZPxIA	0,099678	2	0,049839	131,9265	$F_{0,05}(2,12) = 3,89$
Dentro	0,004533	12	0,000378		
Total	0,267161	17			

Portanto, com 95% de confiabilidade pode-se afirmar que os parâmetros que influem na condutividade térmica no estado seco das argamassas são o teor de CZP, o aditivo e a inter-relação entre a CZP e o aditivo. Destes parâmetros o que tem maior influência é a CZP.

### Variação da condutividade térmica com a umidade

#### Dados

IA	CZP			Ti
	0%	50%	100%	
sem	0,1212	0,0771	0,0243	0,2226
com	0,0754	0,0346	0,0184	0,1284
Tj	0,1966	0,1117	0,0427	0,3510
$\Sigma y^2$	0,0204	0,0071	0,0009	0,0284

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F $\alpha$
CZP	0,005942	2	0,002971	12,12	$F_{0,05}(2,2) = 19,00$
IA	0,001479	1	0,001479	6,03	$F_{0,05}(1,2) = 18,51$
Resíduo	0,00049	2	0,000245		
Total	0,007912	5			

Portanto, com 95% de confiabilidade não pode-se afirmar que a CZP ou o aditivo são parâmetros que influem na variação da condutividade térmica com a umidade.

### Quantidade de água quimicamente ligada

#### Dados

IA	CZP			Tj
	0%	50%	100%	
sem	2,69	2,79	3,28	18,17
	2,64	3,48	3,29	
com	3,09	2,96	3,56	21,17
	3,93	4,07	3,56	
Ti	12,35	13,30	13,69	39,34

#### Tratamentos

	0 sem	0 com	50 sem	50 com	100 sem	100 com
	2,69	3,09	2,79	2,96	3,28	3,56
	2,64	3,93	3,48	4,07	3,29	3,56
Tij	5,33	7,02	6,27	7,03	6,57	7,12

#### Tabela ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F (5,6)
Entre tratamento	1,171567	5	0,234313	1,163615
Dentro	1,2082	6	0,201367	
Total	2,379767	11		

$F_{0,05}(5,6) = 4,39$ , como  $F < F_{0,05}(5,6)$  não há influência dos tratamentos