



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRAUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**COMBATE À RETRAÇÃO DO CONCRETO COM PROMOÇÃO  
DE CURA INTERNA.**

LUCAS ONGHERO

Florianópolis, dezembro de 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRAUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**COMBATE À RETRAÇÃO DO CONCRETO COM PROMOÇÃO  
DE CURA INTERNA.**

Trabalho de Conclusão apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Engenheiro  
Civil.

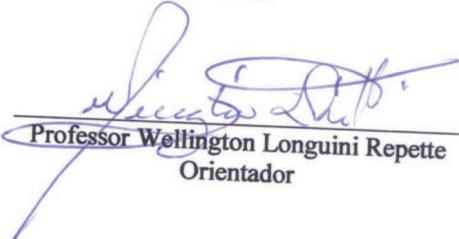
LUCAS ONGHERO

Florianópolis, dezembro de 2013.

LUCAS ONGHERO

COMBATE À RETRAÇÃO DO CONCRETO COM PROMOÇÃO DE  
CURA INTERNA

Trabalho de Conclusão apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Engenheiro  
Civil.



---

Professor Wellington Longuini Repette  
Orientador

---

Prof. Dr. Philippe Gleize  
Membro da banca avaliadora

---

Prof. Dr. Roberto Caldas Pinto  
Membro da banca avaliadora

Florianópolis, SC, dezembro de 2013.

*“Não pergunte se  
somos capazes, apenas nos dê  
a missão!”  
Exército Brasileiro.*

*“O sucesso nasce do  
querer, da determinação e da  
persistência em se chegar a  
um objetivo”.  
Exército Brasileiro*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, tenho que agradecer a toda minha família (pais, irmão, tios, primos, avó) que, mesmo alguns muito longe, sempre me serviram como norte nos momentos de dificuldades enfrentados durante toda esta etapa.

Ao professor Wellington Repette, por toda paciência, companheirismo, conselhos e ensinamento transmitido durante todos este tempo em que trabalhamos juntos.

Ao professor Luiz Roberto Prudêncio Junior, pela sua amizade, pelas contribuições dadas no desenvolvimento deste trabalho, além das oportunidades de participar no desenvolvimento de diversos trabalhos, que contribuíram muito para minha formação.

Aos amigos conquistados em todo estes anos de pesquisa no departamento: Regina Prudêncio, Rudiele Schankoski, Ronaldo Pilar, Eduardo Tochetto, Luiz Schmidt, Diego Scharmann, Julian Rossini, Wilson Ricardo, Dennis Weidmann, Joécio Stocco, Cintya Sakamoto, Rômulo Parisotto, Paulo de Mattos, Eduardo Graeff, Felipe Costa, Alexandre de Oliveira, pelas diversas contribuições durante este tempo, dando aquela força que faltava em diversos momentos e pelos diversos momentos de descontrações proporcionado.

Aos meus amigos Guido Willian, André Teo, França Horn, Henrique Rodrigues Oliveira, Otávio, pelos momentos de descontrações e amizade prestada.

À Supermix e os amigos ali conquistados no curto tempo em que ali estou, pelo apoio, incentivo, experiência e conhecimento adquirido. Em especial: Fabiano Paschoal, Maurício Bianchini, Alessandro Veríssimo, Célio Kons, Nivaldo Lachowski Junior, Lucio Noel Coelho, Everton, Fábio.

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS .....   | VIII |
| LISTA DE TABELAS .....   | XII  |
| LISTA DE SÍMBOLO .....   | XIII |
| RESUMO .....   | 14   |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 15   |
| 1.1 IMPORTÂNCIA .....  | 15   |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....  | 16   |
| 1.3 OBJETIVOS .....  | 16   |
| 1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 17   |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....  | 18   |
| 2.1 RETRAÇÃO – DEFINIÇÃO .....   | 18   |
| 2.1.1 RETRAÇÃO AUTÓGENA .....  | 19   |
| 2.1.2 RETRAÇÃO POR SECAGEM .....   | 20   |
| 2.2 INFLUÊNCIAS DOS MATERIAIS NOS DIFERENTES TIPOS DE RETRAÇÃO .....                               | 21   |
| 2.2.1 CIMENTO E ADIÇÕES .....  | 21   |
| 2.2.2 AGREGADO .....   | 22   |
| 2.2.3 ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES .....   | 23   |
| 2.3 MODELO DE POWERS .....   | 23   |
| 2.4 ENSAIOS PARA RETRAÇÃO .....  | 25   |
| 2.5 FORMAS DE COMBATE À RETRAÇÃO AUTÓGENA E POR SECAGEM .....                                      | 25   |
| 2.5.1 CURA .....   | 26   |
| 2.5.1.1 CURA EXTERNA .....   | 27   |
| 2.5.1.2 CURA INTERNA .....   | 28   |
| 2.5.2 AGREGADO LEVE .....  | 29   |
| 2.5.3 POLÍMEROS SUPERABSORVENTES .....   | 30   |
| 2.6 APLICAÇÃO DO MODELO DE POWERS A AMOSTRAS SUBMETIDAS À CURA INTERNA POR INCORPORAÇÃO DE ÁGUA 31 |      |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS .....  | 33   |
| 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....   | 34   |
| 3.2 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS E CONFECÇÃO DAS PASTAS COM PSA .....                                   | 35   |
| 3.3 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS E CONFECÇÃO DAS PASTAS COM ARGILA EXPANDIDA .....                      | 37   |
| 3.4 CARACTERIZAÇÃO EM ESTADO FRESCO .....  | 40   |
| 3.4.1 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA .....   | 40   |
| 3.4.2 ENSAIO FUNIL “V” .....   | 40   |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 3.4.3  | ENSAIO DE ESPALHAMENTO (SLUMP-FLOW) .....                                   | 41 |
| 3.4.4  | RETRAÇÃO AUTÓGENA MEDIDA COM TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO .....             | 42 |
| 3.4.5  | RETRAÇÃO AUTÓGENA – MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR.....                      | 43 |
| 3.4.6  | ACOMPANHAMENTO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E UR NO INTERIOR DAS PASTAS. .... | 46 |
| 3.4.7  | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....  | 47 |
| 3.4.8  | EVOLUÇÃO DE CALOR .....   | 48 |
| 3.4.9  | MÓDULO DE ELASTICIDADE .....  | 48 |
| 3.4.10 | RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE SUPERFICIAL. ....                           | 50 |
| 4      | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 52 |
| 4.1    | RESULTADOS DOS ENSAIOS EM ESTADO FRESCO .....                               | 52 |
| 4.1.1  | ENSAIO DE ESPALHAMENTO DE ADITIVO .....                                     | 52 |
| 4.1.2  | ENSAIO FUNIL “V” E CONSUMO DE ADITIVO .....                                 | 54 |
| 4.1.3  | MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE AR INCORPORADO ....                              | 56 |
| 4.1.4  | EVOLUÇÃO DE CALOR .....   | 58 |
| 4.2    | RESULTADOS ATRAVÉS DO RELÓGIO COMPARADOR.....                               | 62 |
| 4.3    | RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....                                | 67 |
| 4.4    | MÓDULO DE ELASTICIDADE .....  | 71 |
| 4.5    | RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....   | 72 |
| 4.6    | RETRAÇÃO MEDIDA NO BANCADA DE RETRAÇÃO ....                                 | 77 |
| 4.7    | ACOMPANHAMENTO DA UMIDADE RELATIVA.....                                     | 83 |
| 5      | RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....   | 87 |
| 6      | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 91 |
| 7      | SUGETÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....  | 93 |
| 8      | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 94 |

## LISTA DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| <p>FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE FASES DA PASTA DE CIMENTO EM FUNÇÃO DO GRAU DE HIDRATAÇÃO (A), EM SISTEMA FECHADO (LIVRE DE TROCA DE UMIDADE COM O AMBIENTE). NA ESQUERDA PARA UMA RELAÇÃO A/C DE 0,60: DADA A ALTA RELAÇÃO A/C (&gt;0,42), A COMPLETA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO (A=1) PODE SER TEORICAMENTE OBTIDA. NA DIREITA PARA UMA RELAÇÃO A/C DE 0,30: DADA A BAIXA RELAÇÃO A/C (&lt;0,42), A COMPLETA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO (A=1) NÃO É POSSÍVEL, ESTANDO LIMITADA A UM GRAU MÁXIMO DE HIDRATAÇÃO (AMÁX.). (ADAPTADO: JENSEN E HANSEN, 2001B).....</p> | 24 |
| <p>FIGURA 2 - CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDOS UTILIZADOS NO ESTUDO.....</p>  | 35 |
| <p>FIGURA 3 - APARATO PARA ENSAIO DE FUNIL "V".....</p>  | 40 |
| <p>FIGURA 4 - MODELO ESQUEMÁTICO DO ENSAIO DE ESPALHAMENTO.....</p>  | 41 |
| <p>FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA BANCADA DE RETRAÇÃO. ....</p>   | 42 |
| <p>FIGURA 6 – QUADRO DE RETRAÇÃO.....</p>  | 44 |
| <p>FIGURA 7 – ARMAZENAMENTO DE PRISMAS PARA DETERMINAÇÃO DA RETRAÇÃO. ....</p>   | 44 |
| <p>FIGURA 8 - TUBO DE ENSAIO COM AMOSTRA SUBMETIDA AO MONITORAMENTO DE UR E TEMPERATURA EM BANHO TERMOSTATIZADO. (KUMM,2009).....</p>  | 47 |
| <p>FIGURA 9 - APARATO UTILIZADO PARA REALIZAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.....</p>   | 49 |
| <p>FIGURA 10 - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA ATRAVÉS DO USO DE SONDA WENNER - RESISPOD. (PROCEQ).....</p>   | 51 |
| <p>FIGURA 11 - RELAÇÃO ENTRE ABERTURA E TEOR DE ADITIVO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,25 .....</p>  | 53 |
| <p>FIGURA 12 - RELAÇÃO ENTRE ABERTURA E TEOR DE ADITIVO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 .....</p>  | 53 |
| <p>FIGURA 13 - RELAÇÃO ENTRE ABERTURA E TEOR DE ADITIVO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,40 .....</p>  | 54 |
| <p>FIGURA 14 - RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE FUNIL E TEOR DE ADITIVO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,25.....</p>   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE FUNIL E TEOR DE ADITIVO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 .....                        | 55 |
| FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE FUNIL E TEOR DE ADITIVO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,40 .....                        | 56 |
| FIGURA 17 – MASSA ESPECÍFICA DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,25. ....  | 57 |
| FIGURA 18 – MASSA ESPECÍFICA DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,30. ....  | 57 |
| FIGURA 19 – MASSA ESPECÍFICA DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,40. ....  | 58 |
| FIGURA 20 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA/ GRAMA DE CIMENTO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,25 E ADIÇÃO DE PSA.....              | 59 |
| FIGURA 21 - EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA/GRAMA DE CIMENTO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,25 E ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA.....  | 59 |
| FIGURA 22 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA/ GRAMA DE CIMENTO DAS MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 E ADIÇÃO DE PSA.....              | 60 |
| FIGURA 23 - EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA/GRAMA DE CIMENTO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 E ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA.....  | 60 |
| FIGURA 24 - EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA/GRAMA DE CIMENTO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,40 E ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA.....  | 61 |
| FIGURA 25 - EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA/GRAMA DE CIMENTO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,4 0 E ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA..... | 61 |
| FIGURA 26 - RETRAÇÃO MEDIDA NO QUADRO DE RETRAÇÃO PARA MISTURAS COM A/C 0,25 COM PSA .....                                | 64 |
| FIGURA 27 - RETRAÇÃO MEDIDA NO QUADRO DE RETRAÇÃO PARA MISTURAS COM A/C 0,25 COM ARGILA EXPANDIDA .....                   | 65 |
| FIGURA 28 - RETRAÇÃO MEDIDA NO QUADRO DE RETRAÇÃO PARA MISTURAS COM A/C 0,30 COM PSA .....                                | 65 |
| FIGURA 29 - RETRAÇÃO MEDIDA NO QUADRO DE RETRAÇÃO PARA MISTURAS COM A/C 0,30 COM ARGILA EXPANDIDA .....                   | 66 |
| FIGURA 30 - RETRAÇÃO MEDIDA NO QUADRO DE RETRAÇÃO PARA MISTURAS COM A/C 0,4 COM PSA .....                                 | 66 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 31 - RETRAÇÃO MEDIDA NO QUADRO DE RETRAÇÃO PARA MISTURAS COM A/C 0,40 COM ARGILA EXPANDIDA .....        | 67 |
| FIGURA 32 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 3 DIAS .....  | 68 |
| FIGURA 33 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 3 DIAS .....  | 68 |
| FIGURA 34 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 7 DIAS .....  | 69 |
| FIGURA 35– RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 7 DIAS .....   | 69 |
| FIGURA 36– RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 28 DIAS .....  | 70 |
| FIGURA 37– RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 28 DIAS .....  | 70 |
| FIGURA 38 - RESULTADO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS AMOSTRAS CONTENDO PSA AOS 28 DIAS .....                    | 71 |
| FIGURA 39 - RESULTADO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 28 DIAS .....  | 72 |
| FIGURA 40 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,25 E PSA. ....                    | 74 |
| FIGURA 41 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,25 E ARGILA EXPANDIDA. ....       | 74 |
| FIGURA 42 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 E PSA. ....                    | 75 |
| FIGURA 43 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 E ARGILA EXPANDIDA. ....       | 75 |
| FIGURA 44 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,40 E PSA. ....                    | 76 |
| FIGURA 45 – EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE MISTURAS COM RELAÇÃO A/C 0,40 E ARGILA EXPANDIDA. ....       | 76 |
| FIGURA 46 – DEFORMAÇÃO EM ESTADO AUTÓGENO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,25 E ADIÇÃO DE PSA. ....              | 79 |
| FIGURA 47 – DEFORMAÇÃO EM ESTADO AUTÓGENO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,25 E ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA. .... | 79 |
| FIGURA 48 – DEFORMAÇÃO EM ESTADO AUTÓGENO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 E ADIÇÃO DE PSA. ....              | 80 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 49 – DEFORMAÇÃO EM ESTADO AUTÓGENO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,30 E ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA. ....        | 81 |
| FIGURA 50 – DEFORMAÇÃO EM ESTADO AUTÓGENO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,40 E ADIÇÃO DE PSA. ....                     | 82 |
| FIGURA 51 – DEFORMAÇÃO EM ESTADO AUTÓGENO DAS AMOSTRAS COM RELAÇÃO A/C 0,40 E ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA. ....        | 82 |
| FIGURA 52 - UMIDADE RELATIVA DAS MISTURAS DURANTE OS 3 PRIMEIROS DIAS, AMOSTRAS COM PSA E A/C 0,25 . ....             | 83 |
| FIGURA 53 - UMIDADE RELATIVA DAS MISTURAS DURANTE OS 3 PRIMEIROS DIAS, AMOSTRAS COM ARGILA EXPANDIDA E A/C 0,25 ..... | 84 |
| FIGURA 54 - UMIDADE RELATIVA DAS MISTURAS DURANTE OS 3 PRIMEIROS DIAS, AMOSTRAS COM PSA E A/C 0,30 . ....             | 84 |
| FIGURA 55 - UMIDADE RELATIVA DAS MISTURAS DURANTE OS 3 PRIMEIROS DIAS, AMOSTRAS COM ARGILA EXPANDIDA E A/C 0,30 ..... | 85 |
| FIGURA 56 - UMIDADE RELATIVA DAS MISTURAS DURANTE OS 3 PRIMEIROS DIAS, AMOSTRAS COM PSA E A/C 0,40 . ....             | 85 |
| FIGURA 57 - UMIDADE RELATIVA DAS MISTURAS DURANTE OS 3 PRIMEIROS DIAS, AMOSTRAS COM ARGILA EXPANDIDA E A/C 0,40 ..... | 86 |

## LISTA DE TABELAS

---

|  |    |
|--|----|
| TABELA 1 - NOMENCLATURA DAS MISTURAS ESTUDADAS<br>COM PSA E SUAS COMPOSIÇÕES.....                            | 37 |
| TABELA 2 - TRAÇO UNITÁRIO DAS MISTURAS A SEREM<br>TESTADAS. ....   | 39 |
| TABELA 3 - VARIAÇÃO DE MASSA DURANTE O PERÍODO<br>ENSAIADO. ....   | 63 |
| TABELA 4 - VALORES PARA ESTIMATIVA DE<br>PROBABILIDADE DE CORROSÃO .....                                     | 73 |
| TABELA 5 - INDICAÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO .....   | 73 |
| TABELA 6 - VALORES DE RESISTIVIDADE QUANTO À<br>PENETRAÇÃO DE ÍONS DE CLORETO SEGUNDO AASHTO<br>TP95-11..... | 73 |

## LISTA DE SÍMBOLO

---

- $\alpha$  - grau de hidratação do cimento;  
 $\alpha_{\max}$  - grau máximo de hidratação do cimento;  
 $\alpha_t$  - coeficiente de variação térmica ( $16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  
a/c - relação água/cimento;  
(a/c)<sub>i</sub> - água incorporada;  
CAA - concreto autoadensável;  
CAD - concreto de auto desempenho;  
C<sub>3</sub>A - aluminato tricálcico;  
C<sub>4</sub>AF - ferro aluminato tetracálcico;  
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;  
C-S-H - silicato de cálcio hidratado;  
CSA - sulfoaluminato de cálcio  
C<sub>2</sub>S - silicato dicálcico;  
C<sub>3</sub>S - silicato tricálcico;  
 $\Delta t$  - variação da temperatura ( $^\circ\text{C}$ );  
 $\varepsilon_{\text{RA}}$  - deformação por retração autógena;  
 $\varepsilon_{\theta}$  - deformação devida variação térmica;  
 $\varepsilon_{\text{medido}}$  - deformação medida pelos LVDT;  
p - porosidade inicial;  
PSA - polímero superabsorvente;  
 $\rho_w$  - densidade da água;  
 $\rho_c$  - massa específica do cimento;  
UR - umidade relativa;  
V<sub>AC</sub> - volume de água capilar;  
V<sub>AG</sub> - volume de água de gel;  
V<sub>CA</sub> - volume de cimento anidro;  
V<sub>GS</sub> - volume de sólidos de gel;  
V<sub>RQ</sub> - volume de retração química;  
V<sub>ew0</sub> - volume inicial de água incorporada;

## RESUMO

---

O fenômeno da retração é definido como uma deformação tridimensional de contração do concreto ocasionado pela perda de água, podendo ser dividida em: retração plástica, por secagem, autógena, térmica e por carbonatação. Desta maneira, para se prevenir a retração existem diferentes técnicas, já que os mecanismos atuantes também se diferem. Dentre as medidas existentes de combate à retração, será abordada neste trabalho a cura interna com água incorporada. Esse tipo de cura caracteriza-se pelo emprego de um agente de cura, que atua como um reservatório de água, e que vai sendo liberada aos poucos, durante a hidratação do cimento. Neste período tais reservatórios são esvaziados, fornecendo água para as reações. O objeto deste trabalho foi avaliar o efeito da utilização de dois agentes de cura interna diferentes, sendo utilizada adição de PSA e Argila expandida, em argamassas destinadas à dosagem de concreto autoadensável, em três relações água/cimento (A/C) diferentes: 0,25; 0,30 e 0,40. As adições variaram também em três teores, sendo 0,25; 0,5 e 1,0% em relação à massa de cimento para as misturas com adição de polímero superabsorvente (PSA) e 5; 15 e 25% do volume da argamassa para as misturas com Argila expandida. O procedimento de mistura foi padronizado para não haver diferenças entre as amostragens. Estudou-se a influência na retração autógena nas primeiras idades, por secagem até os 28 dias e acompanhamento da resistividade elétrica até os 28 dias. As propriedades mecânicas observadas foram: resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias e módulo de elasticidade aos 28 dias. Após análise dos resultados, pode-se julgar que o polímero apresentou melhor desempenho do que as misturas com argila expandida no combate à retração para as misturas com relação A/C 0,30 e 0,40. Nas demais propriedades, as amostras contendo argila expandida tiveram desempenho abaixo das misturas com PSA, mostrando que os vazios resultantes da liberação da água de cura interna resultam em maior fragilidade da mistura, possivelmente pela conectividade entre os vazios.

**Palavras-chave:** combate à retração autógena; cura interna; polímeros superabsorventes, agregado leve.

## 1. INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Importância

O avanço tecnológico da construção civil proporcionou uma melhor compreensão dos materiais disponíveis no mercado atual, facilitando assim o surgimento de concreto que apresentam boa trabalhabilidade, altas resistências à compressão e grande durabilidade, denominados de concretos de alto-desempenho (CAD).

Dentro deste grande grupo, pode-se destacar a crescente utilização do concreto autoadensável (CAA), uma vez que além das características citadas anteriormente, possibilita aumento da produtividade do serviço de concretagem, peças estruturais mais complexas e maiores taxas de armaduras.

Esses benefícios são resultados das propriedades que o CAA apresenta. Assim como todo concreto deve ter resistência à segregação ou exsudação, porém necessita apresentar fluidez e habilidade passante.

Para obter essas vantagens, são utilizados aditivos redutores de água, adições minerais, baixas relações água/cimento (A/C), alto consumo de aglomerantes e geralmente é utilizado cimento mais fino.

A combinação destes elementos confere ao concreto uma redução da sua porosidade, e redução da espessura da zona de transição, proporcionando as características esperadas de um CAA.

Porém algumas características do CAA merecem ser analisadas de maneira mais cuidadosa, como é o caso da retração autógena que, pelo fato dos poros da matriz cimentícia possuir diâmetros menores que em concretos convencionais, isso por sua vez ocasiona um aumento nas tensões a que estão suscetíveis com o decréscimo da sua umidade interna.

A ocorrência deste fenômeno em peças que se encontram restringida pode originar a ruptura do material, fazendo com que perca desempenho estrutural, estético e de durabilidade.

Muito se têm pesquisado na tentativa de minimizar os efeitos da retração nas estruturas, resultando no surgimento de algumas alternativas como, por exemplo, o emprego de aditivos redutores de retração, agregados com partículas porosas desempenhando papel de agente de cura interna. Esta pesquisa visa analisar o comportamento de polímeros superabsorventes nas propriedades do concreto tanto em estado fresco como em estado endurecido.

## 1.2 Justificativa

Como comentado anteriormente, a tensão que os poros da matriz estão suscetíveis pela variação da umidade causam fissuração dos elementos de concreto nas primeiras idades, se tornando uma das maiores limitações. Isso porque, por mais que a matriz apresente grande compacidade, a presença de fissuração faz com que a durabilidade da estrutura diminua. (Neville, 1997).

Evitar o surgimento de fissuras de retração tem sido o grande desafio quando se trabalha com relações A/C muito baixas porque implica em conseguir trabalhar de maneira mais econômica possível para garantir a durabilidade e segurança durante toda sua vida útil.

Embora já se tenha conhecimento de resultados positivos para misturas com a adição de polímeros para a redução da retração autógena, faltam informações no que se refere à influência da adição de polímeros superabsorventes em outras propriedades das misturas à base de cimento, como a resistência mecânica, por exemplo.

Profissionalmente este trabalho tem a importância de complementar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas da graduação, aprofundando no entendimento dos fatores que causadores das deformações de retração e possíveis mecanismos para combater os efeitos resultantes.

Este trabalho está engajado em projetos de pesquisa aprovados pelo professor Wellington Longuini Repette junto ao CNPQ, e pretende contribuir no desenvolvimento de materiais de cura interna, a fim de minimizar os processos de retração que ocorrem, sem prejudicar as demais características do concreto empregado (resistência mecânica, durabilidade).

## 1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo estudar e comparar a influência da utilização de polímero superabsorvente (PSA) e de argila expandida, ambos adicionados como agente de cura interna em argamassas destinadas à produção de concreto autoadensável (CAA), desenvolvendo avaliações complementares a estudos já realizados pelo mesmo grupo de pesquisa.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da eficiência dos polímeros superabsorvente no combate à retração autógena;
- Avaliar os efeitos da utilização dos diferentes teores de adições utilizados;
- Identificar a influência nas propriedades da mistura, tanto em estado fresco como em estado endurecido.
- Identificar limites de teores de adição e relação A/C viáveis para aplicação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Retração – Definição

O fenômeno retração está diretamente ligado deformações em pastas de cimento, argamassas e concreto, sem a existência de qualquer tipo de carregamento. A causa principal da retração é a perda de água da pasta de cimento. (HASPARYK et al, 2005).

Para melhor definir o fenômeno, a retração é uma deformação tridimensional de contração do concreto pela perda de água, normalmente expressa em deformação linear, isso porque a maioria dos elementos de concreto possui uma ou duas dimensões inferiores à terceira, onde os efeitos de retração são mais intensos. (AÏTCIN ET AL., 1997)

Em materiais cimentícios, a retração está vinculada a dois conceitos de volumes: o volume aparente e o volume absoluto. O volume aparente é aquele obtido sem descontar os vazios internos, definido assim pela forma do elemento. Enquanto isso, o volume absoluto corresponde a apenas o volume de sólidos existente no volume aparente.

Durante o processo de hidratação do cimento ocorre a diminuição do volume absoluto e, quando a mistura é curada ao ar livre, ocorre a diminuição do volume aparente. Neste caso é possível afirmar que a contração do volume absoluto é acompanhada da contração do volume aparente. (KUMM, 2009)

Porém quando o concreto convencional é curado em água, o volume absoluto diminui, mas ocorre o aumento do volume aparente. Isso devido ao crescimento dos sais de etringita e portlandita ou ainda pelo inchamento dos cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que adsorvem a água. Portanto quando o concreto é curado em água, não apresenta contração do seu volume, porém o seu volume absoluto diminui. (AÏTCIN, 1998).

Uma das medidas que pode ser tomada para o combater à retração é a utilização de cimento de retração compensada. A maior parte deste tipo de cimento são misturas de cimento Portland com clínquer expansivos ou aditivos expansores. Os mais utilizados são os que promovem a expansão através da formação controlada da etringita. (REPETTE, 2010).

O objetivo da utilização destes tipos de cimento é contrapor-se à retração ocorrida no concreto, principalmente em casos onde a deformação está restringida, uma vez que poderá acarretar em fissuração

da peça. Esta expansão deve ter início logo após o fim de pega e, ocorrer preferencialmente e até os 7 dias de cura. O momento de início desta expansão possui também extrema importância na eficiência do material, uma vez que se ocorrer muito cedo as tensões serão dissipadas devido a elevada deformabilidade da peça, já se ocorrer intensamente no estado endurecido, poderá ocorrer fissuração e desagregação do concreto (REPETTE,2010).

Essa expansão inicial da mistura deve ocorrer na magnitude necessária para que não haja uma tensão resultante de compressão impostas no concreto provinda da restrição aplicada pela armadura da peça e, se equilibre com as tensões de tração decorrente da retração do concreto. (REPETTE,2010)

A retração pode ser dividida em cinco tipos diferentes, sendo: retração plástica, retração por secagem, retração autógena, retração térmica e retração por carbonatação. Cada um ocorre em idades particulares e apresentam magnitudes distintas, dependendo dos materiais utilizados e suas proporções, além das condições ambientais de exposição.

Desta maneira, para se prevenir a retração, para cada uma existem diferentes maneiras de combate, já que seus mecanismos atuantes também não são os mesmo.

A seguir será descrito os tipos de retração que serão o foco deste trabalho, a retração autógena e retração por secagem, assim como seu mecanismo de ação e métodos de prevenção.

### **2.1.1 Retração autógena**

O termo “autógeno” significa a presença de um estado termodinâmico, ou seja, um sistema está sob condições autógenas quando não perde ou ganha massa, não sofre variações térmicas e nem está submetido a forças externas. Portanto, o conceito de retração autógena não está em momento algum relacionado ao tempo de pega do concreto. (KUMM, 2009).

Os termos mais utilizados para descrever os fenômenos autógenos é segundo a classificação de Jensen e Hansen (1996), que classificam de maneira simplificada os termos para a abordagem deste tema. Esses mesmos conceitos serão utilizados neste trabalho.

**Deformação autógena:** deformação volumétrica da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico;

**Retração química:** consiste na redução do volume interno associada à hidratação do cimento Portland. O fenômeno se dá devido ao

fato de que os produtos do cimento hidratado têm volume inferior ao do cimento anidro adicionado à água que com ele reage.

**Retração por auto-secagem:** retração volumétrica da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico, causada pela retração química;

**Mudança autógena de umidade relativa:** mudança da UR (umidade relativa) interna da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico;

**Auto-secagem:** diminuição da UR interna da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico, causada pela retração química.

A remoção da água dos poros maiores não apresenta influência sobre o fenômeno autógeno. Essa é a razão deste fenômeno ser desprezado em concretos e argamassas convencionais, onde os poros não são muito refinados. Porém é nocivo para concretos de auto-desempenho. ( $A/C < 0,45$  e adições de sílica ativa).

A retração autógena é de difícil controle, apesar de sua ocorrência ser considerada pouco expressiva. Ainda não existe um consenso no meio científico quanto a um método capaz de reduzir o efeito deste fenômeno, apesar de muitos autores defenderem que o simples fato de aplicar a cura úmida de maneira correta já resolveria. (DINIZ et al, 2011).

Os fatores que influenciam no fenômeno da retração autógena são relação A/C, composição do cimento, teor de sílica ativa, finura do cimento, teor de agregado e temperatura de exposição.

### 2.1.2 Retração por secagem

A retração por secagem está associada à perda de água adsorvida pela mistura para o ambiente, tornando-a assim uma das principais causas de fissuração. (DINIZ et al, 2011).

Assim, será tanto mais acentuada quanto maior for a perda de água que estes sofrem, como consequência de um ambiente mais ou menos seco. (HASPARYK, 2005).

Para entender melhor os mecanismos de ocorrência da retração por secagem, é necessário o entendimento dos diversos tipos de água existentes na mistura. Esta classificação da água está diretamente relacionada ao grau de dificuldade com que ela pode ser removida (METHA et MONTEIRO, 2008).

A água presente nos macro poros pode ser tida como água livre, pois não causa variação de volume quando é retirada, enquanto a água contida nos capilares pequenos (5 – 50nm) pode ocasionar retração do

sistema. A retirada da água livre não traz danos ao material, mas a remoção da água retida por tensão capilar pode gerar retração.

A água adsorvida está fisicamente presa à superfície do sólido, devido à influência de forças de atração que, quando rompidas, ocasionam a retração da pasta por secagem. A água adsorvida da pasta pode ser perdida facilmente, por secagem da pasta a UR igual ou inferior a 30%, e é o principal fator responsável pela retração por secagem. (METHA e MONTEIRO, 2008).

A retração por secagem difere da retração plástica por ocorrer após o fim da pega. Também consiste na perda de água por evaporação, em ambientes cuja UR é inferior a 100%.

Os fatores influentes na ocorrência da retração autógena é a diferença de módulo de elasticidade entre a pasta e os agregados; a quantidade e a dimensão dos agregados utilizados, sendo que quanto maior, menor será a deformação por retração; o consumo de cimento e de água na mistura; a utilização de adições booleanas e escórias de alto forno; utilização de aditivos superplastificantes e a espessura da peça concretada.

O procedimento de cura eficiente, no combate à retração por secagem, não precisa contemplar o suprimento de água para ser absorvida pelo material, mas simplesmente deve impedir a perda de água da superfície do mesmo.

## **2.2 Influências dos materiais nos diferentes tipos de retração**

### **2.2.1 Cimento e adições**

Dos materiais que compõe a mistura, o cimento é o que mais exige cuidado, isso porque é o responsável pela liberação de calor provinda de sua hidratação e conseqüentemente, possui grande influência na retração autógena.

Portanto a escolha por baixo consumo de cimento é vantajoso não apenas quanto ao custo com o material, mas também da prevenção de fissuras.

Além do consumo de cimento, é de grande importância estar atento a respeito da sua finura, uma vez que ocorre o refinamento dos poros proporcionados pela finura apresentada pelo cimento. (BENZ et al, 2001).

Alguns compostos minerais que compõem o cimento têm maior influência na magnitude da retração autógena, importando não somente os seus teores, mas também o grau de hidratação dos mesmos.

Enquanto a maior quantidade e maior grau de hidratação dos compostos  $C_3A$  e  $C_4AF$  contribuem para altos valores de retração, os compostos  $C_3S$  e  $C_2S$  aparentemente não apresentam contribuição significativa.

Estes fatos, verificados experimentalmente por Tazawa e Miyazawa (1994) e Jensen (2000) vão ao encontro da modelagem proposta por Paulini (1992), que demonstra como composição química do cimento afeta consideravelmente a retração autógena nas primeiras idades, por estar diretamente relacionada à retração química.

Gleize et al. (2006) estudaram especificamente os efeitos do metacaolim na retração autógena de pastas de cimento. Os resultados do estudo identificaram um decréscimo da retração autógena a longo-prazo quando da substituição de parte do cimento por metacaolim. Os autores atribuem grande parte desta redução à atividade pozolânica do metacaolim.

Onghero, et al (2012) estudaram os efeitos da utilização de polímeros superabsorventes (PSA) com diferentes tamanhos de grãos para grãos para o combate à retração de argamassas destinadas à produção de concreto-autoadensável, onde as diversas granulometrias apresentaram boa eficiência ao combate da retração.

Tazawa e Miyazawa (1994) testaram também a substituição parcial de cimento por metacaolim e por sílica em pó, revestidos com hidrofugante. Ambas as substituições reduziram a retração autógena.

Este efeito pode ser atribuído ao aumento do ângulo de contato entre a fase sólida e a água contida nos poros da pasta de cimento, o que reduz a pressão negativa nos poros.

### **2.2.2 Agregado**

O tamanho e a granulometria dos agregados não apresenta influencia na magnitude da retração, mas misturas com agregados de diâmetros maiores resultam traços mais pobres de cimento, diminuindo assim a retração gerada. (NEVILLE, 1997)

A utilização de agregados com maiores teores de finos resulta em misturas com poros mais refinados, influenciando nos fenômenos de retração. A forma e distribuição granulométrica dos agregados estão diretamente associadas ao empacotamento, e ao volume de vazios incorporados à mistura. Além disso, deve ser considerada a umidade e a capacidade de absorção do agregado.

Dentre todos os fatores que influenciam no fenômeno da retração, o agregado é o de maior expressão. Isso porque a quantidade de agregado

determina o volume de pasta que a mistura apresenta, restringindo assim a quantidade de retração.

Assim evidencia-se que o emprego de agregados leves proporciona a dosagem de concretos e argamassas mais leves, e ainda, quando saturados em água anteriormente à sua aplicação atuam como agentes de cura interna. (MOHR et al., 2006).

Contudo, corpos de menor densidade do que o fluido no qual estão imersos tende a flutuar. Por isso a utilização de agregados leve exige maior cuidado quanto à viscosidade da mistura, principalmente se os mesmos não forem previamente saturados.

### **2.2.3 Aditivos Superplastificantes**

Geralmente utilizados com o intuito de aumentar a resistência do concreto, permite uma redução da quantidade de água da mistura, proporcionando maior trabalhabilidade com relações água/cimento baixas.

Segundo Ramachandran e Malhotra (1984), segregação e exsudação são consequências comumente observadas nos concretos fluídos com superplastificantes. Para combater os fenômenos, os autores afirmam que um teor mínimo de finos é necessário à mistura.

Metha e Monteiro (1994) afirmam que o emprego de aditivos superplastificantes, por causar uma melhor distribuição das partículas constituintes da massa, resulta no maior refinamento dos poros. Assim, espera-se que o seu emprego conduza a maiores valores de retração.

## **2.3 Modelo de Powers**

O modelo publicado por Powers-Brownyard em 1948 é considerado um dos poucos capazes de explicar as propriedades físicas da pasta endurecida e o único modelo através do qual se pode determinar quantitativamente a sua composição volumétrica (HANSEN, 1986; TAYLOR, 1990, JENSEN, 2005).

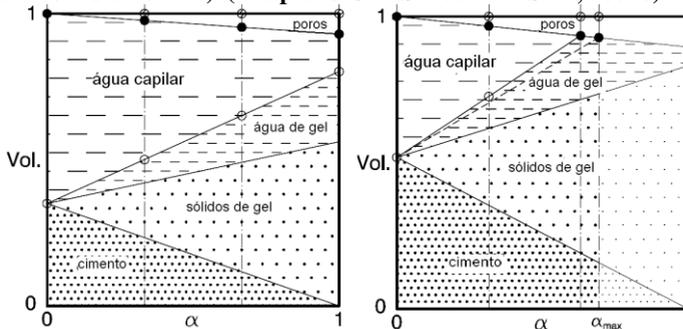
O modelo de Powers foi desenvolvido com o propósito de determinar o volume relativo das fases que compõem a pasta de cimento hidratada considerando a UR de 100%, e a descrição das fases são dadas da seguinte maneira: a água capilar, água de gel, sólidos de gel, cimento anidro, e a redução de volume pela retração química.

O modelo tem como parâmetros resultantes da hidratação completa de 1g de cimento:

- A água não evaporável corresponde a aproximadamente 0,23g /g de cimento hidratado;
- A água de gel corresponde a aproximadamente 0,19g/ g de cimento hidratado, e;
- A retração química gera uma redução do volume da pasta de cimento de aproximadamente 6,4 ml para cada 100 g de cimento hidratado.

De acordo com o modelo, a hidratação completa ocorre apenas quando a relação  $a/c$  é igual ou superior a 0,42. Desta maneira, para relações  $a/c$  inferiores a este valor não é possível obter um grau de hidratação de 100% ( $\alpha=1$ ). As relações volumétricas calculadas pelo modelo de Powers, para uma relação  $a/c$  superior 0,42, em sistema sem perda de massa, estão explícitas na Figura 1, onde pode ser observado na esquerda para uma relação  $a/c$  de 0,60: dada a alta relação  $a/c$  ( $>0,42$ ), a completa hidratação do cimento ( $\alpha=1$ ) pode ser teoricamente obtida. Na direita para uma relação  $a/c$  de 0,30: dada a baixa relação  $a/c$  ( $<0,42$ ), a completa hidratação do cimento ( $\alpha=1$ ) não é possível, estando limitada a um grau máximo de hidratação ( $\alpha_{\max}$ ).

**Figura 1 - Distribuição volumétrica de fases da pasta de cimento em função do grau de hidratação ( $\alpha$ ), em sistema fechado (livre de troca de umidade com o ambiente). (Adaptado: JENSEN e HANSEN, 2001b).**



As relações volumétricas expostas na Figura 1 quantificam de maneira satisfatória a demanda de água na pasta de cimento, sendo que na parte à direita pode ser observado que o grau máximo de hidratação ( $\alpha=1$ ) é alcançado e ainda resta um excesso de água não combinada nos capilares.

## **2.4 Ensaios para retração**

A medida da retração pode ser tomada de duas maneiras fundamentalmente distintas: medindo-se a retração linear ou medindo-se a retração volumétrica. Ambos os métodos têm suas vantagens e desvantagens.

As medidas de retração plástica e de retração por secagem são geralmente realizadas em prismas, como proposto pela ASTM C157 (2004). Os corpos de prova prismáticos são moldados em fôrmas metálicas de alta rigidez, e postos em contato com transdutores de deslocamento.

Normalmente são medidos apenas os deslocamentos axiais, sendo recomendado também realizar o acompanhamento da face superior do prisma, a fim de realizar o acompanhamento de abatimento das amostras.

Para a medição da retração autógena nestes aparatos, é necessário que os mesmos estejam previamente preparados a fim de garantir as condições necessárias. Para idades mais avançadas de hidratação, estas medições podem ser realizadas no quadro de retração, sugerido pela ASTM C157 (2004).

A medida volumétrica da retração autógena é realizada geralmente através de balões de borracha suficientemente resistentes preenchidos com pasta de cimento fresca e imersos em meio líquido. A partir daí, a medida de retração autógena é feita pela variação de nível do líquido onde o balão está imerso.

Sant et al. (2005) compararam quatro diferentes tipos de ensaios de retração e atentam para a interpretação criteriosa dos dados obtidos através do método ASTM C157 (2004) quando aplicado em misturas de baixa relação a/c. Isso porque uma análise pouco cuidadosa dos dados diminui a curacidade das retrações destes materiais.

## **2.5 Formas de combate à retração autógena e por secagem**

Atualmente existem várias formas disponíveis para o combate à retração, dentre estas é possível citar:

- cimentos expansivos; a citar os tipos K, M e S (designados pela ASTM C 845) que, pela formação de etringita, provocam a expansão da pasta, como mencionado anteriormente.
- aditivos expansivos: A maioria dos aditivos compensadores existentes no mercado são à base de cal ou de sulfoaluminato de cálcio

(CSA). O seu uso permite maior flexibilidade nas composições e reduções de custo. (MAILVAGANAM,1997, *apud* REPETTE,2010).

Os CSA's apresentam melhores desempenhos, pois resultam em expansão suficiente para compensar a variação volumétrica causada pela retração (NAGATAMI &GOMI *apud*REPETTE,2011).

Os aditivos à base de cálcio possuem aplicação limitada por ser suscetível à degradação durante a estocagem e por promover expansão rápida e de difícil controle. (REPETTE,2010).

- aditivos redutores de retração (ARR): são aditivos de base glicol, que atuam diminuindo a tensão superficial da água, resultando na diminuição da tensão capilar no interior do concreto. O ARR é encontrado em estado líquido e facilmente adicionado no concreto (REPETTE, 2011);

- aditivos compensadores de retração: são aditivos de base CSA, que promovem a formação de etringita (REPETTE, 1999);

- precauções na composição da mistura: maiores teores de agregado graúdo e maior relação *a/c*, por exemplo, são favoráveis à menor incidência de retração;

- incorporação de fibras à mistura: de natureza metálica ou polimérica, as fibras dispersas na mistura contribuem para o combate à retração (GRZYBOWSKI et SHAH, 1990;RAZAVI-NOURI et MORSHEDIAN, 1995);

- cura: consiste em proporcionar umidade e temperatura adequadas, de modo a prevenir a perda de umidade da pasta.

- Promoção de cura interna: cura promovida por material “incorporador de água” que são incorporados na mistura. Geralmente são partículas de pequenas dimensões que armazenam grande quantidade de água e possuem a capacidade de liberá-la durante a hidratação do cimento. Características que são encontradas em agregados leves e polímeros superabsorventes (REPETTE, 2011).

### **2.5.1 Cura**

Para garantir que o concreto ou argamassa desenvolva as características físicas esperadas quando em estado endurecido, entre elas é possível destacar a resistência mecânica e durabilidade, é necessário promover condições de temperatura e umidade ao material, principalmente nas primeiras idades.

O procedimento de cura tem como finalidade potencializar a hidratação do cimento e reduzir os efeitos de retração. A execução deste processo nem sempre é fácil, pois pode resultar muitos problemas dentro

do canteiro de obra e demanda de várias horas de trabalho ao longo dos dias.

O início de cura deve acontecer logo após a moldagem. Caso ocorra tardiamente não irá suprir a falta de cura nos primeiros momentos após a moldagem, diminuindo o desempenho do concreto.

Os efeitos de retração podem ser diminuídos drasticamente quando é executada uma cura devidamente apropriada. Por outro lado, caso não se realiza nenhum tipo de cura, as implicações para o concreto podem ser catastróficas (AÏTCIN, 1998)

A superfície do elemento de concreto é a mais afetada pela cura inapropriada e, é desta área exposta que se espera o melhor desempenho: resistência ao desgaste, boa aparência, baixa permeabilidade, entre outras.

Portanto, uma boa cura contempla o controle da temperatura e da umidade interna do material cimentício. Quando a temperatura é muito baixa, as reações de hidratação são prejudicadas, enquanto com temperaturas muito elevadas podem prejudicar a resistência mecânica.

Especialmente os concretos e argamassas de alta resistência têm suas características influenciadas pela cura, por não disporem em sua composição da quantidade mínima de água necessária para a total hidratação.

A cura do concreto pode ser classificada em dois tipos principais (cura externa e cura interna), e as subdivide em mais quatro tipos, a cura externa é classificada em cura úmida ou com película, quanto a cura interna se classifica em interna com água e selagem interna.

### **2.5.1.1 Cura Externa**

A cura externa é aquela tradicionalmente realizada nos canteiros de obras, aplicada em todos os tipos de concreto. Em geral, pode ser subdividida em dois grupos:

- cura externa com água: consiste na aplicação de água ou vapor na superfície do concreto. Ex.: lâmina d'água, água borrifada ou vaporizada e mantas (sacos de aniagem, camada de areia, etc.) saturadas;
- cura externa com película seladora: consiste na aplicação de coberturas impermeáveis sobre a superfície do concreto. Ex.: papel impermeável, filmes plásticos e membranas de cura.

As membranas mais utilizadas são formuladas a partir de resinas epóxi, ceras, poliuretano, ou borracha sintética dissolvidas em solvente volátil ou emulsificadas em água (ALMUSALLAM et al, 2002).

### 2.5.1.2 Cura Interna

A cura interna consiste em adicionar, durante a mistura, materiais que atuarão como agentes de cura por tempo indeterminado. Este agente de cura interna pode ser, por exemplo, um agregado leve em condições especiais de umidade, ou ainda um componente extra à composição do concreto, como os polímeros superabsorventes (PSA).

A cura interna também pode ser subdividida em duas categorias:

- cura interna com água incorporada: na qual o agente de cura atua como um reservatório de água, que aos poucos é liberada.

Uma mistura cimentícia submetida à cura interna com água incorporada tem, no seu estado fresco, cavidades preenchidas de água que atuam contra a auto-dissecação. Durante a hidratação, tais inclusões com a água incorporada são esvaziadas, remanescendo por fim macro poros preenchidos com ar.

Como a presença de poros influencia negativamente as propriedades do concreto, deve ser incorporada apenas a quantidade de água necessária para impedir a auto-dissecação, que pode ser estimada pelo modelo de Powers (JENSEN e HANSEN,2001).

- cura interna com agentes seladores (do inglês “*internalsealing*”): quando o agente de cura atua na prevenção ou no retardo da perda de água. Este tipo de aditivo é composto de polímeros solúveis que, quando dispersos na mistura de concreto, ligam-se á água por pontes de hidrogênio, formando um filme impermeável que reduz a taxa de evaporação pela superfície exposta (BASF, 2007). Há indícios de que estes aditivos alterem a morfologia do gel de C-S-H, reduzindo a permeabilidade do concreto (RAVINDRA et al., 1996).

Dos métodos de cura interna citada, a cura interna com água incorporada é a que melhor se aplica aos concretos de baixa relação a/c, haja vista que estes não possuem o mínimo necessário de água para promover a plena hidratação de todo o cimento.

Assim, pode-se adicionar uma quantidade extra de água à mistura e prevenir a diminuição da UR interna do sistema (resultante do fenômeno de auto-dissecação), o que não é possível pelo uso de agentes seladores.

Como o agente de cura interna fica disperso no interior do concreto, não há dificuldades de acesso ao interior das peças de baixa permeabilidade, problema este que a cura externa não consegue contornar (KOVLER et JENSEN, 2005).

## 2.5.2 Agregado Leve

Apesar de não possuir uma grande utilização no Brasil, seu uso permite a redução de seções transversais de elementos estruturais, diminuição das fundações devido ao menor peso próprio da estrutura, além de diminuir o peso de material a ser manipulado em obra.

Os agregados leves foram os primeiros materiais a serem utilizados para a incorporação de água no concreto. Para a sua utilização, seus grãos devem estar umedecidos, de preferência saturado, para que assim não absorva a água de amassamento do concreto e não altere suas características no estado fresco (REPETTE,2011);

O tamanho dos grãos do material desejado e de partículas de até 3mm, uma vez que partículas muito pequenas não podem apresentar capacidade de absorção suficiente e partículas maiores tendem a liberar mais lentamente a água para a mistura, além de concentrar-se na superfície da mistura, assim combatendo apenas localizadamente a retração (REPETTE,2011).

A capacidade de absorção de água pelos agregados leves não está diretamente ligado à porosidade do mesmo, isso porque nem todos os poros se encontram acessíveis à água, tornando assim a capacidade de absorção menor que a porosidade do material, que pode chegar a 50%. (REPETTE,2011).

O agregado leve utilizado neste trabalho para promover a cura interna foi a argila expandida, que é resultante do aquecimento de alguns tipos de argila na temperatura em torno de 1200 °C. Nesta temperatura, ocorre o surgimento de uma massa viscosa devido à fusão de parte dos materiais constituintes dos grãos. A outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que fazem com que essa massa viscosa se expande em até 7 vezes seu volume inicial. (Moravia *et al*, 2006).

O formato dos grãos e o aspecto dependem diretamente do processo pelo qual o material passa para ser produzido.

Quando produzidos através do uso de fornos rotativos, resultam em grãos mais arredondados o que é benéfico para a aplicação em concretos, uma vez que grãos lamelares demandam uma quantidade maior de água na mistura para a obtenção de uma mesma trabalhabilidade (NETO,2011).

Devido a estrutura alveolar de seus grãos resultantes dos gases aprisionados durante o processo de produção, a argila expandida apresenta sua massa específica em torno de 550 Kg/m<sup>3</sup>, o que a torna leve e influencia as demais propriedades do concreto, principalmente a resistência à compressão.

A presença desses vazios nos grãos do agregado, podem ser explorados de maneira benéfica, uma vez que a absorção do agregado gira em torno de 18%, assim servindo como agente de cura interna para a mistura.

### **2.5.3 Polímeros superabsorventes**

A utilização de PSA surgiu como componente de absorventes higiênicos sendo rapidamente disseminado no mercado, onde seu consumo cresceu rapidamente, ainda sendo a principal utilização em produtos higiênicos.

Quanto à sua composição química, os PSA's são reticulados polieletrólitos que começam a inchar em contato com água ou soluções aquosas (FRIEDRICH, 2012).

Os PSA's são baseados em poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas, ou poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados (TRAMFLOC, 2007).

O líquido absorvido pelo polímero não é liberado sob ação de pressão moderada, mas sim conforme a umidade relativa do ambiente em que se encontra. Diversos mecanismos estão envolvidos na transição da fase seca para a saturada.

Essa transição é resultado de um balanço das forças repulsivas que atuam expandindo a rede polimérica, e forças atrativas que agem encolhendo a rede. O interior do PSA possui uma alta concentração de íons, que induzem a entrada da água para seu interior por osmose.

Outro fator que contribui para o inchamento é a solução de grupos hidrofílicos na água, presentes ao longo de toda a cadeia polimérica. Ao mesmo tempo, a energia elástica das moléculas se opõe ao inchamento. A salinidade da solução aquosa tem uma importância especial para os PSA's, já que quando a concentração de íons fora do polímero aumenta a pressão osmótica dentro do gel diminui, reduzindo a capacidade de inchamento (JENSEN et HANSEN, 2001b).

Em tese, os PSA's utilizados para este fim podem absorver uma quantidade de água de até 1500 vezes o seu próprio peso seco, mas em soluções com grandes quantidades de íons dissolvidos (como no caso do concreto) a capacidade de absorção limita-se a aproximadamente 20 vezes. Para o concreto, praticamente toda a água absorvida pelo PSA pode ser considerada como quimicamente disponível para reagir com o cimento (KOVLER et JENSEN, 2005).

Comumente as dimensões dos grãos de PSA utilizados para cura interna estão entre 125 e 250  $\mu\text{m}$  no estado seco, e crescem

aproximadamente 3 vezes quando saturados. Pesquisas indicam que há uma faixa ideal de tamanho de partículas de PSA, aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  no estado seco, para que tenham eficiência otimizada no combate à retração (Lura et al., 2006).

Quando as partículas são maiores, estas podem não suprir todas as partes da pasta de cimento com água durante a hidratação. Partículas grandes podem também ter uma eficiência reduzida pela falta de tempo suficiente para sua plena saturação durante a mistura.

Em contrapartida, partículas extremamente pequenas podem ser também pouco eficientes pelo efeito de absorção de produtos de hidratação do cimento, ou pela menor atividade da superfície do polímero (JENSEN et HANSEN 2002). A distribuição granulométrica dos grãos de PSA influi ainda na reologia do material cimentício.

A utilização de PSA's para cura interna aumenta a porosidade final da pasta, o que comumente diminuiria a resistência e durabilidade do concreto. Este aumento de porosidade pode ser estimado pela modelagem de Powers.

Porém, a natureza desta porosidade é significativamente modificada pela adição do PSA: os poros vazios, gerados pela auto-secagem numa pasta de cimento sem inclusão de PSA, são irregulares e parcialmente conectados. Ao contrário, os poros vazios gerados em uma pasta modificada pela inclusão de partículas de PSA serão, em sua maioria, esféricos desconectados e de forma definida. Deste modo, espera-se que a durabilidade seja superior nas misturas com PSA.

## **2.6 Aplicação do modelo de Powers a amostras submetidas à cura interna por incorporação de água**

Jensen e Hansen, pesquisadores que em muito contribuem para os estudos da cura interna com incorporação de água, desenvolveram as equações propostas por Powers e Brownyard chegando às equações que possibilitam estimar a quantidade de água necessária de ser incorporada, para prevenção da auto-dissecação. Em resumo, o desenvolvimento das equações segue o princípio de que (JENSEN e HANSEN, 2001b): o volume inicial de água incorporada,  $V_{w,0}$ , deve ser igual à retração química desenvolvida no grau máximo de hidratação do cimento.

Partindo de:

$$\{\alpha = \alpha_{\text{máx.}} \text{ para } V_{\text{GW}} + V_{\text{GS}} + V_{\text{UC}} = 1\} \rightarrow 0,60. (1-p). \alpha_{\text{máx.}} + 1,52. (1-p) \alpha_{\text{máx.}} + (1-p).(1 - \alpha_{\text{máx.}}) = 1$$

Em um sistema aberto, com baixa relação a/c:

$$\alpha_{\max} = \frac{p}{1,1 \cdot (1-p)} \quad \text{Equação 1}$$

$$V_{ew0} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{\max} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$V_{gw}$  = volume de água capilar [m<sup>3</sup>];

$V_{GS}$  = volume de sólidos de gel [m<sup>3</sup>];

$V_{UC}$  = volume de cimento anidro [m<sup>3</sup>];

$V_{ew0}$  = volume de retração química [m<sup>3</sup>];

$p$  = porosidade inicial;<sup>1</sup>

Utilizando a relação água/cimento [g de água/ g de cimento], a água incorporada (a/c)<sub>i</sub>, (Eq. 3), e a água/cimento inicial (a/c), (Eq.4), podem ser expressas das seguintes maneiras:

$$(a/c)_i = \frac{V_{ew0} \cdot \rho_w}{V_{co} \cdot \rho_c} \quad \text{Equação 3}$$

$$(a/c) = \frac{V_{cwo} \cdot \rho_w}{V_{co} \cdot \rho_c} \quad \text{Equação 4}$$

Assim sendo, pela (Eq. 3) e (Eq. 4), a quantidade de água necessária para alcançar  $\alpha_{\max} = \frac{p}{1,1 \cdot (1-p)}$  é:

$$(a/c)_i = 0,18 \cdot (a/c) \text{ para } (a/c) \leq 0,36 \quad \text{Equação 5}$$

A (Eq. 5) só é relevante para  $(a/c) \leq 0,36$ , acima desta relação a/c, a hidratação completa pode ser alcançada com menor quantidade de água incorporada do que a sugerida pela (Eq. 5). Segundo o modelo de Powers, o grau máximo de hidratação,  $\alpha_{\max}$ , é possível na faixa de  $0,36 \leq (a/c) \leq 0,42$  se  $(a/c)_i + (a/c) = 0,42$  então:

$$(a/c)_i = 0,42 - (a/c) \quad \text{Equação 6}$$

---

<sup>1</sup>  $p = \frac{a/c}{\frac{a}{c} + (\rho_{\text{água}} / \rho_{\text{cimento}})}$

Onde: a/c é a relação água/cimento [kg/kg];  $\rho_{\text{cimento}}$  = Massa específica do cimento [Kg/m<sup>3</sup>] e  $\rho_{\text{água}}$  = Massa específica da água [Kg/m<sup>3</sup>];

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

---

Para este trabalho, foi padronizado um procedimento experimental conforme será descrito a seguir. O estudo foi realizado nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e Laboratório de Nanotecnologia (NANOTEC) – ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Visando minimizar as variáveis envolvidas no presente estudo, tomou-se como parâmetros:

- Materiais: coletados de uma única vez, diminuindo as chances de grandes variações;
- Caracterização dos materiais;
- Estocagem do material em devidas condições;
- Composição das argamassas: argamassas com baixa relação água/aglomerante e baixo teor de agregado miúdo;
- Teores de PSA: pré-definidos e fixos em relação à massa de cimento;
- Características do PSA: sempre utilizado o mesmo, sendo o que obteve melhor desempenho nos estudos realizados anteriormente;
- Formas de incorporação do PSA: seco;
- Momento de incorporação do PSA: após utilização do aditivo superplastificante em teor de saturação da mistura;
- Temperatura: fixa em  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , utilizando a sala climatizada do Laboratório de Materiais de Construção Civil para fazer todas as misturas;
- Tipo de misturador: argamassadeira disponível na sala climatizada;
- Argila expandida: utilizada em substituição em relação ao volume de agregado miúdo da mistura, em condições saturadas e com a superfície seca.

Objetivando pesquisar o comportamento das misturas, avaliaram-se aspectos como em estado fresco e influências na retração e resistência das argamassas compostas por cimento CP V ARI RS, areia natural, areia de britagem e PSA ou Argila expandida.

No presente trabalho buscaram-se misturas autoadensáveis, uma vez que a utilização deste tipo de concreto vem aumentada pelos diversos benefícios proporcionados. Porém a demanda de grande

quantidade de finos resulta no refinamento dos poros, aumentando o efeito de retração das misturas.

Para a dosagem da mistura foi seguido o método Repette-Mello, uma vez que as características em estado fresco possuem faixas padronizadas. Utilizou-se de aditivos superplastificantes de ultima geração à base de policarboxilato para a obtenção destes valores.

Foi estudada a influência de cada adição na retração autógena, desde os primeiros instantes da hidratação até os 7 dias, e após esse período, foi obtidas medidas de retração por secagem.

Além disso, foi realizado ensaio para caracterizar as propriedades mecânicas de resistência à compressão e para melhor caracterizar a mistura efetuou-se ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial.

### **3.1 Materiais utilizados**

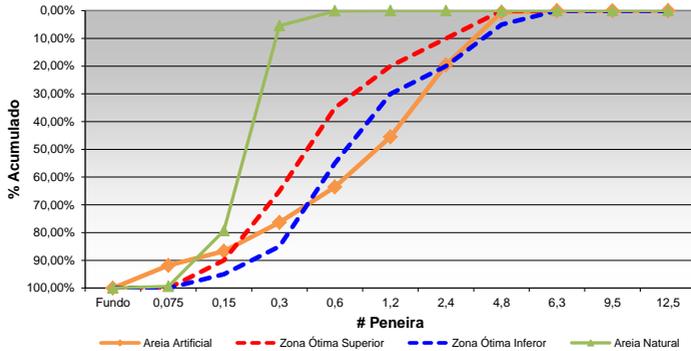
As diferentes argamassas foram confeccionadas com Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - Resistente a Sulfatos (CP V - ARI RS) fornecidos pela Central de Distribuição da Votoran, em Biguaçu/SC, com massa específica de  $2,97\text{g/cm}^3$ .

Foram agregados miúdos existentes na região, sendo composta em 40% de areia natural de duna, com massa específica de  $2,642\text{g/cm}^3$  e módulo de finura de 0,849. Nos outros 60% do volume de agregado, utilizou-se de areia de britagem de origem granítica, e sua massa específica encontrada foi de  $2,645\text{g/cm}^3$  e módulo de finura de 2,922. As curvas granulométricas destes materiais podem ser observadas na Figura 2.

Como agente de cura interna foi utilizado o PSA fornecido pela empresa Basf, onde o ensaio de granulometria realizado em granulômetro a laser do laboratório de Nanotecnologia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) apresenta que 59% das partículas possuem diâmetro entre  $300\ \mu\text{m}$  e  $150\ \mu\text{m}$ .

A argila expandida utilizada passou por um processo de moagem, pois, segundo a literatura seguida, para melhor desempenho da cura interna, os grãos do agregado deveriam estar entre  $4,8\text{mm}$  e  $0,075\text{mm}$ .

**Figura 2 - Curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados no estudo.**



### 3.2 Determinação dos traços e confecção das pastas com PSA.

A primeira parte do plano experimental baseia-se na relação água/cimento de 0,30. Este valor é inferior aos 0,42 designados por Powers como menor água/cimento a partir do qual na haveria retração. Para tal relação, a cura interna com água incorporada necessita de uma relação água/cimento 0,054.

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = 0,18 \cdot \left(\frac{a}{c}\right), \text{ para } (a/c) \leq 0,36 \quad \text{Equação 7}$$

$$(a/c) = 0,18 \cdot (0,30)$$

$$(a/c) = 0,054$$

Sendo assim, a relação água/cimento total seria de  $(0,300 + 0,054) = 0,354$ .

Para as etapas seguintes, foi variada a relação a/c para valores de 0,25, valor menor de 0,36 e, portanto obedece a equação

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = 0,18 \cdot \left(\frac{a}{c}\right), \text{ para } (a/c) \leq 0,36 \quad \text{Equação 7, onde a}$$

quantidade de água incorporada resultaria em um a/c de 0,045.

Já a relação de 0,40 necessita de relação igual a 0,02, já que segundo o modelo seguido, para  $0,36 < A/C \leq 0,42$ , a quantidade de água seria a diferença necessária para que fosse atingida uma relação  $A/C_{\text{final}}$  de 0,42.

Dado o exposto, são admitidas três relações água/cimento a título de referência, 0,25; 0,30 e 0,40.

O teor de PSA utilizado para cura interna não parte do teor médio de polímero que pode ser saturado com a relação água/cimento destinada à cura interna como a maioria dos trabalhos, isso porque a saturação do PSA resultaria em grãos de grandes dimensões e, ao liberar toda a água incorporada, o tamanho do poro resultante é muito grande, tornando-se prejudicial ao desempenho da argamassa. Portanto os teores a serem testados foram de 0,25%; 0,50% e 1,0%.

A escolha do menor teor foi baseado nas diversas pesquisas realizadas neste grupo de pesquisa, já o teor de 1,0% é o máximo recomendado pelo fabricante do material. Então arbitrou-se um teor intermediário para melhor caracterizar a influência dos materiais.

O procedimento de mistura das argamassas com PSA consiste na mistura de todo o material da argamassa, e após adicionar o teor de aditivo de saturação (onde a argamassa passa a segregar), é adicionado o PSA. Foi escolhido para diminuir a demanda de aditivo e mesmo assim garantir uma boa dispersão do PSA na mistura.

A adição de PSA de diferentes maneiras foi testada sendo que, de modo já saturado, prejudicou a dispersão do mesmo na mistura e, ele seco antes do aditivo, a dispersão foi garantida, porém o PSA acabava absorvendo o aditivo, resultando em um consumo muito elevado.

Por fim, o procedimento padronizado para este trabalho foi:

- Procedimento de mistura:
  - a) Dispersão dos materiais secos;
  - b) Com a argamassadeira ligada em velocidade I, colocar toda a água (água de amassamento e água destinada à cura interna) na cuba da argamassadeira ao longo de 2 min;
  - c) Parada por 30 seg. para raspagem;
  - d) Retomada da mistura em velocidade II por 1 min;
  - e) Adição do aditivo até apresentar leve segregação da mistura;
  - f) Nova parada por 30 seg. para raspagem;
  - g) Adição do PSA (seco) com argamassadeira funcionando na velocidade I durante 1 minuto;
  - h) Finalização da mistura em velocidade II por 1 min.

### 3.3 Determinação dos traços e confecção das pastas com argila expandida.

Diferentemente dos traços com utilização de PSA, as misturas às quais foi adicionada argila expandida não seguiu o modelo de Powers para a confecção dos traços finais.

Isso porque se procurou otimizar a adição do agregado leve, ou seja, utilizar a capacidade máxima de absorção que os grãos proporcionam. Assim sendo, a argila expandida foi adicionada na condição saturada com a superfície seca.

Para saber a quantidade de material a ser pesado, foi realizado o ensaio de absorção de uma amostra do material e, a partir do resultado deste ensaio foi calculada a quantidade de matéria que seria pesado e a quantidade final de água que foi colocada na mistura, assim possuindo o traço final. A tabela 1 contém informações sobre as misturas realizadas neste estudo.

**Tabela 1 - Nomenclatura das misturas estudadas com PSA e suas composições.**

| Nome da Mistura | Relação A/C para amassamento | Relação A/C para cura interna | Agente de Cura Interna (%) |
|-----------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| REF 0,25        | 0,25                         | -                             | -                          |
| REF 0,30        | 0,30                         | -                             | -                          |
| REF 0,40        | 0,40                         | -                             | -                          |
| 0,25_0,25 PSA   | 0,25                         | 0,045                         | 0,25                       |
| 0,25_0,5 PSA    | 0,25                         | 0,045                         | 0,50                       |
| 0,25_1,0 PSA    | 0,25                         | 0,045                         | 1,00                       |
| 0,30_0,25 PSA   | 0,30                         | 0,054                         | 0,25                       |
| 0,30_0,5 PSA    | 0,30                         | 0,054                         | 0,50                       |
| 0,30_1,0 PSA    | 0,30                         | 0,054                         | 1,00                       |
| 0,40_0,25 PSA   | 0,40                         | 0,02                          | 0,25                       |
| 0,40_0,5 PSA    | 0,40                         | 0,02                          | 0,50                       |
| 0,40_1,0 PSA    | 0,40                         | 0,02                          | 1,00                       |
| 0,25_5% A.E.    | 0,25                         | 0,019                         | 5                          |
| 0,25_15% A.E.   | 0,25                         | 0,056                         | 15                         |
| 0,25_25% A.E.   | 0,25                         | 0,094                         | 25                         |
| 0,30_5% A.E.    | 0,30                         | 0,020                         | 5                          |
| 0,30_15% A.E.   | 0,30                         | 0,061                         | 15                         |
| 0,30_25% A.E.   | 0,30                         | 0,102                         | 25                         |
| 0,40_5% A.E.    | 0,40                         | 0,024                         | 5                          |
| 0,40_15% A.E.   | 0,40                         | 0,071                         | 15                         |
| 0,40_25% A.E.   | 0,40                         | 0,118                         | 25                         |

Uma vez sabendo as relações a/c a serem testadas, determinou-se o traço, obedecendo ao método de dosagem para concreto autoadensável anteriormente citado.

Optou-se por utilizar o menor percentual de agregado miúdo proposto, uma vez que estaríamos assim trabalhando com a pior condição, ou seja, onde há maior deformação da estrutura causada por retração.

Assim sendo, os traços são constituídos de 35% do volume da argamassa sendo de agregado miúdo, estes sendo ainda compostos conforme citado acima.

Os traços unitários utilizados neste trabalho podem ser observados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Traço unitário das misturas a serem testadas.**

|                      | <b>Cimento</b> | <b>Areia Natural</b> | <b>Areia Artificial</b> | <b>Água de Amassamento</b> | <b>Aditivo (%)</b> | <b>Água cura Interna</b> | <b>Agente de cura interna (%)</b> |
|----------------------|----------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| <b>REF 0,25</b>      | 1              | 0,333                | 0,501                   | 0,25                       | 0,78               | -                        | -                                 |
| <b>REF 0,30</b>      | 1              | 0,361                | 0,544                   | 0,3                        | 0,43               | -                        | -                                 |
| <b>REF 0,40</b>      | 1              | 0,418                | 0,630                   | 0,4                        | 0,15               | -                        | -                                 |
| <b>0,25_0,25 PSA</b> | 1              | 0,333                | 0,501                   | 0,25                       | 1,02               | 0,045                    | 0,25                              |
| <b>0,25_0,5 PSA</b>  | 1              | 0,333                | 0,501                   | 0,25                       | 3,00               | 0,045                    | 0,5                               |
| <b>0,25_1,0 PSA</b>  | 1              | 0,333                | 0,501                   | 0,25                       | 6,50               | 0,045                    | 1,00                              |
| <b>0,30_0,25 PSA</b> | 1              | 0,361                | 0,544                   | 0,3                        | 0,44               | 0,054                    | 0,25                              |
| <b>0,30_0,5 PSA</b>  | 1              | 0,361                | 0,544                   | 0,3                        | 5,4                | 0,054                    | 0,5                               |
| <b>0,30_1,0 PSA</b>  | 1              | 0,361                | 0,544                   | 0,3                        | 8,39               | 0,054                    | 1                                 |
| <b>0,40_0,25 PSA</b> | 1              | 0,418                | 0,630                   | 0,4                        | 0,3                | 0,02                     | 0,25                              |
| <b>0,40_0,5 PSA</b>  | 1              | 0,418                | 0,630                   | 0,4                        | 2,11               | 0,02                     | 0,5                               |
| <b>0,40_1,0 PSA</b>  | 1              | 0,418                | 0,630                   | 0,4                        | 7,04               | 0,02                     | 1                                 |
| <b>0,25_5% A.E.</b>  | 1              | 0,285                | 0,429                   | 0,25                       | 0,62               | 0,019                    | 5                                 |
| <b>0,25_15% A.E.</b> | 1              | 0,190                | 0,286                   | 0,25                       | 0,3                | 0,056                    | 15                                |
| <b>0,25_25% A.E.</b> | 1              | 0,095                | 0,143                   | 0,25                       | 1,01               | 0,094                    | 25                                |
| <b>0,30_5% A.E.</b>  | 1              | 0,310                | 0,466                   | 0,30                       | 0,33               | 0,020                    | 5                                 |
| <b>0,30_15% A.E.</b> | 1              | 0,206                | 0,311                   | 0,30                       | 0,21               | 0,061                    | 15                                |
| <b>0,30_25% A.E.</b> | 1              | 0,103                | 0,155                   | 0,30                       | 0,21               | 0,102                    | 25                                |
| <b>0,40_5% A.E.</b>  | 1              | 0,359                | 0,540                   | 0,40                       | 0,26               | 0,024                    | 5                                 |
| <b>0,40_15% A.E.</b> | 1              | 0,239                | 0,360                   | 0,40                       | 0,08               | 0,071                    | 15                                |
| <b>0,40_25% A.E.</b> | 1              | 0,120                | 0,180                   | 0,40                       |                    | 0,118                    | 25                                |

### 3.4 Caracterização em estado fresco.

#### 3.4.1 Ensaio de massa específica

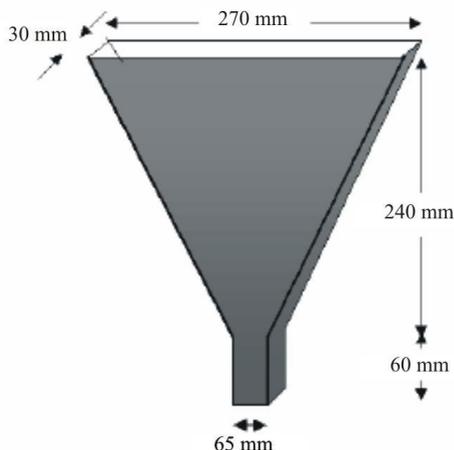
Para a realização do ensaio de massa específica das misturas, foi utilizada como base a norma NBR9833/2009, com exceção dos golpes para adensamento, uma vez que foi trabalhado com misturas auto-adensáveis. Com este ensaio também é possível obter o teor de ar incorporado e o rendimento da amostra.

#### 3.4.2 Ensaio funil “V”

Este ensaio é realizado de acordo com a NBR 15823/2010 e consiste em preencher o funil de seções retangulares com o CAA, e tomando tempo entre abertura da parte inferior até que se consiga ver a luz pela parte superior. Com este ensaio é possível avaliar o comportamento do concreto quanto à sua habilidade de preenchimento e de passar por restrições, além de conseguir relacionar a viscosidade da mistura com o tempo atingido no ensaio.

Segundo Repette (2011), para evitar o efeito de segregação da mistura, o ensaio deve ser executado imediatamente após o preenchimento do funil. O tempo de escoamento da mistura no Funil-V deve ficar entre 3,5 e 10 segundos. O aparato utilizado para a realização deste ensaio pode ser visto na figura 3.

**Figura 3 - Aparato para ensaio de funil "V". (Melo,2005)**



### 3.4.3 Ensaio de espalhamento (Slump-flow)

O ensaio de espalhamento determina a deformabilidade do concreto autoadensável (CAA) sob a ação de seu próprio. O ensaio consiste em medir a abertura da mistura após seu espalhamento e, para sua execução, utiliza-se do cone de Abrams.

O ensaio é de fácil execução, afinal consiste na aquisição dos diâmetros de espalhamento em duas direções perpendiculares, de acordo com o descrito na NBR 15823-2/2010 e, como resultado do ensaio, faz-se a média das duas leituras. De acordo com o método de dosagem utilizado, este valor precisa estar entre 200 e 280 mm.

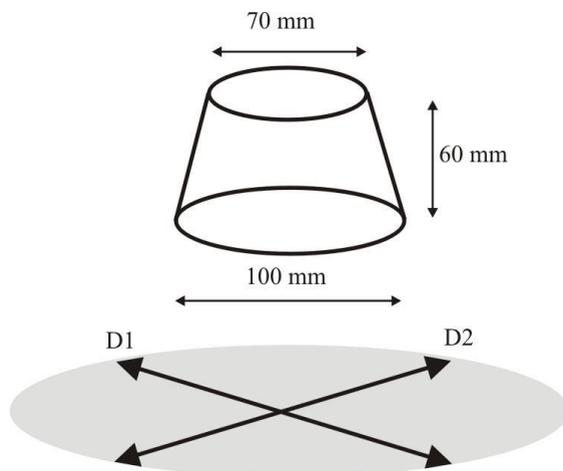
Como complemento deste ensaio, deve-se fazer uma avaliação visual para verificar a ocorrência de segregação e/ou exsudação.

Como este trabalho se realizou em argamassa, foi utilizado um molde com dimensões reduzidas, como pode ser observado na figura 4.

Mesmo que os valores obtidos no ensaio de espalhamento estejam dentro do determinado pelo método seguido, outras informações complementares devem ser adquiridas para auxiliar na avaliação, como:

- Verificar se o agregado graúdo encontra-se bem distribuído na área de espalhamento;
- Verificar se há água livre ao redor da área de espalhamento;
- Verificar se a abertura do concreto espalhado é regular;

Figura 4 - Modelo esquemático do ensaio de espalhamento. (Melo,2005)



### 3.4.4 Retração autógena medida com transdutores de deslocamento

Este ensaio utilizou corpos de prova semelhantes aos descritos na norma norte-americana ASTM C 490-04 (2004). Para cada argamassa preparada foram moldados dois corpos-de-prova prismáticos (25 mm x 25 mm x 275 mm).

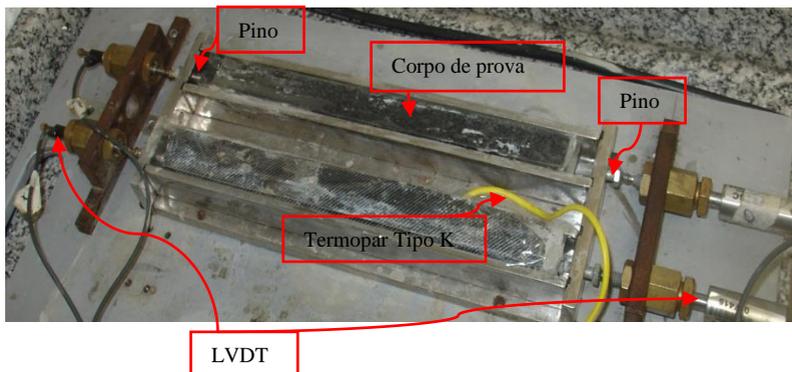
A face superior dos moldes foi selada com fita adesiva plástica imediatamente após a moldagem, para evitar a troca de umidade com o ambiente ao longo dos três dias de ensaio.

Nas extremidades da forma em que são moldados os prismas ficam dispostos dois pinos parafusos diferentes dos descritos pela norma acima citada, com diâmetro inferior ao que atravessa o corpo metálico.

As cabeças dos parafusos permanecem no interior da forma, de modo que estejam ancoradas com o endurecimento da pasta. As pontas externas dos parafusos ficam em contato com os transdutores de deslocamento, sendo um em cada extremidade do aparato, como pode ser observado na figura 5. A distância (interna) entre os pinos é medida, e considerada nos cálculos como a distância livre.

Os corpos-de-prova e equipamentos que compõem a bancada de retração permaneceram em sala climatizada, com temperatura mantida em  $23^{\circ}\text{C}\pm 2$  e a umidade relativa no interior da sala apresentou valor máximo de 48% e mínima de 32% durante o período dos ensaios. As medidas de deformação foram tomadas de maneira automatizada, em intervalos de 20 minutos, por sensores de deformação conectados a um aquisitor de dados.

**Figura 5 - Representação gráfica da bancada de retração.**



A temperatura de um dos corpos-de-prova de cada mistura também foi monitorada. Para isto foi utilizado termopar do tipo K inserido na meia-altura da seção do prisma, ligado ao mesmo aquisitor de dados citado. Os momentos de leitura das temperaturas coincidem com os momentos de leitura dos sensores de deslocamento.

Este parâmetro foi monitorado para que fosse possível descontar-se, da retração medida pelos transdutores de deslocamento, a deformação térmica. Foi admitido que a variação térmica fosse idêntica para ambos os prismas de cada mistura.

Para o cálculo da retração autógena foi utilizada a equação 8, subtraindo-se do resultado a deformação de origem térmica obtida pela equação 9. O coeficiente de dilatação térmica adotado foi de  $16 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

$$\epsilon_{RA} = \epsilon_{medido} - \epsilon_{\theta} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$\epsilon_{RA}$  = deformação por retração autógena (mm/mm x10-6)

$\epsilon_{medido}$  = deformação registrada pelos LVDT's (mm/mm x10-6)

$\epsilon_{\theta}$  = deformação devida variação térmica (mm/mm x10-6)

$$\epsilon_{\theta} = \alpha_t * \Delta t \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$\alpha_t$  = coeficiente de variação térmica da argamassa ( $16 \times 10^{-6}$ )

$\Delta t$  = variação de temperatura na mistura ( $^\circ\text{C}$ )

### 3.4.5 Retração autógena – medida com relógio comparador

A retração foi medida a partir de um dia após a moldagem dos prismas, fazendo leituras diárias nos três primeiros dias. Após este período, as leituras foram realizadas em intervalo de 7 dias, até a idade de 28 dias.

As amostras permaneceram em situação autógena até a idade de 7 dias, uma vez que, pelo tipo de cimento escolhido, nesta idade praticamente toda a reação do cimento com a água já aconteceu, o que por sua vez, daria valores desprezíveis para a retração autógena. Portanto após esse tempo, foram realizadas medições de retração por

secagem. A medida também é realizada no quadro de retração, conforme a norma norte-americana ASTM C490 (2004) (Figuras 6 e 7).

**Figura 6 – Quadro de retração.**



**Figura 7 – Armazenamento de prismas para determinação da retração.**



Este ensaio trata-se de corpos de prova de dimensão 2,5 x 2,5 x 28,5 cm, com um pino metálico padrão em cada uma das extremidades, axialmente centrados. A distância interna entre os pinos é chamada distância livre, e deve ser tomada antes da moldagem dos prismas.

Para cada traço estudado foram moldados 3 prismas. Passadas 24h após a moldagem os corpos de prova eram desmoldados e imediatamente envolvidos em filme plástico e posteriormente em filme de alumínio ou fita adesiva aluminizada.

A utilização de filme plástico entre a superfície dos prismas e o material aluminizado visa reforçar a condição autógena, e impedir reações de expansão pelo contato do cimento com alumínio. A superfície do filme de alumínio por sua vez evita a troca de calor dos corpos de prova com o ambiente externo.

O conjunto, em ideais condições de vedação, isola os prismas do ambiente externo, e impede a perda de umidade para o ambiente. Ao evitar a variação de temperatura, variação de massa, e a aplicação de forças externas sobre os prismas, foram criadas condições para que fossem consideradas autógenas as deformações lineares medidas com relógio comparador.

Por estes motivos, o procedimento descrito foi realizado com muita cautela. Entretanto, apesar de todos os cuidados, não foi possível evitar a perda de massa das amostras. A variação de massa dos prismas foi regularmente medida em balança, com precisão de 0,01g, após cada medida com relógio comparador.

O método utilizado consiste na medida do corpo-de-prova posicionado verticalmente, tendo um relógio medidor em contato com um dos pinos expostos. Foi utilizado o relógio comparador da marca Mitutoyo, modelo Absolute com precisão de 0,001mm. A orientação de cada prisma, ao ser posicionado no quadro de retração, foi mantida em todas as medições. Para isto foi demarcada, em cada corpo-de-prova, uma seta indicando a extremidade do corpo-de-prova que deveria estar voltada para o relógio comparador.

Antes da medição de qualquer corpo-de-prova procedeu-se com a calibração do quadro. Esta aferição é feita com uma barra metálica, cuja dimensão é conhecida. Ao posicionar a barra no quadro esta é rotacionada até que seja encontrada a menor leitura. Neste ponto o relógio é zerado, a calibragem está concluída, e pode-se posicionar o corpo-de-prova para tomar sua medida.

Com o posicionamento do prisma no quadro de medição procede-se a rotação do corpo em seu eixo, de modo que as possíveis excentricidades do mesmo sejam menosprezadas no momento da medição. A menor medida registrada pelo relógio comparador é a leitura considerada. Após cada medição, os prismas foram pesados e recondicionados à posição horizontal sobre roletas.

Para calcular a variação de comprimento dos corpos de prova foi utilizada a equação 10. Como resultado da aplicação da equação 8, têm-se valores expressos em porcentagem. Todavia, é largamente difundida a unidade  $\text{mm/mm} \times 10^{-6}$ , definida por Metha e Monteiro (1994) como microdeformação.

$$L = \frac{(L_x - L_i) \times 100}{G} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

L = retração medida na idade x em %;

$L_x$  = leitura da amostra na idade x realizada no relógio comparador;

$L_i$  = leitura inicial da amostra realizada no quadro de retração;

G = distância livre entre os pinos da amostra;

### 3.4.6 Acompanhamento da variação da temperatura e UR no interior das pastas.

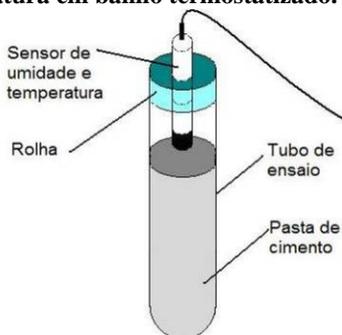
O acompanhamento da evolução da temperatura e da umidade relativa (UR) interna das pastas foi feito com sensores da marca Vaissala, modelo HMP50. Estes equipamentos são capazes de medir umidades relativas de 0 até 98% e temperaturas entre -10 até +60 °C. O erro dos equipamentos é de  $\pm 0,6$  °C e de  $\pm 3\%$  para UR entre 0 e 90% e de  $\pm 5\%$  para UR entre 90 e 98%.

Com a intenção de não danificar os sensores utilizados, o monitoramento foi feito sem que os mesmos entrassem em contato com as pastas de cimento. Imediatamente após o preparo das pastas, estas foram acondicionadas em tubos de ensaio de vidro, com diâmetro interno de 25 mm. Na extremidade dos tubos foi inserida rolha de silicone com furo passante, através do qual o sensor foi embutido.

Para isolar o sistema, todos os contatos entre tubo/rolha/sensor foram vedados com silicone. Desta forma, foi criada uma atmosfera interna de volume muito pequeno, de modo que a presença de ar foi desprezada na análise dos dados (Figura 8 - Tubo de ensaio com amostra submetida ao monitoramento de UR e temperatura em banho termostaticado. (KUMM,2009).). Ao desprezar os efeitos desta atmosfera interna, admitiu-se que a UR estabelecida no espaço entre superfície da amostra e elementos de vedação do tubo seja igual à UR no interior da pasta de cimento.

Para cada mistura foram preenchidos e monitorados 2 tubos de ensaio. Após a moldagem os tubos foram armazenados em banho termostaticado, com água na temperatura de  $22 \pm 2$  °C. Uma placa de isopor de 10 cm de espessura foi utilizada como suporte para os tubos, ao mesmo tempo em que reforçava o isolamento térmico.

**Figura 8 - Tubo de ensaio com amostra submetida ao monitoramento de UR e temperatura em banho termostatzado. (KUMM,2009).**



Os sensores, assim como os equipamentos utilizados na bancada de retração, estiveram conectados ao aquisitor de dados DataTaker DT550. As leituras de temperatura e UR foram feitas a cada 20 minutos, e os dados coletados através do programa DeLogger 4.

Para todas as misturas, concomitantemente à tomada de temperatura das amostras em tubo de ensaio, foi também monitorada a temperatura de um dos prismas selados e submetidos ao ensaio de retração na bancada. No caso do prisma, o monitoramento foi feito com termopar tipo K instalado na altura média da seção do corpo-de-prova. A medida de temperatura dos prismas possibilitou estimar a retração térmica ocorrida nas amostras, e descontá-la da retração medida pela bancada.

### **3.4.7 Resistência à compressão**

Os ensaios de resistência à compressão das argamassas foram realizados com base na Norma Brasileira NBR-7215 (1996), com algumas divergências. Foram moldados ao todo 9 corpos de prova de cada mistura. A contar da data de moldagem, os corpos de prova foram aos 3, 7 e 28 dias, sendo ensaiados 3 elementos em cada idade.

O procedimento de moldagem ocorreu sempre em sala climatizada a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e seguiu o mesmo procedimento para a realização dos prismas. Os corpos de prova são do tipo cilíndrico de  $5 \times 10$  cm. Imediatamente após o procedimento dos moldes, estes foram tapados com placas de vidro e deixados guardados em sala climatizada com a temperatura acima citada durante 24 horas. Após esse período procedeu-

se com a desmoldagem dos elementos, identificação, medição e capeamento dos elementos com pasta de cimento.

Após serem capeados, os cp's pertencentes à mesma mistura foi embalado e vedado em saco plástico com fita adesiva. Os sacos contendo os corpos de prova foram então armazenados em uma caixa de isopor, mantida na sala climatizada.

O equipamento utilizado para ensaiar os elementos à compressão foi uma prensa Shimadzu. A resistência à compressão admitida foi a média, e para facilitar a interpretação dos resultados, estes foram plotados por idades.

### **3.4.8 Evolução de calor**

O ensaio de evolução da temperatura foi utilizado na determinação do valor do pico de temperatura e o tempo que a mesma leva para atingir este pico, assim avaliando a influência da adição do agente de cura na evolução de calor da mistura.

O isolamento do equipamento utilizado no calorímetro tem grande influência nos resultados obtidos neste ensaio. Portanto para a obtenção dos dados, foi utilizado um calorímetro semi-adiabático, constituído de poliestireno expandido, com parede de isolamento de 7 cm.

O ensaio foi realizado em sala climatizada a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , a evolução de temperatura das argamassas foi monitorada com termopares do tipo K ligados a um sistema de aquisição de dados datatacker, o mesmo utilizado no ensaio de bancada de retração.

### **3.4.9 Módulo de Elasticidade**

O módulo de elasticidade é uma característica fundamental dos materiais cimentícios, pois está relacionada à capacidade de deformação sob ação de tensões provenientes de carregamento, de ações térmicas e mesmo do fenômeno da retração. A sua importância, para os materiais à base de cimento, está na sua relação com o fenômeno de fissuração do material.

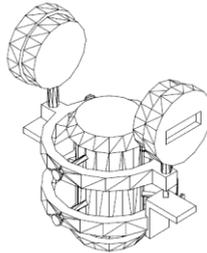
Para que não haja fissuração, espera-se uma combinação favorável de certas condições como: retração mínima, resistência à tração e deformabilidade adequada em cada idade.

Segundo Metha e Monteiro (1994), quanto menor o módulo de elasticidade, menor a tensão de tração elástica induzida para uma dada

magnitude de retração. Assim, o módulo de elasticidade é (junto com a deformação por retração e resistência à tração) mais um fator que pode induzir à fissuração.

No Brasil não há normalização para ensaios de módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos em argamassa submetidos à compressão axial. Porém, há uma norma para determinação desta propriedade em concreto, a NBR 8522 (2003).

**Figura 9 - Aparato utilizado para realização de módulo de elasticidade.**



O método de ensaio utilizado neste trabalho toma esta norma como base, e por ele foram determinados os módulos de elasticidade. Para cada mistura, o ensaio foi realizado em 3 corpos-de-prova, sempre aos 28 dias de idade.

O aparato utilizado para monitoramento das deformações ao longo do carregamento pode ser visualizado na Figura 9. Ele é composto por dois suportes metálicos presos, por três parafusos cada, ao corpo-de-prova. Em um dos suportes são fixados dois relógios comparadores com resolução de  $1\pm 0,001$ mm.

Para a execução do ensaio, são necessários três operadores, um para controlar a aplicação de carga enquanto os outros dois operadores realizam as leituras de deformação quando requisitado.

Com os resultados plotados em um gráfico de tensão x deformação, pode-se determinar o módulo de deformação de cada espécime. Neste trabalho, foi utilizado o Software Microsoft Office Excel como ferramenta de auxílio para determinar o módulo de deformação.

### 3.4.10 Resistividade elétrica aparente superficial

A medição da resistividade elétrica é de grande importância, pois fornece informações extremamente úteis acerca de uma estrutura de concreto, possibilitando comparar materiais com estrutura de poros diferentes ou avaliar a evolução microestrutural no decorrer do tempo de hidratação da mistura.

O resultado obtido neste ensaio está diretamente ligado à probabilidade de corrosão e à taxa de corrosão da armadura em uma estrutura, além de trazer uma relação da taxa de difusão de cloretos.

Abaixo se podem observar algumas aplicações:

- Estimativa da probabilidade de corrosão
- Indicação da taxa de corrosão
- Correlação com permeabilidade de cloreto
- Avaliação no local da eficácia da cura
- Determinação das necessidades por área para sistemas de proteção catódica
- Identificação de áreas úmidas e secas numa estrutura de concreto
- Indicação das variações nas relações de água/cimento numa estrutura de concreto
- Identificação das áreas numa estrutura mais suscetível à penetração de cloreto
- Correlação com a permeabilidade de rocha à água

Para a avaliação deste parâmetro, utilizou-se o Resispod, este produto é produto fabricado pela empresa Proceq. O instrumento é uma sonda Wenner de 4 pontos, regulamentado conforme a AASHTO TP95-11.

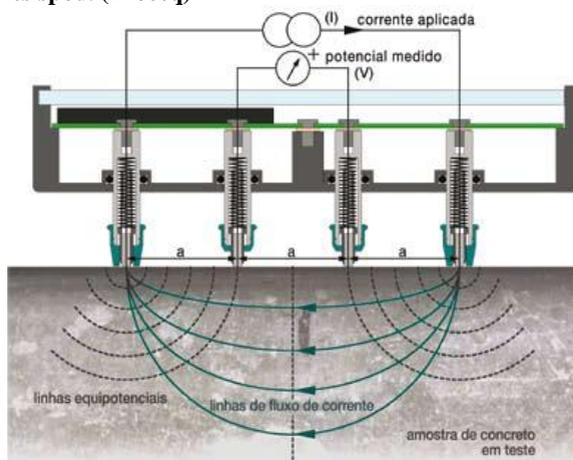
Este ensaio segue a norma ASTM G57, que se baseia na técnica dos quatro eletrodos (de Wenner) uma vez que os dois eletrodos externos emitem uma corrente (I) na superfície e os dois eletrodos internos medem a diferença de potencial induzida (V).

De posse destes valores, é calculada a resistividade elétrica do material através da equação 11.

$$\rho = \frac{2\pi a V}{I}$$

**Equação 11**

**Figura 10 - Ensaio de resistividade elétrica através do uso de sonda Wenner - Resispod. (Proceq)**



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

---

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo de todo o trabalho, seguindo o procedimento experimental adotado.

### **4.1 Resultados dos ensaios em estado fresco**

#### **4.1.1 Ensaio de espalhamento de aditivo**

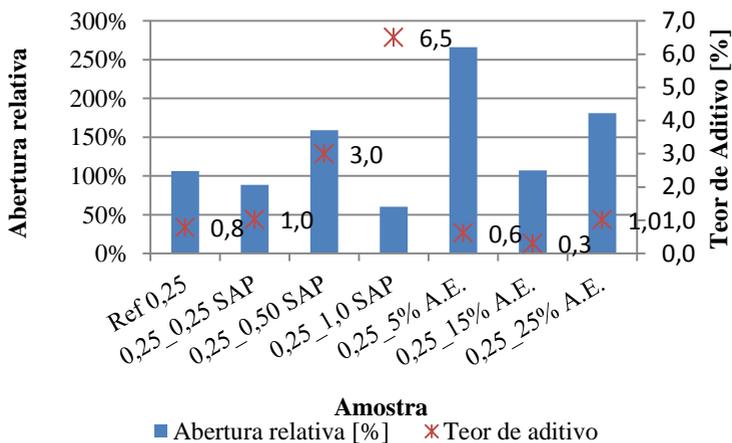
No momento de confecção das misturas, foi realizado ensaio de abertura das misturas na mesa de flow com a intenção de verificar a fluidez da mistura. A abertura mínima requerida era de 200 mm. O teor final de aditivo era colocado para atingir este requisito.

Os resultados foram expressos em percentual, tomando como referência o diâmetro inferior do molde utilizado, que neste caso é de 125 mm.

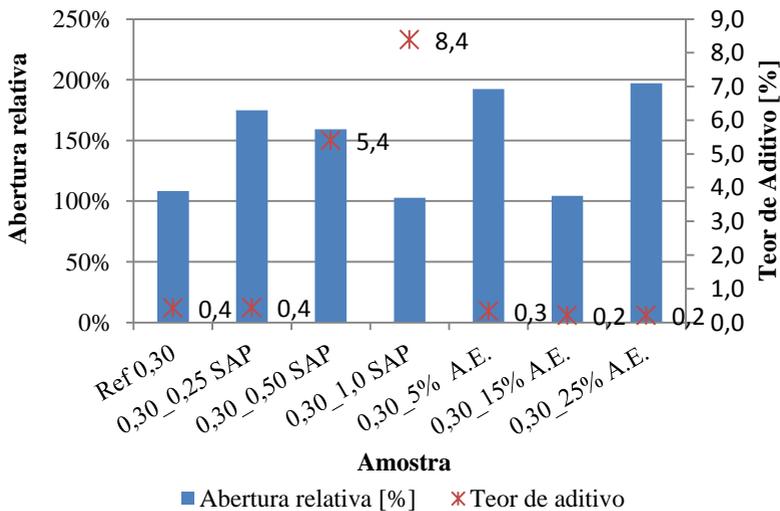
É possível perceber nas figuras 11,12 e 13 que, para obter uma abertura relativa próxima, as misturas com adição de PSA necessitaram de teores de aditivo superiores. Esse aumento do teor de aditivo sobe de acordo com o aumento do teor de adição do polímero.

Para as amostras onde foi utilizado Argila expandida, o teor de aditivo se manteve próximo ao utilizado na amostra de referência, atingindo em algumas situações aberturas maiores. Mostrando assim que houve um decréscimo da viscosidade da mistura pelo fato que o material não consumiu nenhuma quantidade de água destinada ao amassamento da mistura.

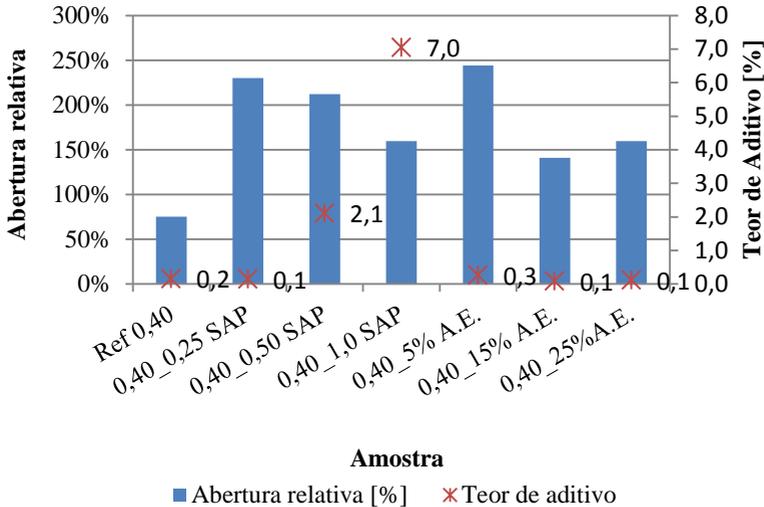
**Figura 11 - Relação entre abertura e teor de aditivo das misturas com relação A/C 0,25**



**Figura 12 - Relação entre abertura e teor de aditivo das misturas com relação A/C 0,30**



**Figura 13 - Relação entre abertura e teor de aditivo das misturas com relação A/C 0,40**



Os resultados aqui apresentados se devem à grande absorção de água pelo grão do polímero, principalmente nos primeiros minutos e, como a quantidade de água destinada para a absorção do polímero não está relacionada ao teor a ser utilizado, ao aumentar o teor de adição, a mistura torna-se mais viscosa, justificando o aumento da demanda de superplastificante.

#### 4.1.2 Ensaio Funil “V” e consumo de aditivo

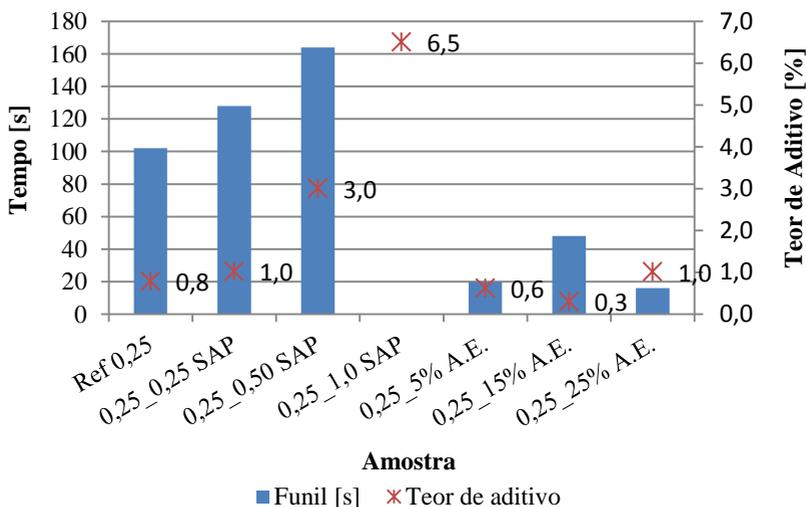
De acordo com as figuras 14, 15 e 16 o efeito percebido no ensaio de espalhamento também é percebido no quando é realizado o ensaio do funil “V”.

As amostras com PSA apresentam viscosidade muito maior do que as amostras com agregado leve, o que pode ser comprovado nos valores obtidos neste ensaio.

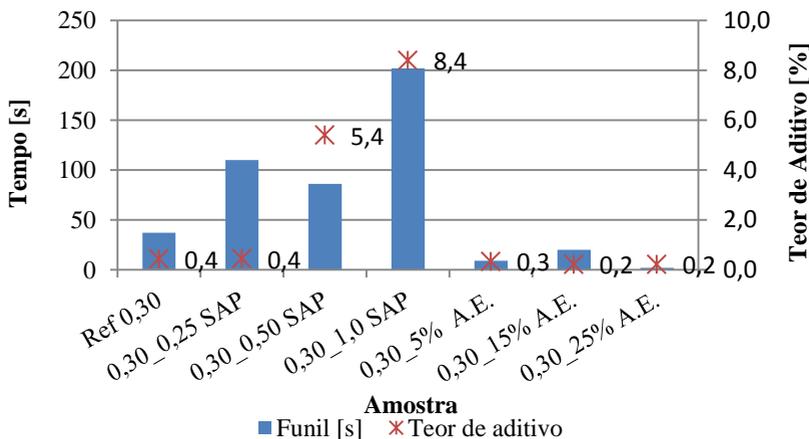
De acordo com os resultados obtidos, quanto maior o teor de adição, maior é o tempo necessário para a amostra passar pelo funil, principalmente na relação a/c 0,25, uma vez que não foi possível realizar o ensaio mesmo com o teor de superplastificante utilizado de 6,5%, o que é considerado um teor elevado.

Isso se deve pela grande absorção de água pelo polímero, já que ao utilizar na argila, ela já está saturada e não absorve a água da mistura, ao contrário do PSA, onde a água de cura interna não faz o polímero saturar, fazendo assim com que o mesmo absorva a água de amassamento.

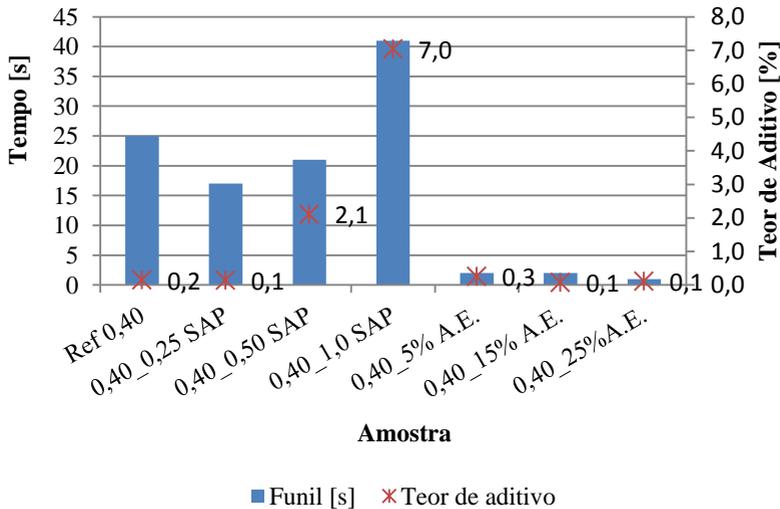
**Figura 14 - Relação entre tempo de funil e teor de aditivo das misturas com relação A/C 0,25**



**Figura 15 - Relação entre tempo de funil e teor de aditivo das misturas com relação A/C 0,30**



**Figura 16 - Relação entre tempo de funil e teor de aditivo das misturas com relação A/C 0,40**

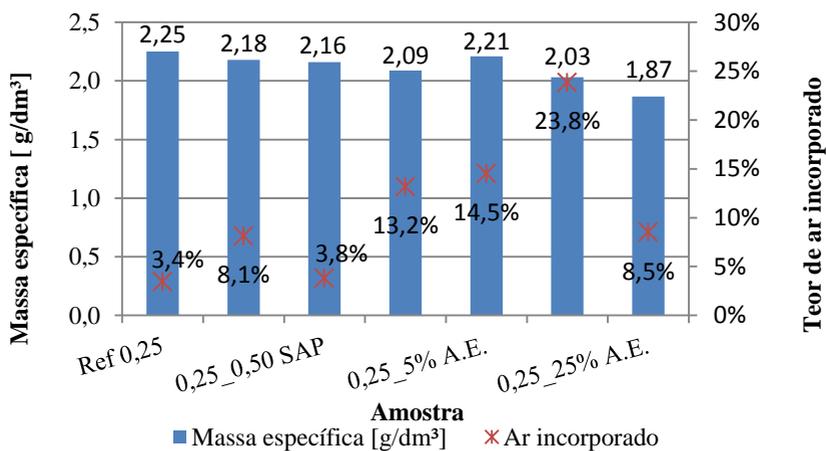


### 4.1.3 Massa específica e teor de ar incorporado

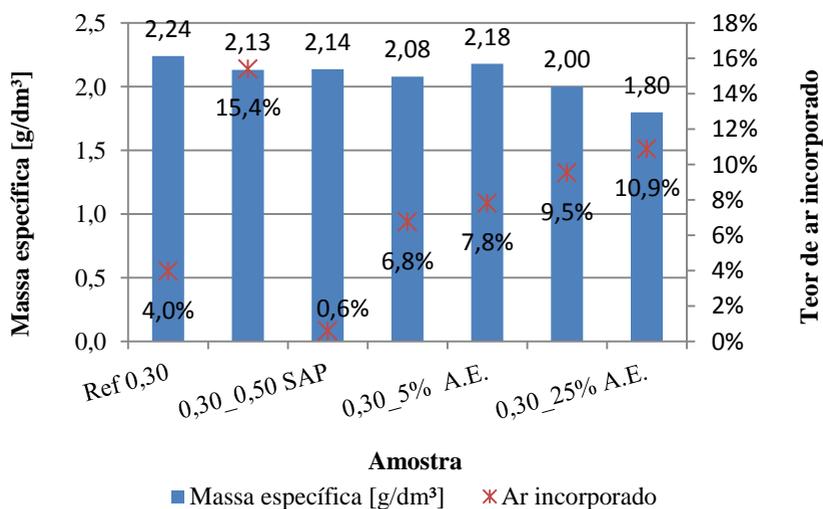
Ao se adicionar os materiais estudados, ocorreu alteração da massa específica da mistura, como pode ser observado nas figuras 17, 18 e 19.

Nas misturas com PSA, esta alteração já pode ser observada ao adicionar 0,25%, porém não ocorreu grande diminuição ao aumentar o teor. Já nas misturas com argila expandida, independente da relação a/c utilizada, a diminuição da massa específica se dá de forma significativa apenas nos traços com 25% de adição.

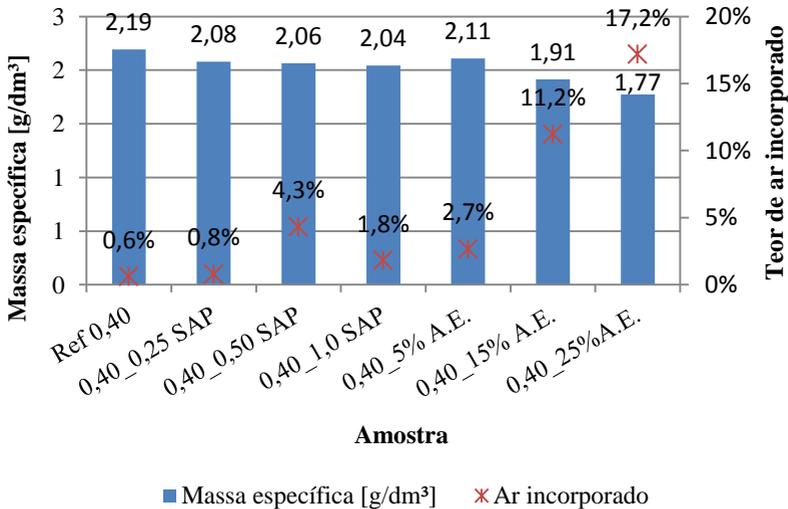
**Figura 17 – Massa específica das misturas com relação a/c 0,25.**



**Figura 18 – Massa específica das misturas com relação a/c 0,30.**



**Figura 19 – Massa específica das misturas com relação a/c 0,40.**



#### 4.1.4 Evolução de calor

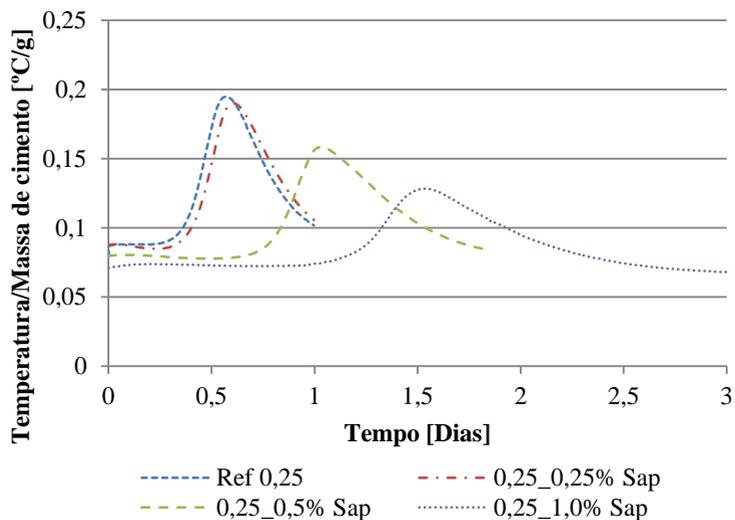
Para melhor caracterizar os efeitos da utilização dos agentes de cura interna na mistura, foi acompanhada a evolução da temperatura durante os três primeiros dias de medição. O ensaio foi executado em um calorímetro semi-adiabático, conforme descrito na metodologia.

Nas misturas com adição de argila expandida, a evolução de calor não apresentou alteração significativa, quando comparado com a referência. Este efeito pode ser notado em todas as relações A/C e para todos os teores testados.

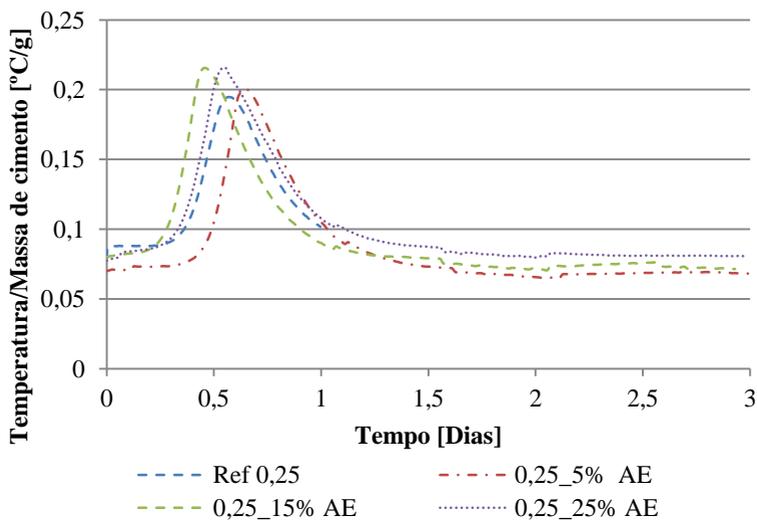
Porém, tratando-se dos traços com o PSA, a inclinação e o pico da curva de temperatura diminuí ao aumentar o teor utilizado. Este efeito pode ser atribuído ao elevado teor de superplastificante e ao armazenamento de água pelo polímero no interior da mistura, uma vez que é acentuado conforme aumenta a relação a/c.

As figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 ilustram a influência dos agentes de cura quanto ao calor liberado pela mistura.

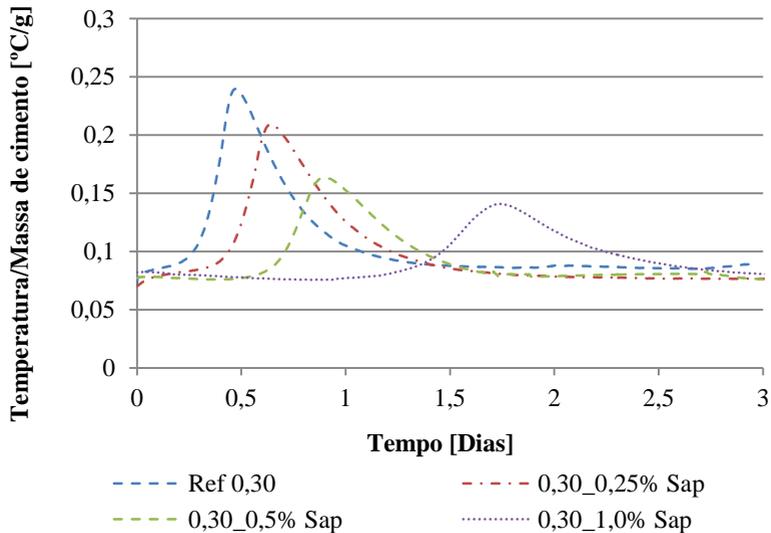
**Figura 20 - Evolução da temperatura/ grama de cimento das misturas com relação a/c 0,25 e adição de PSA**



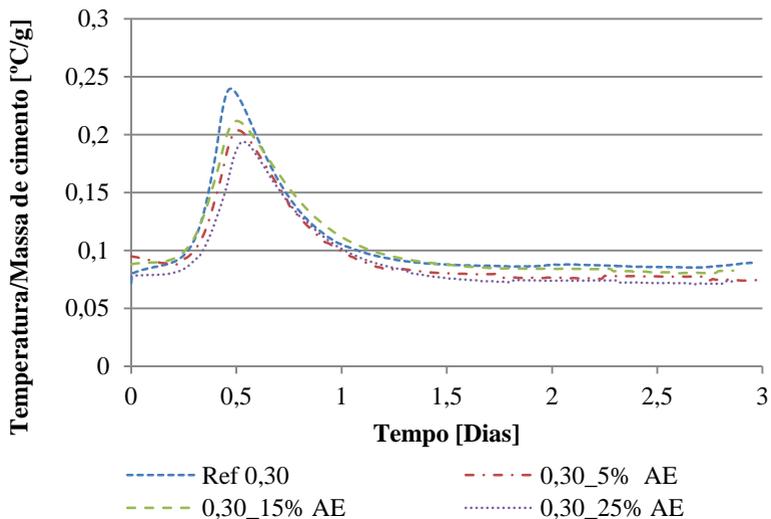
**Figura 21 - Evolução de temperatura/grama de cimento das amostras com relação a/c 0,25 e adição de argila expandida**



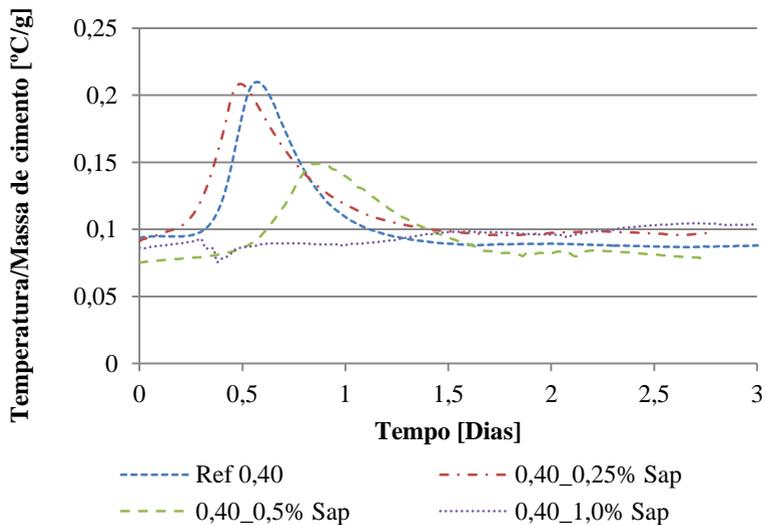
**Figura 22 - Evolução da temperatura/ grama de cimento das misturas com relação a/c 0,30 e adição de PSA**



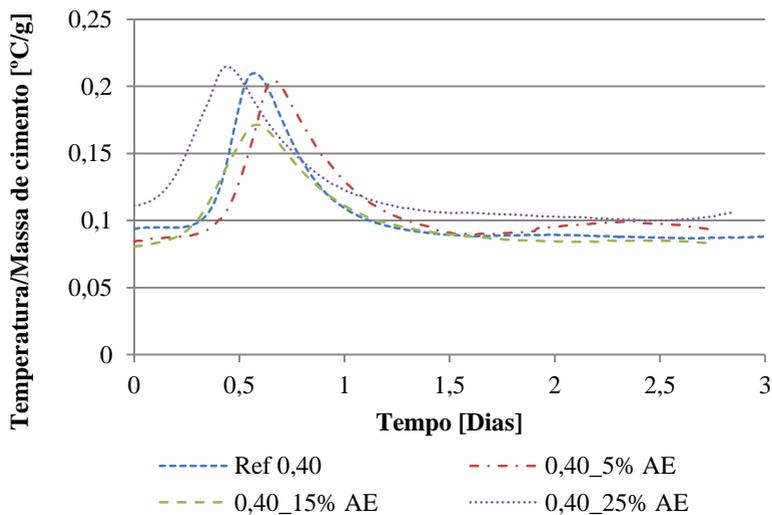
**Figura 23 - Evolução de temperatura/grama de cimento das amostras com relação a/c 0,30 e adição de argila expandida**



**Figura 24 - Evolução de temperatura/grama de cimento das amostras com relação a/c 0,40 e adição de PSA**



**Figura 25 - Evolução de temperatura/grama de cimento das amostras com relação a/c 0,40 e adição de argila expandida**



## 4.2 Resultados através do relógio comparador

Para confirmar a hipótese de retração autógena, foi medido a variação de massa dos prismas, que foi regularmente em balança, com precisão de 0,01g, após cada medida com relógio comparador.

Durante o período autógeno, a variação de massa ocorrida foi maior nas misturas com argila expandida, isso ocorreu para todas as relações a/c trabalhadas. Esse fenômeno mostra que a liberação da água contida no interior do agregado leve é liberada mais rapidamente do que o contido pelo PSA.

O valor máximo obtido da variação não foi superior a 0,679%, ocorrida na amostra com 25% de substituição para a relação a/c 0,30. Como essa variação de massa é relativamente baixa, ajuda a validar o ensaio, comprovando a situação autógena.

Este acompanhamento de variação da massa continuou sendo realizado após ser retirado o isolamento, o que ocorreu no sétimo dia.

A variação de massa está expressa em porcentagem relativa à primeira pesagem do corpo-de-prova, tomada imediatamente após a primeira medida com o relógio comparador.

A tabela 3 contém as variações máximas de massa ocorridas para os prismas de cada mistura. Valores negativos indicam perda de massa. O armazenamento dos prismas foi realizado em sala climatizada, com umidade e temperatura controladas durante todo o tempo de trabalho.

Durante o período em que os prismas estiverem em ensaio foram registradas temperaturas máximas e mínimas de 25 e 18,1°C respectivamente. A umidade relativa no interior da sala, por sua vez, teve máxima registrada de 48 e mínima de 32%.

**Tabela 3 - Variação de massa durante o período ensaiado.**

| A/C  | Amostra   | Até 7 Dias<br>(Autógeno) | Até 28Dias (Secagem)  |
|------|-----------|--------------------------|-----------------------|
|      |           | Variação de massa<br>[%] | Variação de massa [%] |
| 0,25 | REF 0.25  | -0,027%                  | -0,67%                |
| 0,25 | 0.25% PSA | -0,036%                  | -1,37%                |
| 0,25 | 0.5% PSA  | -0,089%                  | -1,76%                |
| 0,25 | 1% PSA    | -0,043%                  | -2,90%                |
| 0,25 | 5% AE     | -0,051%                  | -1,40%                |
| 0,25 | 15% AE    | -0,103%                  | -2,01%                |
| 0,25 | 25% AE    | -0,052%                  | -2,96%                |
| 0,30 | REF 0.30  | -0,069%                  | -1,15%                |
| 0,30 | 0.25% PSA | -0,132%                  | -2,42%                |
| 0,30 | 0.5% PSA  | -0,185%                  | -3,22%                |
| 0,30 | 1% PSA    | -0,075%                  | -2,02%                |
| 0,30 | 5% AE     | -0,056%                  | -2,32%                |
| 0,30 | 15% AE    | -0,097%                  | -2,85%                |
| 0,30 | 25% AE    | -0,679%                  | -5,47%                |
| 0,40 | REF 0.40  | -0,055%                  | -2,73%                |
| 0,40 | 0.25% PSA | -0,079%                  | -4,35%                |
| 0,40 | 0.5% PSA  | -0,100%                  | -3,22%                |
| 0,40 | 1% PSA    | -0,038%                  | -2,02%                |
| 0,40 | 5% AE     | -0,112%                  | -6,09%                |
| 0,40 | 15% AE    | -0,102%                  | -7,43%                |
| 0,40 | 25% AE    | -0,382%                  | -7,32%                |

Os valores de perda de massa encontrados validam os dados encontrados nos ensaios de retração, principalmente nas primeiras idades, onde se procurava obter valores da retração autógena. A perda de massa quase praticamente nula mostra que não houve troca de umidade entre a amostra e o ambiente.

As figuras 26, 27, 28, 29, 30 e 31 apresentam os resultados de retração obtidos no quadro comparador, obtidos com o auxílio de relógios comparadores.

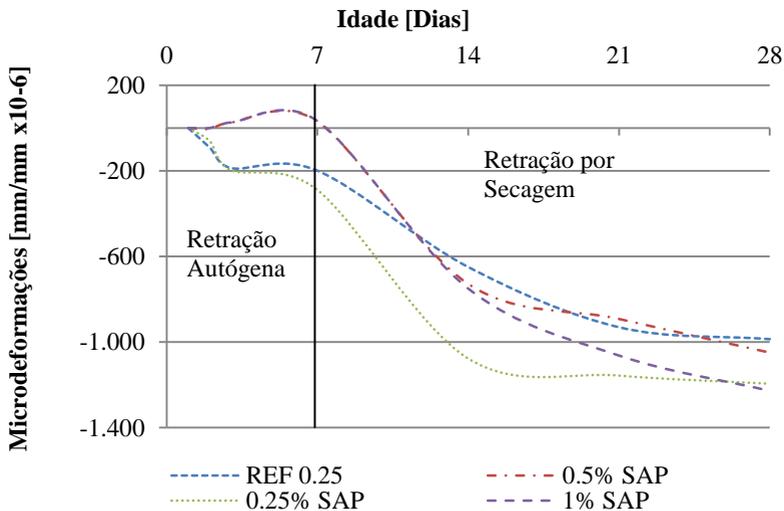
Percebe-se que nas primeiras idades (até 7 dias), as mistura de PSA apresentaram deformações de expansão com maior magnitude, principalmente e relações A/C menores. À medida que a quantidade de água utilizada na mistura aumenta, a diferença entre o efeito do PSA e

da Argila Expandida diminui, porém a expansão apresentada pelo polímero é maior em todas as situações.

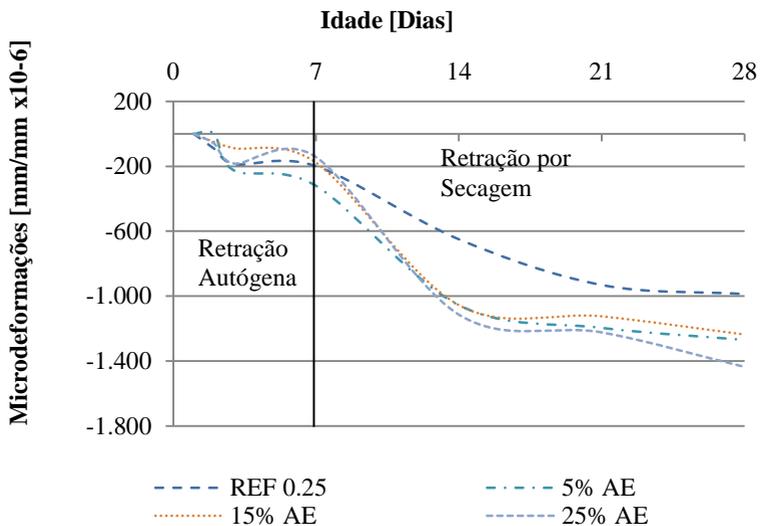
Aos 28 dias, a deformação das misturas com agentes de cura interna apresentaram valores praticamente iguais, porém observa-se que a inclinação das retas dos traços com agente de cura interna é bem maior quando comparado com sua referência, principalmente nas idades entre 7 e 14 dias e em baixas relações A/C.

É possível afirmar que, quanto à combate à retração, o PSA apresenta maior eficiência do que a argila expandida, uma vez que apresenta maior expansão nas primeiras idades, compensando assim a retração que irá ocorrer nas demais idades.

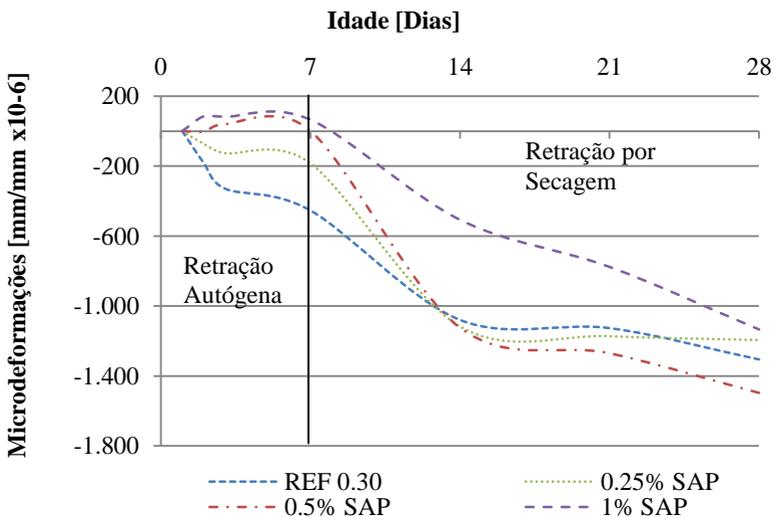
**Figura 26 - Retração medida no quadro de retração para misturas com a/c 0,25 com PSA**



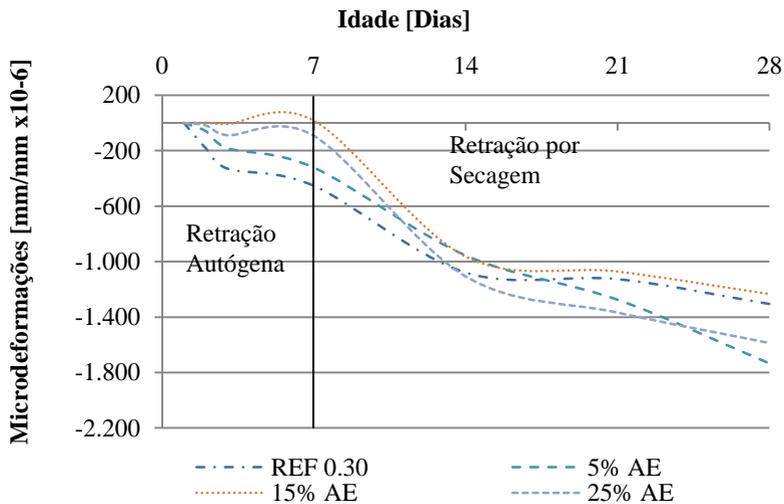
**Figura 27 - Retração medida no quadro de retração para misturas com a/c 0,25 com argila expandida**



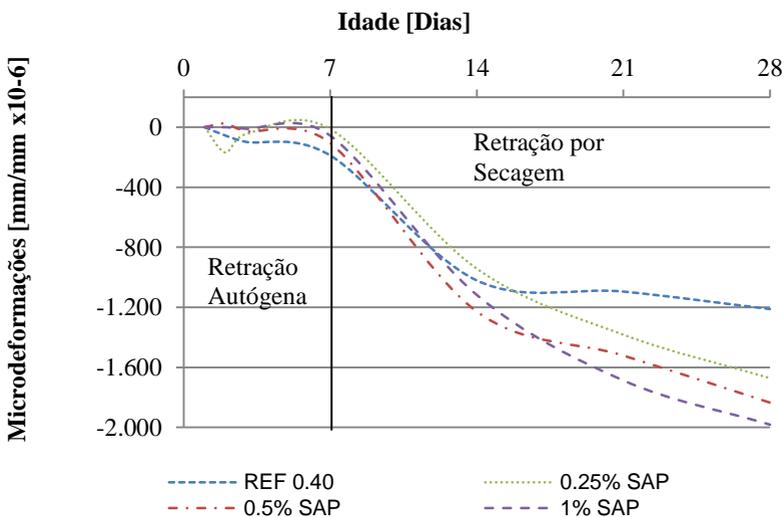
**Figura 28 - Retração medida no quadro de retração para misturas com a/c 0,30 com PSA**



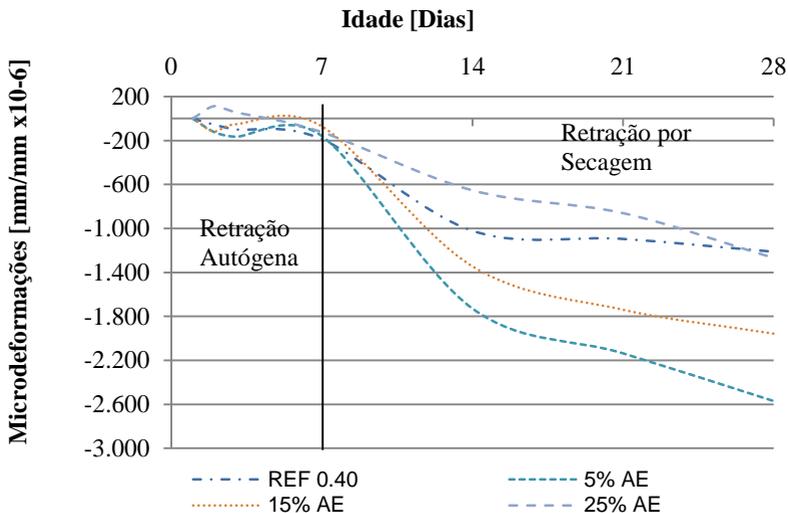
**Figura 29 - Retração medida no quadro de retração para misturas com a/c 0,30 com argila expandida**



**Figura 30 - Retração medida no quadro de retração para misturas com a/c 0,4 com PSA**



**Figura 31 - Retração medida no quadro de retração para misturas com a/c 0,40 com argila expandida**



### 4.3 Resultados da resistência à compressão

As misturas de referência obtiveram valores de resistência maior que as demais. Isso já era esperado porque, além de possuir menos água em sua composição, as demais apresentam maior teor de ar incorporado resultante da incorporação dos agentes de cura interna.

Essa relação entre teor e resistência não fica tão nítida nas amostras com argila expandida. As figuras 32,33,34,35,36,e 37 apresentam as resistências das misturas obtidas no ensaio de compressão axial, assim como o desvio padrão apresentado para cada mistura.

As resistências aos 3 dias nas amostras com PSA sofre grande influência do teor que é utilizado, o que também era de ser esperado, pois a quantidade de vazio vai aumentar de acordo com a quantidade de PSA utilizado.

Figura 32 - Resistência à compressão média aos 3 dias

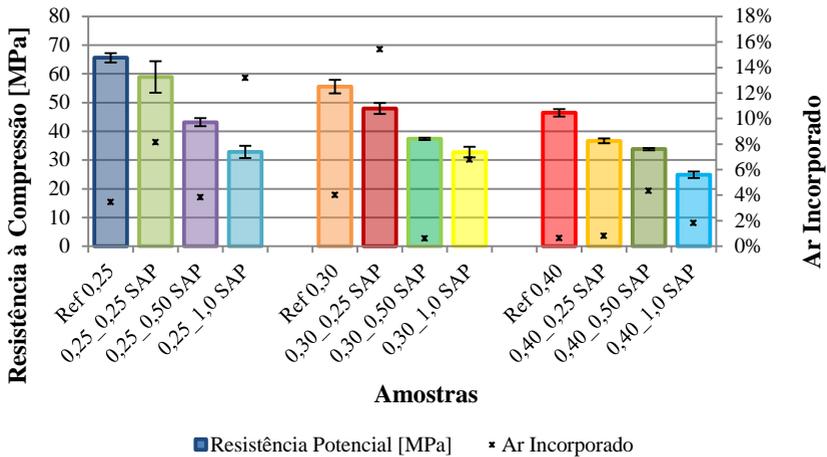
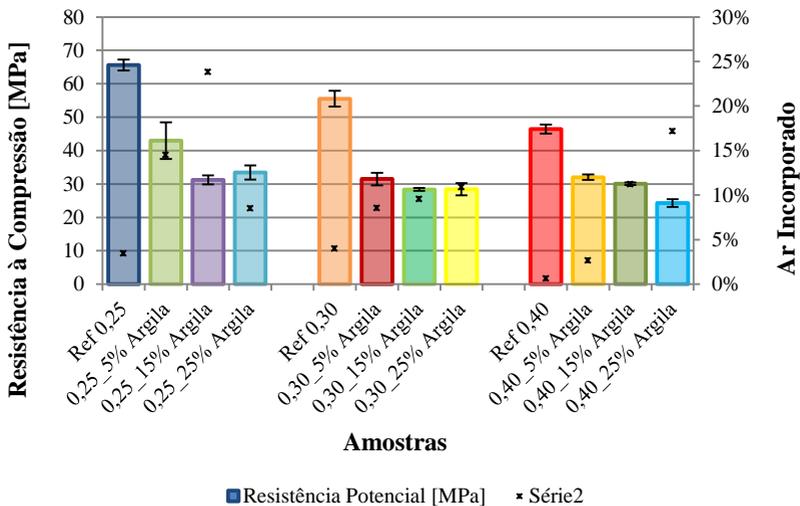
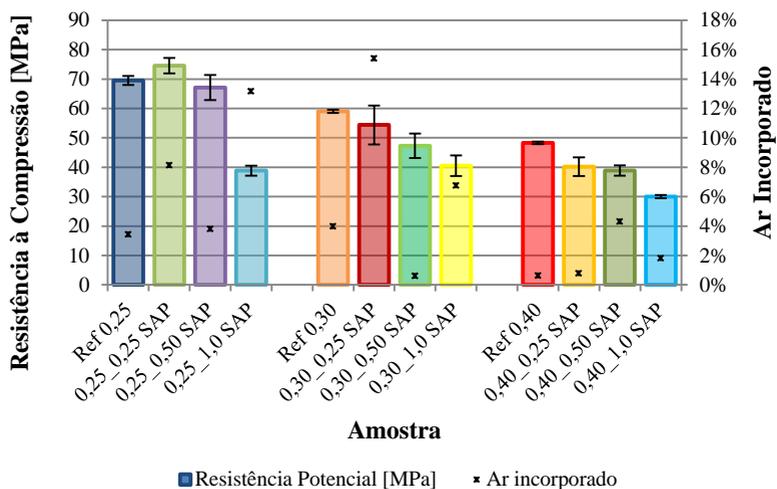


Figura 33 - Resistência à compressão média aos 3 dias

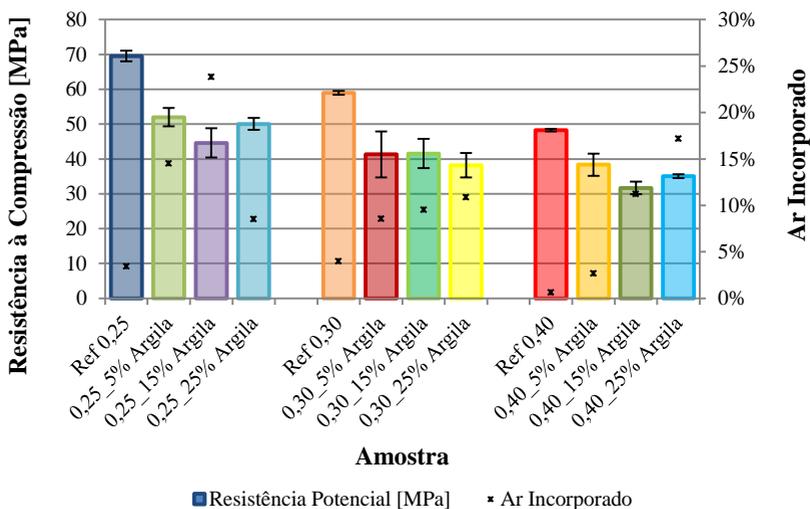


Aos 7 dias é possível observar que o crescimento da resistência das amostras onde foi adicionados os agentes de cura interna foi maior que o da referência, principalmente notado nas amostras com a utilização do PSA.

**Figura 34– Resistência à compressão média aos 7 dias**



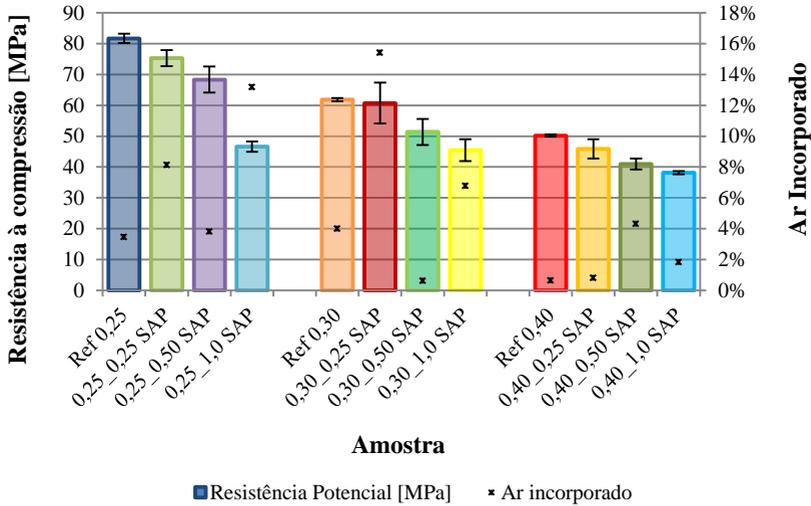
**Figura 35– Resistência à compressão média aos 7 dias**



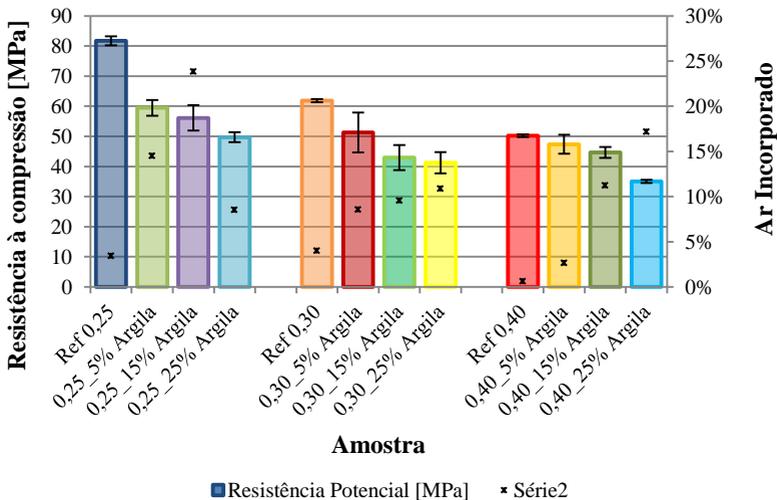
Para os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias as misturas com PSA continuaram apresentar decréscimo de resistência conforme o aumento de teor, como explicado anteriormente. Porém,

para a relação a/c 0,25, os resultados obtidos com o uso de cura interna apresentou uma queda de resistência de aproximadamente 25%. Nas demais relações a/c esta diferença torna-se menor. Este mesmo efeito ocorre nas amostras com argila expandida.

**Figura 36– Resistência à compressão média aos 28 dias**



**Figura 37– Resistência à compressão média aos 28 dias**

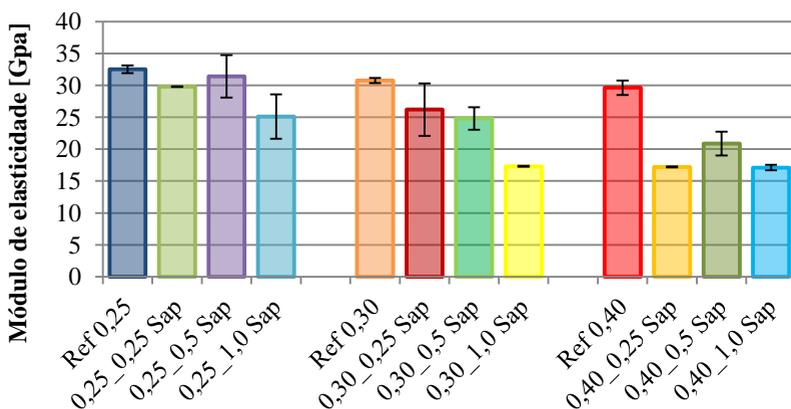


#### 4.4 Módulo de elasticidade

Analisando os resultados de módulo de elasticidade realizado aos 28 dias percebeu-se que, nas amostras com PSA, trabalhando com relação a/c baixa, os valores encontrados para módulo de elasticidade são praticamente os mesmos se considerarmos o desvio padrão de cada amostra.

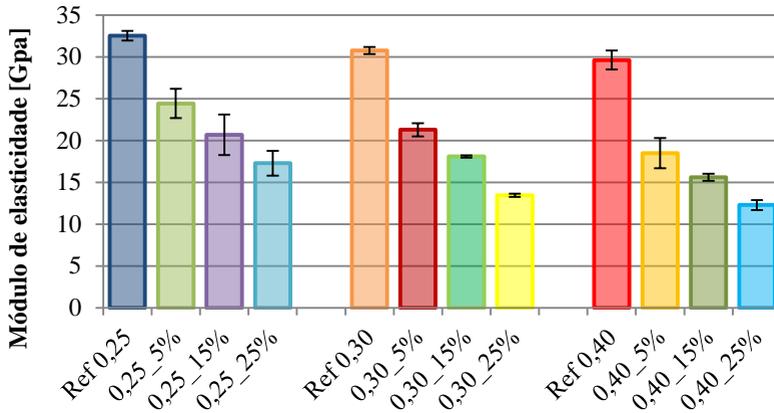
Este efeito não ocorre ao aumentar a quantidade de água na mistura, isso se deve provavelmente ao tamanho e dispersão dos vazios a mistura, uma vez que quanto mais água for absorvida pelo polímero, maior é o vazio resultante da liberação da água internamente retida.

**Figura 38 - Resultado de módulo de elasticidade das amostras contendo PSA aos 28 dias**



Já nas misturas com argila expandida, o módulo de elasticidade foi diminuindo conforme o aumento da substituição utilizada e, quando comparados com as misturas com PSA, apresentaram valores inferiores para as relações a/c de 0,25 e 0,30 e resultados praticamente iguais nas misturas com a/c 0,40 como pode ser observado nas figuras abaixo.

**Figura 39 - Resultado de módulo de elasticidade aos 28 dias**



#### 4.5 Resistividade elétrica

Quanto à resistividade elétrica, as amostras de referência apresentaram um valor de resistividade superior do que as demais misturas. Quanto maior a quantidade de água presente na mistura, menor a diferença entre as curvas com agente de cura interna e a referência.

Para a avaliação dos resultados de resistividade elétrica, utilizaram-se os parâmetros apresentados na pelo fabricante no manual do equipamento.

A Tabela 4 apresenta os limites utilizados para a estimativa de probabilidade de corrosão da estrutura, e a Tabela 5 apresenta a indicação da taxa de corrosão. Os valores apresentados nestas tabelas são resultantes de testes empíricos.

**Tabela 4 - Valores para estimativa de probabilidade de corrosão**

| <b>Valor da Resistividade [kΩcm]</b> | <b>Probabilidade de Corrosão</b> |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| ≥12                                  | Improvável                       |
| 8 a 12                               | Possível                         |
| ≤ 8                                  | Bastante provável                |

**Tabela 5 - Indicação da taxa de corrosão**

| <b>Valor da Resistividade [kΩcm]</b> | <b>Taxa de corrosão</b>      |
|--------------------------------------|------------------------------|
| ≥ 20                                 | Corrosão baixa               |
| 10 a 20                              | Corrosão de baixa a moderada |
| 5 a 10                               | Corrosão alta                |
| ≤ 5                                  | Corrosão muito alta          |

**Tabela 6 - Valores de resistividade quanto à penetração de íons de cloreto segundo AASHTO TP95-11**

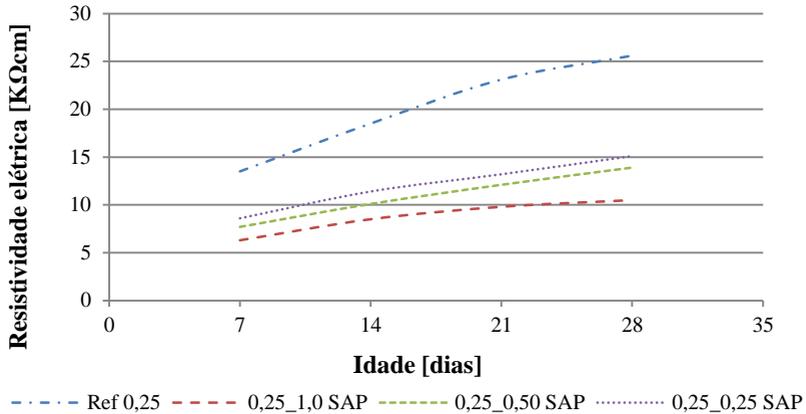
| <b>Valor da Resistividade [kΩcm]</b> | <b>Penetração de íons de cloreto</b> |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| ≥ 254                                | Impossível                           |
| 37-254                               | Baixa                                |
| 21-37                                | Moderada                             |
| 12-21                                | Alta                                 |
| ≤ 12                                 | Muito alta                           |

Nos ensaios realizados, foi possível verificar que as diferenças entre os teores de utilização do mesmo material, a resistividade não obteve valores muito diferente.

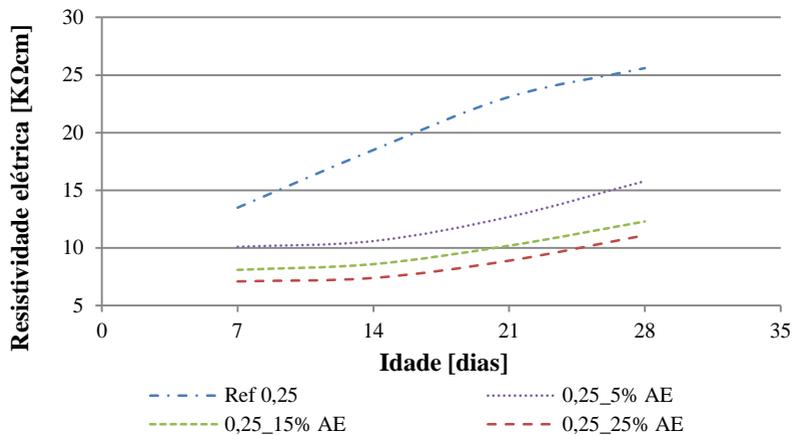
Já entre as misturas com PSA e Argila expandida, os valores obtidos são muito parecidos.

Como as misturas com argila expandida possuem umidade menor, o fato dos resultados serem muito parecidos nas diz que os vazios existentes possuem maior conectividade ou são maiores do que os presentes na mistura com PSA. Esses resultados são apresentados nas figuras 40, 41, 42, 43, 44 e 45.

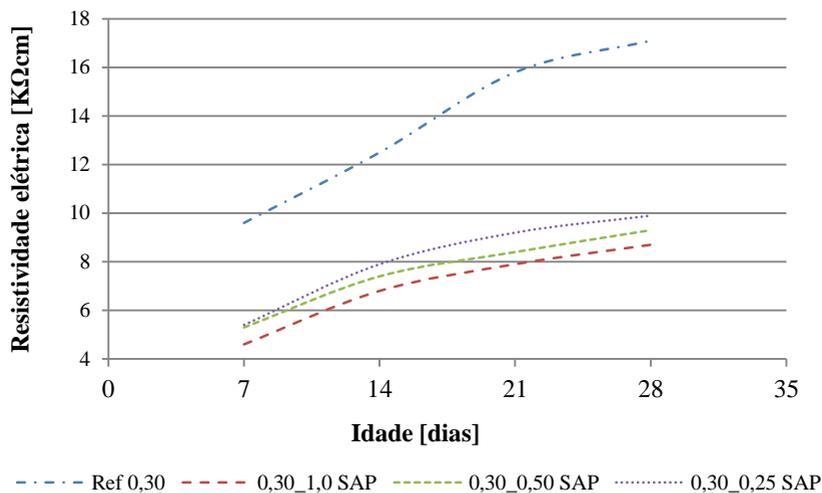
**Figura 40**—Evolução da resistividade elétrica de misturas com relação a/c 0,25 e PSA.



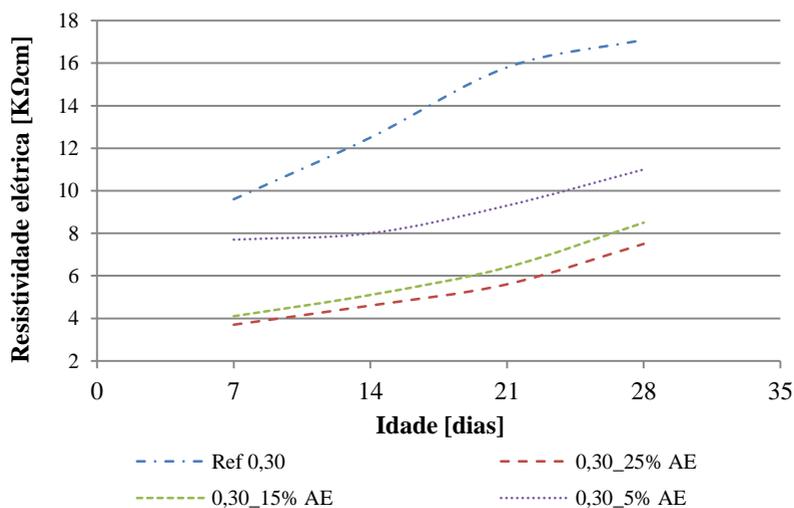
**Figura 41**—Evolução da resistividade elétrica de misturas com relação a/c 0,25 e argila expandida.



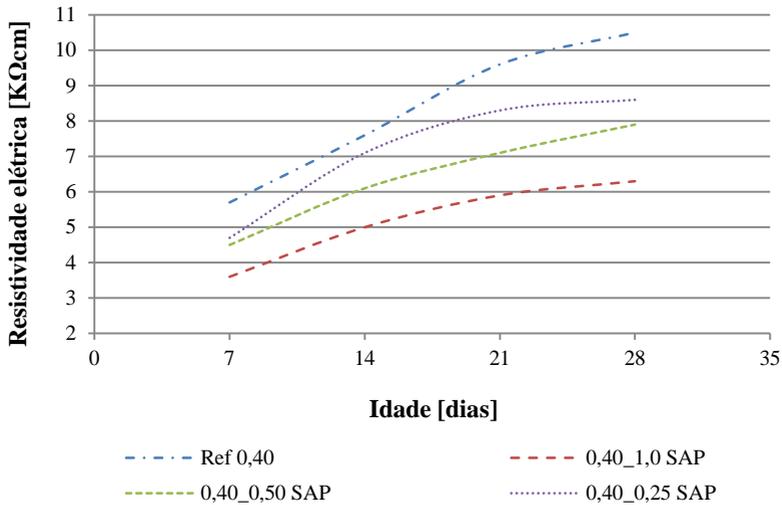
**Figura 42—Evolução da resistividade elétrica de misturas com relação a/c 0,30 e PSA.**



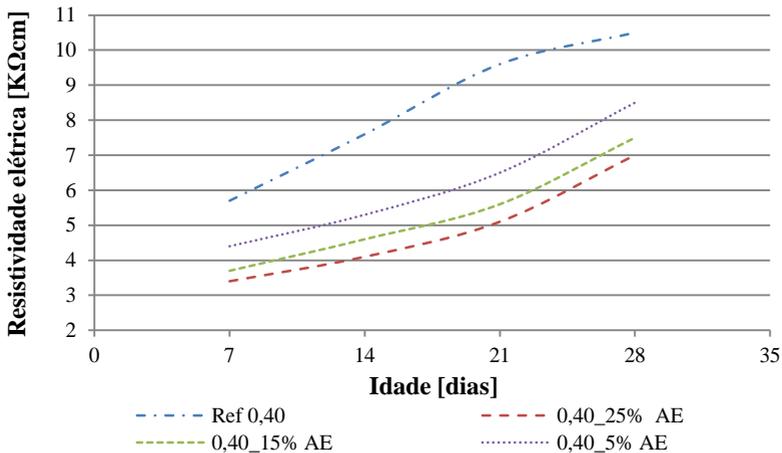
**Figura 43—Evolução da resistividade elétrica de misturas com relação a/c 0,30 e argila expandida.**



**Figura 44 – Evolução da resistividade elétrica de misturas com relação a/c 0,40 e PSA.**



**Figura 45 – Evolução da resistividade elétrica de misturas com relação a/c 0,40 e argila expandida.**



O deslocamento em comparação à mistura de referência se deve aos poros da mistura que, além de ser um caminho mais fácil para a percolação da corrente, apresentam umidade devido à água de cura

interna. Para a análise dos resultados, serão utilizadas as leituras obtidas aos 28 dias.

De acordo com os valores trazidos pela AASHTO quanto a passagem de íons de cloreto, todas as misturas se apresentam na faixa entre Moderada à Alta penetração, sendo que ao ser adicionado os agentes de cura interna, a resistividade diminui drasticamente, principalmente em relação A/C mais baixas, tornando assim as misturas mais passivas à penetração destes íons.

Seguindo os parâmetros fornecidos pelo fabricante do equipamento quanto à probabilidade de corrosão, para a relação A/C igual a 0,25, todos os teores de adição levaram a mistura à faixa de possível corrosão (resistividade entre 8 e 12 KΩcm) e taxa de corrosão de baixa a moderada, enquanto a mistura referência para este A/C encontra-se no grupo de improvável corrosão, com baixa taxa de corrosão.

Nas demais relações estudadas, este deslocamento em relação à amostra de referência continua sendo grande, porém ao aumentar a quantidade de água da mistura, o uso destes agentes promotores de cura interna aumentou a probabilidade e a taxa de corrosão das misturas.

O fato de a resistividade elétrica ser menor à medida que aumentamos a relação A/C já era esperada, pelo fato do aumento do teor de ar da mistura.

A queda deste parâmetro ao aumentar o teor de adição de polímero ou argila se deve ao fato de que, após a água ser totalmente liberada pelo sistema, a quantidade de vazio presente é maior do que na amostra de referência.

As misturas contendo argila expandida apresentaram melhor desempenho que as contendo PSA quanto à resistividade elétrica. Isso pode ser resultado alguns fatores, primeiramente da distribuição dos grãos de polímero dentro da mistura, do tamanho do vazio originado pelo PSA ao liberar a água absorvida, além da conectividade entre os vazios presentes na amostra.

#### **4.6 Retração medida no bancada de retração**

O ensaio de retração não restringida foi realizado na bancada montada em sala climatizada. As leituras foram realizadas nas primeiras idades, desde o momento da mistura até o terceiro dia. As amostras foram moldadas nas formas de acordo com o recomendado na ASTM C490.

Porém como a intenção era determinar a retração autóloga, os moldes metálicos foram revestidos internamente por uma camada plástica, assim isolando a mistura da perda de água para o ambiente. A temperatura dos moldes foi monitorada, para assim conseguir descontar o efeito da retração térmica das leituras obtidas.

Ambos agentes de cura estudados se apresentaram eficientes quanto ao combate à retração nas primeiras idades, onde em alguns casos a retração ficou muito próxima de ser nula.

Foi observado que quanto maior o teor de PSA utilizado na mistura, maior foi a redução da retração na mistura, em alguns casos vindo a apresentar uma leve expansão, principalmente em misturas com relações a/c. mais elevados.

As misturas com substituição de areia por argila expandida moída apresentaram expansão em todos os teores de substituição e para todos a/c estudados, diferenciando apenas a magnitude que este efeito apresenta na mistura, sendo este proporcional à quantidade inserida no traço e também com a quantidade de água presente na mistura.

Como pode ser observada na figura 46, a expansão nas primeiras idades não ocorreu como o esperado, pois as curvas começaram a apresentar efeito de expansão após um dia da mistura ser realizada. Desta maneira o resultado encontrado nas misturas com PSA não apresentaram diferença significativa quando comparada à referência.

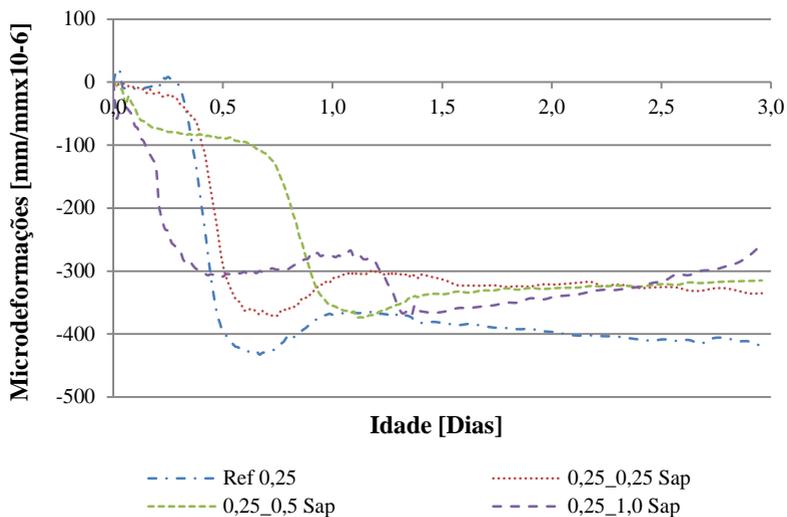
O fato destas misturas apresentarem pequenas quantidades de água pode ser a explicação para o efeito apresentado nas amostras contendo PSA. Como o polímero é adicionado seco, nas primeiras horas pode estar absorvendo a pouca água existente na mistura, já que após 1 dia as curvas começam a apresentar efeito de expansão, enquanto a referência continua retraindo.

O fato destas misturas apresentarem pequenas quantidades de água pode ser a explicação para o efeito apresentado nas amostras contendo PSA. Como o polímero é adicionado seco, nas primeiras horas pode estar absorvendo a pouca água existente na mistura, já que após 1 dia as curvas começam a apresentar efeito de expansão, enquanto a referência continua retraindo.

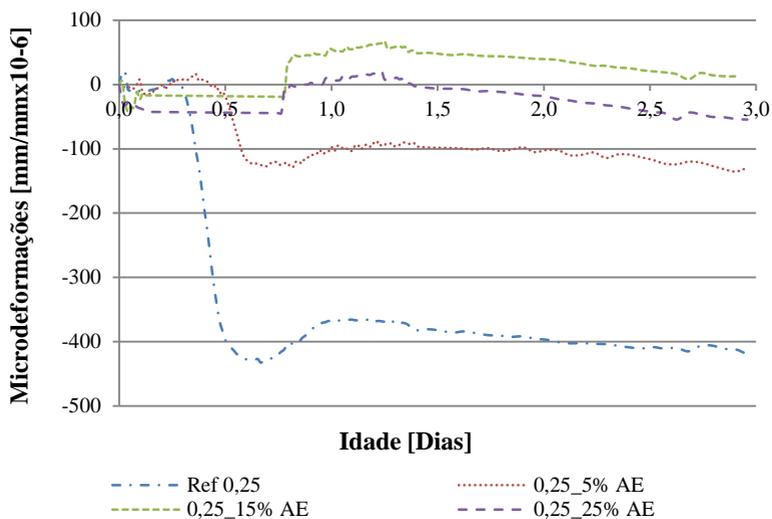
Deve-se caracterizar o poder de absorção e desorção do PSA em misturas com alcalinidade semelhantes à da mistura cimentícias para entender melhor o efeito aqui encontrado.

Nos traços onde foi utilizada a argila expandida, os agentes de cura interna apresentaram desempenho satisfatório quanto ao combate à retração, como pode ser observado na Figura 47.

**Figura 46 – Deformação em estado autógeno das amostras com relação a/c 0,25 e adição de PSA.**



**Figura 47 – Deformação em estado autógeno das amostras com relação a/c 0,25 e adição de argila expandida.**



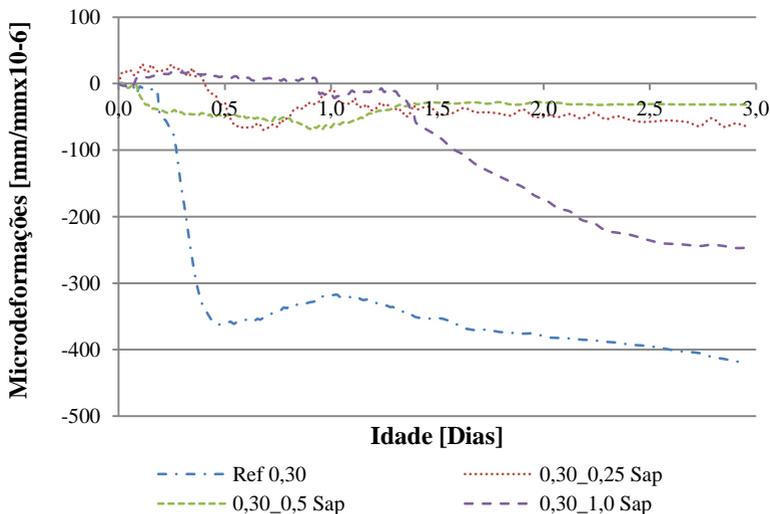
Observando as o resultado apresentado nas figuras 48, 49, 50 e 51, percebe-se que a deformação não ocorre da mesma maneira como foi mencionado para as amostra com A/C 0,25.

O fato de ter mais água disponível no traço para a absorção pelo polímero pode ser o fator que interfira neste processo. Quanto ao teor de PSA a ser utilizado, pelos resultados obtidos, as melhores opções são 0,25% e 0,50 %, já que com 1% de PSA na mistura apresentou deformações de maiores magnitudes, o que poderia vir a causar fissuração.

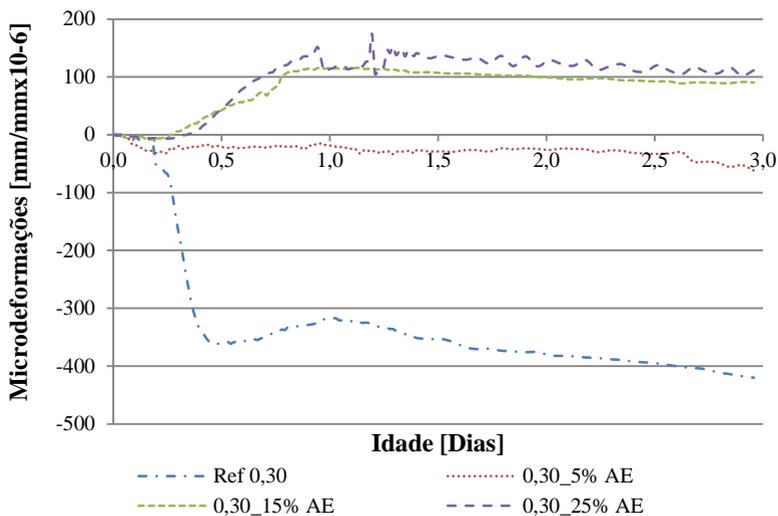
As misturas compostas com argila expandida apresentaram deformações com menor magnitude do que quando se utilizou PSA. Isso foi observado para todos os traços realizados com este material.

Entre as misturas com argila expandida, o teor de 5% atendeu as muito bem as expectativas, onde praticamente anulou as deformações durante os 3 primeiros dias, principalmente nas relações maiores A/C aqui testadas.

**Figura 48 – Deformação em estado autógeno das amostras com relação a/c 0,30 e adição de PSA.**

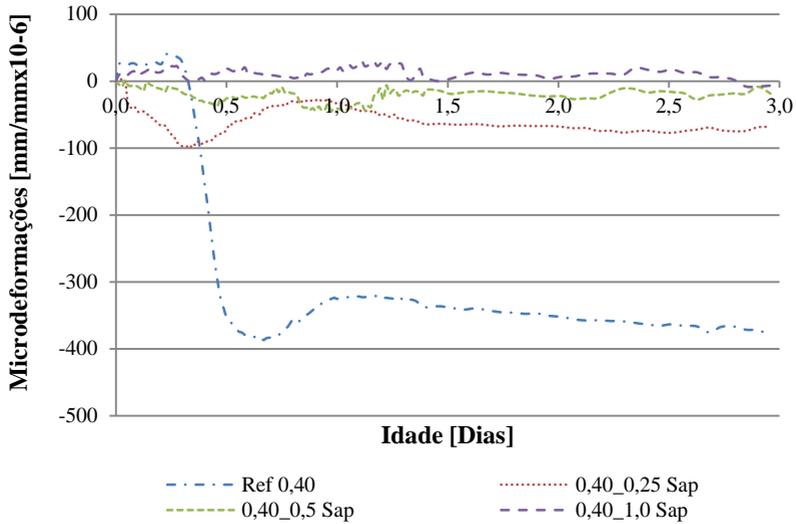


**Figura 49 – Deformação em estado autógeno das amostras com relação a/c 0,30 e adição de argila expandida.**

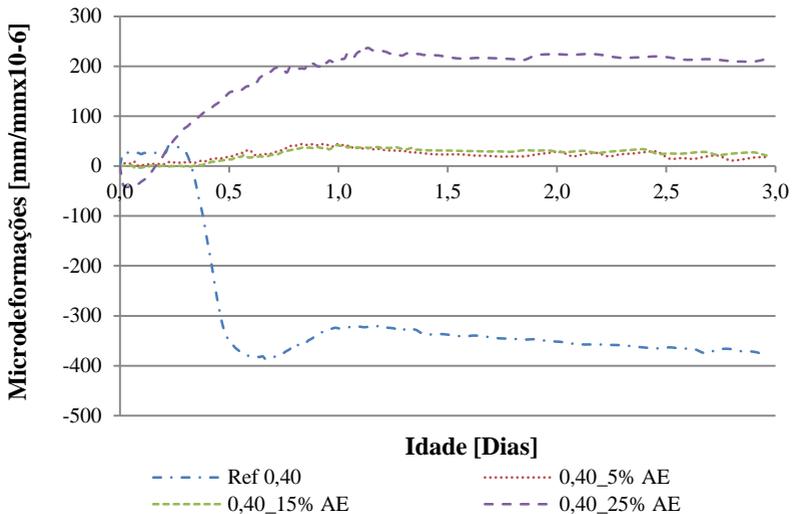


Tratando-se apenas de combater a retração autógena nas primeiras idades, ao trabalhar com A/C 0,25, teores de 15% e 25% aparecem como alternativas tão boas quanto um 5%. Porém ao aumentar a quantidade de água de amassamento da mistura, já estes teores já não se mostram mais tão vantajosos.

**Figura 50 – Deformação em estado autôgeno das amostras com relação a/c 0,40 e adição de PSA.**



**Figura 51 – Deformação em estado autôgeno das amostras com relação a/c 0,40 e adição de argila expandida.**



#### 4.7 Acompanhamento da umidade relativa

Os dados da evolução são apresentados nas figuras 52, 53, 54, 55, 56 e 57.

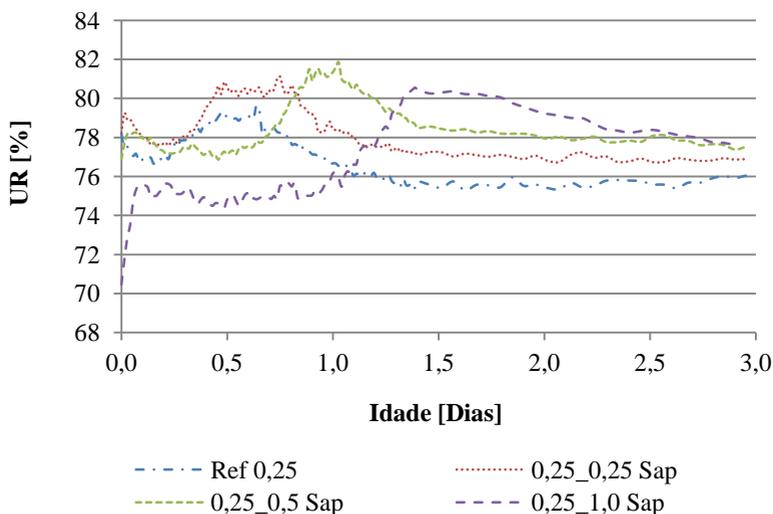
Nelas é possível observar que as amostras com Argila expandida e PSA apresentam efeitos opostos à medida que aumenta o teor de adição.

A umidade das amostras com argila expandida sofre decréscimo de umidade ao aumentar o teor utilizado e, perda de umidade durante o período de hidratação ocorre rapidamente para todos os teores.

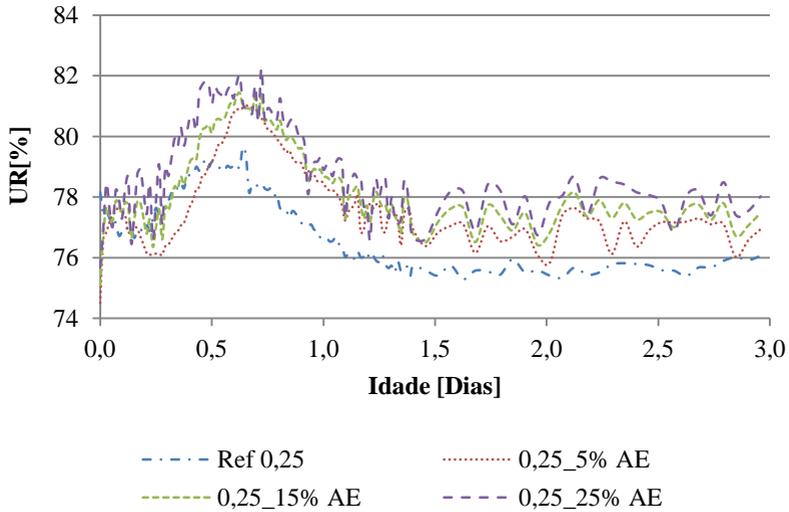
Já ao adicionar o polímero, umidade varia coma quantidade de água disponível na mistura. Conforme pode ser observado, em baixas relações A/C, a umidade máxima registrada foi praticamente a mesma.

Quanto a estabilização da umidade, misturas com maiores teores de PSA levaram mais tempo para estabilizar.

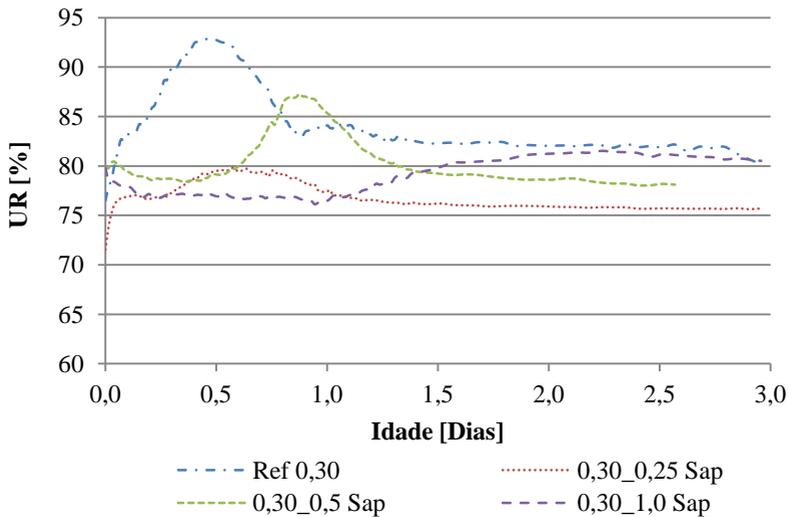
**Figura 52 - Umidade relativa das misturas durante os 3 primeiros dias, amostras com PSA e a/c 0,25**



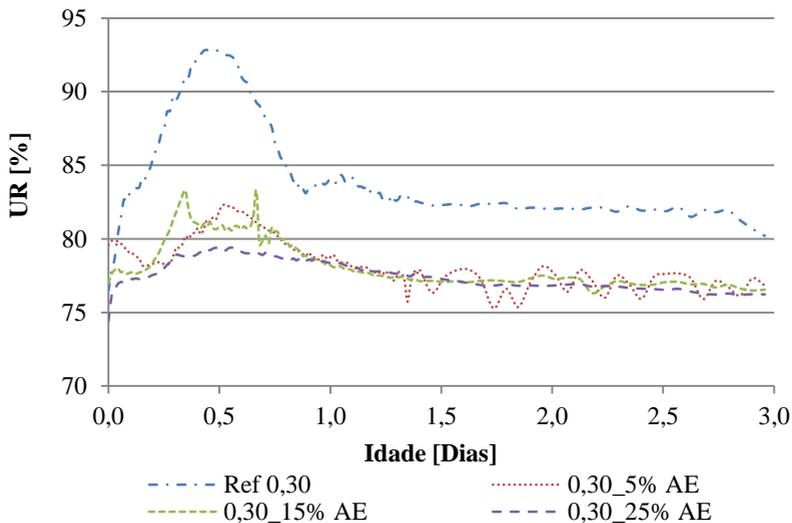
**Figura 53 - Umidade relativa das misturas durante os 3 primeiros dias, amostras com Argila Expandida e a/c 0,25**



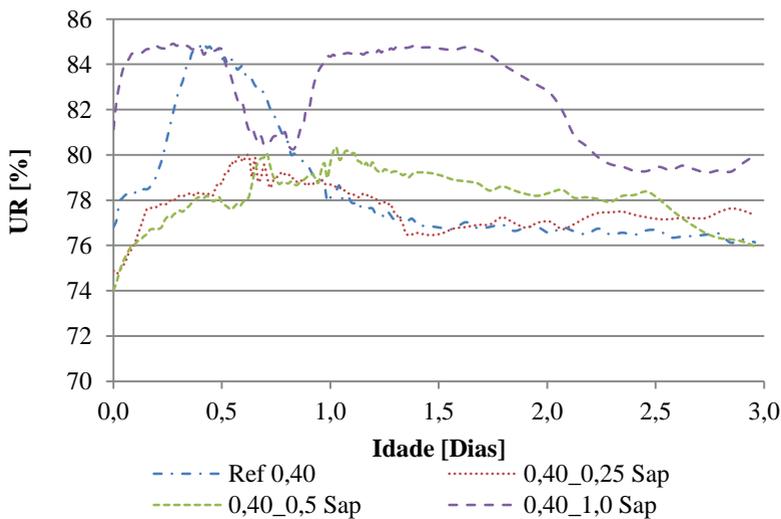
**Figura 54 - Umidade relativa das misturas durante os 3 primeiros dias, amostras com PSA e a/c 0,30**



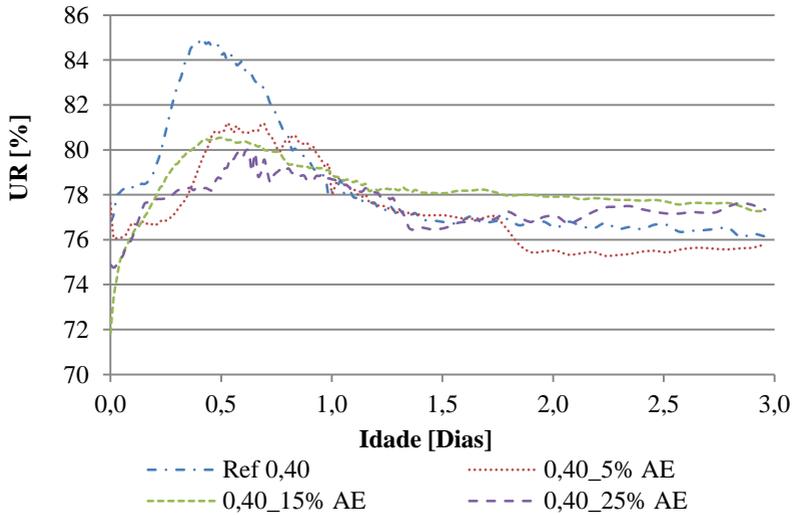
**Figura 55 - Umidade relativa das misturas durante os 3 primeiros dias, amostras com Argila Expandida e a/c 0,30**



**Figura 56 - Umidade relativa das misturas durante os 3 primeiros dias, amostras com PSA e a/c 0,40**



**Figura 57 - Umidade relativa das misturas durante os 3 primeiros dias, amostras com Argila Expandida e a/c 0,40**



A medida da UR interna indica o quão saturado encontra-se o a em que se encontra a mistura, pois é onde os grãos de cimento serão hidratados. Assim, se a água contida PSA é livre para hidratar o cimento, a retração autógena será mais reduzida quão maior a UR interna.

## 5 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

---

Com base nos resultados apresentados no capítulo anterior, é possível chegar à algumas conclusões quanto à utilização de PSA e Argila Expandida como promotor de cura interna para combate à retração.

- **Fluidez:**

As misturas com PSA apresentaram grande viscosidade, demandando grande quantidade de aditivo para manter a trabalhabilidade desejada, principalmente ao adicionar 1% de PSA.

A perda de fluidez das misturas está diretamente ligada ao teor de PSA utilizado. Quanto maior o teor, mais aditivo necessitava na dosagem final para acertar a abertura mínima desejada. Isso se deve ao aumento da absorção de água da mistura pelo PSA.

A verificação da quantidade de água absorvida e liberada pelos grãos de polímero não foi realizado.

Já as misturas com argila expandida apresentaram baixa viscosidade e também demandaram baixos teores de superplastificantes. Possivelmente isso ocorreu porque havia mais água disponível para lubrificar as partículas sólidas, teoricamente não absorve uma parte da água destinada ao amassamento, já que a argila foi adicionada saturada.

- **Massa específica:**

O aumento do teor de PSA não acarretou em diminuição da massa específica da mistura. Já ao aumentar o teor de Argila diminuiu a massa específica de maneira significativa.

Em ambos os casos, o teor de ar aumentou com o aumento de incorporação dos agentes de cura interna.

- **Evolução de calor:**

As curvas de evolução de calor com adição de argila expandida não apresentaram diferença significativa entre os teores e a referência. Porém, nas amostras com PSA, as leituras de evolução sofreram interferência, tanto na magnitude quanto na velocidade em que a temperatura aumentava. Este efeito foi mais evidente quanto se aumentou os teores de aditivo e relação A/C.

Aqui vale ressaltar que a evolução de calor sofre interferência do isolamento em que ele é submetido.

- Retração autógena medida na bancada de retração, com auxílio de transdutores de deslocamento:

Percebe-se que a argila expandida se mostra mais eficiente quanto ao combate de retração para as três relações A/C aqui testadas. Com exceção da amostra 0,40\_25%, que apresenta grande expansão nas primeiras idades, as demais misturas com este material apresentaram desempenho parecido para os teores utilizados, apresentando pequena expansão nas primeiras horas.

Já a utilização de PSA se mostrou aumento de eficiência conforme a relação A/C inicial foi aumentando. Porém em nenhuma ocasião a deformação medida se mostrou nula, chegando próximo à zero para A/C 0,40.

O aumento de teor de utilização do polímero também se mostra relativo à quantidade de água utilizada na mistura, se mostrando vantajoso para baixas relações A/C.

- Quanto à retração medida no quadro de retração com relógio comparador:

Dentre as misturas testadas, a eficiência do combate à retração autógena (até os 7 dias) é maior na medida em que temos A/C maiores. Porém, em nenhuma das ocasiões o valor encontrado para a retração foi nulo, chegando muito próximo disso para A/C de 0,40.

Neste período em que se acompanhou a retração autógena, à medida que a quantidade de água da mistura diminui, é observado expansão nas amostras contendo os agentes de cura utilizados. Após ser retirada a selagem do corpo de prova, todos retraíram com magnitude próxima ou até mesmo superior à amostra de referência.

Ao ser analisado a retração total da mistura, é possível afirmar que o teor ideal de utilização do agente de cura vai depender, entre outros fatores construtivos, da relação A/C com que se está trabalhando, uma vez que os efeitos variam de acordo com aumento de água na mistura.

- Variação de umidade interna das misturas:

Os resultados de umidade relativa da mistura foram coerentes com o resultado de retração obtidos com os transdutores de deslocamentos.

As curvas nos mostram que a umidade relativa para misturas com teores de 1,0% de PSA demoram mais para alcançar seus picos, sendo que em alguns momentos estes não foram atingidos durante o tempo de ensaio (até 3 dias). Nessas amostras, percebe-se que quanto maior a quantidade de água utilizada no traço, maior é o patamar de umidade obtido na leitura e, este se mantém durante o tempo de ensaio, o que nos mostra que o processo de desorção está ocorrendo de maneira mais lenta do que o esperado.

Vale ressaltar aqui que este ensaio está suscetível ao ambiente que o aparato foi utilizado para o ensaio.

- Resistividade elétrica:

A promoção de cura interna estudada acabou diminuindo a resistividade elétrica da mistura e, como esperado, este valor decresce conforme o aumento da incorporação dos agentes na mistura.

No caso do uso de PSA, isso se deve aos vazios resultantes da liberação da água que por ele foi incorporada. Já para a argila expandida, estes vazios já são características de sua estrutura.

Assim sendo, a incorporação dos agentes de cura interna facilitam a passagem de íons de cloretos, possuindo a classificação entre Moderada a Alta. Apresentando melhor desempenho nas misturas onde foi utilizada argila expandida.

- Resistência à compressão:

O decréscimo da resistência à compressão nas misturas com utilização de cura interna ocorreu de maneira linear para ambos os materiais à medida que se aumenta o teor utilizado.

A diferença de resistência entre as amostras referência e as demais é muito maior nas primeiras idades, isso ajuda à comprovar a ocorrência da cura interna ao utilizar PSA e Argila Expandida.

Este resultado era esperado devido ao surgimento de vazios após o processo de desorção da água retida internamente.

Os resultados entre os matérias diferem-se para misturas com menores relações A/C, onde o polímero resulta em menores reduções de resistência.

Na relação a/c 0,40, os resultados obtidos foram praticamente os mesmo para os materiais testados.

- Módulo de elasticidade:

Os resultados de módulo de elasticidade apresentaram desvio padrão altos para as misturas utilizando PSA, isso pode ser atribuído à dispersão do polímero na amostra retirada para o ensaio.

Porém como esperado, aos ser incorporado os agentes de cura interna, o módulo de elasticidade diminuiu. Sendo que as misturas com argila expandida apresentaram menores valores desta propriedade e, este decréscimo é proporcional ao teor utilizado.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

Os materiais testados neste trabalho exerceram sua função quanto ao controle da retração para todas as variações aqui estudadas. A interferência da utilização de PSA nas propriedades mecânicas das misturas foi menor, mostrando assim que a utilização deste material se mostra mais vantajoso do que a argila expandida.

Quanto ao teor de adição a ser utilizado, através da análise dos resultados obtidos, é possível perceber que os teores de 0,25% e 0,50% se mostram boas soluções, uma vez que possuem bons resultados quanto ao combate à retração para as três relações A/C estudadas.

O teor de 1,0% apresentou melhor combate à retração em algumas situações, porém não em magnitude significativa e a perda de resistência e resistividade elétrica ao utilizar este percentual é muito significativa.

Quanto à utilização de argila expandida, o teor de 5% se mostra mais vantajoso pois resulta em menor perda de desempenho quanto às propriedades mecânicas e durabilidade.

Vale lembrar que o desempenho do material varia de acordo com a relação A/C que se está trabalhando.



## **7           SUGETÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

---

- Caracterizar a absorção e desorção do PSA em solução com pH semelhante à do concreto;
- Caracterizar melhor o PSA;
- Testar PSA com diferentes características microscópicas;
- Testar outras matérias com potencial de armazenamento de água como agente de cura interna em concretos;

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522 – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** ABNT, Rio de Janeiro (2008).

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1 – Concreto autoadensável: Classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro: ABNT, (2010).

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2 – Concreto autoadensável: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – método cone de Abrams.** Rio de Janeiro: ABNT, (2010).

\_\_\_\_\_. **NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-5 – Concreto autoadensável: Determinação da viscosidade – Método do Funil V.** Rio de Janeiro: ABNT, (2010).

\_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AÏTCIN, P.-C.; NEVILLE, A.M.; ACKER, P. **Integrated View of Shrinkage Deformation,** Concrete International, V. 19, No. 9, September 1997, pp. 35-41.

AÏTCIN, P.-C. **Curing high performance concrete to minimize shrinkage.** In: High-performance concrete Series 5. 1 ed. E. & FN Spon, 1998, p. 311- 337.

ALMUSALLAM, A., KHAN, F. M. AND MASLEHUDDIN, M., **Performance of concrete coatings under varying exposure conditions,** Materials and Structures, vol. 35, September-October, 2002, p 487-494.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 490: Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.** USA (2010), 5p.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 157: Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.** USA (2008).

\_\_\_\_\_. **ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** USA (2010).

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO TP 95: Standard Method of Test for Surface Resistivity of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** USA (2011).

BENTZ, D.P.; JENSEN, O.M.; HANSEN, K.K.; OLESEN, J.F.; STANG, H.; HAECKER, C.J. **Influence of Cement Particle Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials.** *Journal of the American Ceramic Society* 84 (1) (2001) 129-135.

ESPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete – Effects of fine aggregate and limestone filler.** Doctoral Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Building Technology, Chalmers University of Technology, 2007. 204pp.

ESPING, O.; LÖFGREN I. **Investigation of early age deformation in self-compacting concrete.** In: 2nd International Symposium on Advances in Concrete Science, 11-15 September, Quebec, Canada, 2006.

FREIDRICK, S. **Super absorbent polymers. (PSA).** In: V. MECHTCHERINE and REINHARDT, H.(Eds). Application of superabsorbent polymers (PSA) in concrete construction. RILEM State of the Art Reports 2, 2012.

GLEIZE P.-J.-P., CYR M., ESCADEILLAS G. **Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes.** In: Cement and Concrete Composites, Volume 29, Issue 2, February 2007, Pages 80-87.

HANSEN, T.C. **Physical structure of hardened cement paste. A classical approach.** *Materials and Structures*. 19 (114) (1986) p. 423-436.

HASPARYK, N. P. et al. **Deformações por retração e fluência**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). *Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v.2, p. 655-665.

JENSEN, O.M. **Autogenous phenomena in cement-based materials**. University of Denmark, August, 2005, pp. 188.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste**. *ACI Materials Journal*, V. 93, No. 6, 1996, p.539-543.

\_\_\_\_\_. **Autogenous deformation and RH-change in perspective**, *Cem Con Res* 31 (2001a) (12), pp. 1859–1865.

KOVLER, K.; JENSEN, O. M. **Novel techniques for concrete curing**. *Concrete International*, Vol: 27, No: 9, September 2005, P: 39 – 42.

KUMM, T.C. **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Agosto 2009.

MAILVAGANAM, N.P. **Miscellaneous admixtures**. In: Ramachandran, V. S. “Concrete admixtures handbook”. NoyesPublications, USA, 1984, pp. 480-497.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1.ed. São Paulo: PINI, 2008.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 183p. Dissertação – PPGEC, ECV, UFSC, Florianópolis, 2005.

MOHR, B.J., HOOD, K.L., BUCHANAN, G.R. **Mitigation of Autogenous Shrinkage in Mortars: Analysis and Modeling of Water Migration and Comparison of Various Internal Curing Materials**. In: *Proceedings of the International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, Lyngby,

Denmark, RILEM Proceedings PRO 52, Eds. Jensen, O.M., Lura, P., Kovler, K., 2006: 127-136.

MÖNNIG, S. **Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete.** In: Otto Graf Journal. "Annual Journal on Research and Testing of Materials" Vol.16, 2005.Universityof Stuttgart, p.193-202.

**W. G. Moravia, C. A. S. Oliveira, A. G. Gumieri, W. L. Vasconcelos.**Revista Cerâmica (2006). V.52, p.193-199.

NETO, C.S. **Agregados naturais, britados e artificiais para concreto.** In: Geraldo CechellaSaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011, v.1, p. 233-260.

NEVILLE, A.; AITCIN, P.C. **High performance concrete: an overview.** Materials and Structures, v.31, p.111-117, Mar. 1998.

POWERS, T.C. AND BROWNYARD, T.L. **Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste.**Bulletin 22, Research Laboratories. of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S., 1948.Reeditado por ACI - Concrete International, Agosto de 2003.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M. **Superplasticizers.** In: Ramachandran, V. S. "Concrete admixtures handbook". Noyes Publications, USA, 1984, pp. 211-268.

RAVINDRA, K.; HEWLETT, P. C. ; DYER, T. D. **Influence of microstructure on the physical properties of self-curing concrete.**ACI MaterialsJournalVol. 93. Sep-Oct, 1993. 7pp.

REPETTE, W. L. **Concretos de Última Geração: Presente e Futuro.** In: Geraldo CechellaSaia. (Org.). Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v. 2, p. 1509-1550.

REPETTE, W.L. **Concreto Autoadensável.** In: Geraldo CechellaSaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011,v.2, p.1769-1806.

REPETTE, W.L. **Concretos para Fins Especiais de Última Geração.** In: Geraldo CechellaIsaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011,v.2, p.1808-1841.

REPETTE, W.L. **Cimentos Especiais de Base Mineral.** In: Geraldo CechellaIsaia. (Org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2010,v.1, p.825-862.

REPETTE, W.L. ; MAILVAGANAM, N. **Prehydrated high-alumina cement-based admixture for compensating autogenous shrinkage in high-performance concrete.** In: Second CANMET/ACI International Conference on High Performance Concrete, 1999, Gramado. Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference - ACI SP 186, 1999.v. I. p. 39-57.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry.** London: Academic Press, **1990.** 474 p.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. **Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste.** Cement and Concrete Research, Volume 25, 1995, Pages 281-287.