



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

**USO DE ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO  
NO COMBATE À RETRAÇÃO EM ARGAMASSAS  
AUTO-ADENSÁVEIS DE ALTA RESISTÊNCIA**

**Juliana Corrêa de Freitas**

Florianópolis, dezembro de 2009



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

**USO DE ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO  
NO COMBATE À RETRAÇÃO EM ARGAMASSAS  
AUTO-ADENSÁVEIS DE ALTA RESISTÊNCIA**

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

**Juliana Corrêa de Freitas**

Florianópolis, dezembro de 2009.



**"USO DE ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO NO COMBATE  
À RETRAÇÃO EM ARGAMASSAS AUTO-ADENSÁVEIS DE  
ALTA RESISTÊNCIA"**

**JULIANA CORRÊA DE FREITAS**

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

---

Dr.-Ing. Janaíde Cavalcante Rocha - Coordenador do PPGEC

---

Prof. Dr. Wellington Longuini Repette - Orientador/Moderador

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Philippe Gleize – ECV/UFSC

---

Berenice Martins Toralles-Carbonari - ECV/UEL

---

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

**Florianópolis, 15 de dezembro de 2009**

*A Deus, porque Dele,  
por Ele e para Ele são  
todas as coisas.  
(Rm 11:36)*



*Se você deseja ver um arco-íris, precisa  
antes aprender a gostar da chuva.  
Paulo Coelho*

*“O inimigo mais perigoso que você  
poderá encontrar será sempre você  
mesmo.”  
Friedrich Wilhelm Nietzsche*



## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho especialmente ao Patrick, pela paciência, amor e disposição para me ajudar, seja nos fins de semana no laboratório, seja nas suas idéias, ou simplesmente por saber ouvir. Além de ser meu amor, meu companheiro para toda a vida e meu colega de profissão, foi o responsável por me dar coragem e me incentivar ao longo de todos estes anos.

Minha enorme gratidão aos meus pais, pelo amor, carinho e investimentos em minha educação, por vocês sempre acreditarem em mim mais do que eu mesma acredito. Agradeço a Deus todos os dias por ter uma família cheia de alegria, que não poderia ser mais “buscapé”. Às minhas irmãs que amo tanto Roberta, Andréa e Patrícia, que apesar da distância e dos poucos encontros, estes são intensos, e a saudade é muito grande. Ao meu sobrinho querido Pedro, e também meus cunhados Marcos e Fernando.

Sou grata à minha segunda família, meus sogros Lucy e Ademar e cunhados Rafael e Lene, pelo constante incentivo, força, ânimo e coragem, porque de vez em quando a gente precisa ouvir palavras de conforto para nos empurrar para frente.

Agradeço profundamente ao Prof. Dr. Wellington Longuini Repette, que me recebeu de braços abertos e confiou no meu trabalho. Ao longo de quase quatro anos de convivência, conquistou minha admiração por seu profissionalismo, conhecimento e competência.

À empresa Laude Engenharia e Ensaio de Materiais Ltda, na pessoa do Eng. Civil Mestre Carlos Eduardo Biz, que além de me incentivar, dispôs meus horários de trabalho para que eu pudesse estudar. E também por ser “co-orientador” de minha pesquisa, sempre aberto e interessado em minhas dúvidas. Também aos funcionários e ex-funcionários da Laude, que foram meus verdadeiros “bolsistas”, seja na preparação de argamassas, seja no carregamento de pesados materiais. Obrigada Célio, Gustavo, Abimael, Neuri e Rafael.

Agradeço ao GTec, na pessoa de seu coordenador o Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr., pelo espaço cedido para realização desta pesquisa e pelos equipamentos disponibilizados para o trabalho experimental. Muito obrigada Prudêncio pelos ensinamentos, comentários e idéias. A todos os outros membros e ex-membros do grupo que também contribuíram: Denis, Wilson, Diego, Eddy, Regina e Cintya. Meu agradecimento especial à Talita Campos Kumm, por me ajudar tanto, uma pessoa que merece muito sucesso, tudo de bom!

Ao grupo do GDA, que disponibilizou espaço para a medição de prismas. Em especial ao Eduardo e Narciso, pelas dicas e ajudas que tanto precisei.

À Prof. Dr.-Ing. Janaíde Cavalcante Rocha por disponibilizar o equipamento para o ensaio de tempo de pega.

Às empresas que doaram os materiais utilizados nesta pesquisa. À Sita Concrebras S.A., pelos agregados para as argamassas. À Votoran, pelo cimento doado através do CD Biguaçu. À BASF que forneceu o aditivo superplastificante. À Grace, pelo aditivo redutor de retração, na pessoa do Eng. Junior, que se prontificou e se interessou pelo meu trabalho assim que entramos em contato.

Enfim a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse concluído da melhor maneira possível.

Muito obrigada!

## RESUMO

Desde o início da década de 90, muito se tem pesquisado a respeito de concretos e argamassas auto-adensáveis. Uma de suas propriedades é a baixa relação água/cimento com o uso de superplastificantes, o que diminui a porosidade e a permeabilidade e torna este tipo de material um elemento de extrema importância no combate aos ataques de agentes agressivos que comprometem a durabilidade das estruturas. O concreto auto-adensável (CAA) é um concreto altamente fluido que tem a capacidade de preencher todos os espaços da estrutura uniformemente com a ausência de vibração, segregação e exsudação.

No entanto, muita atenção deverá ser dada no fenômeno da retração que acomete o CAA de baixa relação água/cimento. A retração tende a gerar tensões elevadas nos elementos restringidos, podendo resultar na fissuração dos mesmos. A cura inadequada pode gerar uma série de problemas, desde fissuras e empenamentos, até baixas resistências à abrasão. Porém, nem sempre a cura por si só consegue mitigar o fenômeno da retração. Dentre as medidas existentes de combate à retração, os aditivos redutores de retração (ARR) têm se mostrado eficientes por agirem diretamente na causa da retração, diminuindo a tensão dos poros capilares da estrutura cimentícia.

Foram utilizados diversos teores de aditivo redutor de retração e além da investigação do combate à retração, também foram avaliadas suas propriedades nos estados fresco e endurecido, e influência nos tempos de pega.

Os ensaios realizados mostraram a evidente eficácia do aditivo redutor de retração no combate à retração, em todos os teores utilizados. No entanto, devem ser avaliados os efeitos benéficos da redução da retração em virtude dos efeitos negativos nas demais propriedades no estado endurecido.



## ABSTRACT

Starting in the first years of the 1990s, quite a lot of research has focused on self-consolidating concrete and mortar. One of their characteristics is the low water-cement ratio they develop when a superplasticizer is added, which diminishes porosity and permeability and makes this kind of high-performance cementitious material into an element of extreme importance in the battle against the attacks of aggressive agents that put in risk the life span of structures. Self-consolidating concrete (SCC) is a highly flowable concrete that can spread into place under its own weight and achieve good consolidation in the absence of vibration without exhibiting defects due to segregation and bleeding.

Nevertheless, attention should be given to the shrinkage phenomenon which occurs to SCC of low water-cement ratio. Shrinkage tends to generate high tension in the elements restricted and may result in cracking. Inadequate concrete curing may lead to a series of problems, from cracking fissures and warping to low resistance to fire abrasion. However, it is not always curing in itself that is successful in mitigating shrinkage. Amongst existing measures of fighting against shrinkage, shrinkage-reducing admixtures have shown to be efficient in acting straight on the causes of shrinkage, diminishing capillary pore tension in the cementitious structure.

Various degrees of shrinkage-reducing admixtures were employed. Furthermore, apart from the investigation concerning the battle against shrinkage, its fresh and hardened state properties and influence on the setting time were also surveyed.

This research showed the evident efficacy of shrinkage-reducing admixtures, in all degrees. However, it's necessary the valuation of beneficial effects of shrinkage-reducing due to malefics effects on others hardened state properties.



# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>30</b>
1.1 Justificativa.....	30
1.2 Objetivos .....	31
1.3 Estrutura da pesquisa.....	31
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>34</b>
2.1 Concretos e argamassas auto-adensáveis à base de cimento Portland .....	34
2.1.1 Características no Estado Fresco.....	35
2.1.2 Características no Estado Endurecido .....	36
2.2 Retração.....	37
2.2.1 Mecanismos de retração .....	40
2.2.1.1 Depressão capilar (ou tensão capilar) .....	40
2.2.1.2 Variação da tensão superficial .....	42
2.2.1.3 Variação da pressão de desligamento .....	42
2.2.2 Retração Plástica.....	44
2.2.2.1 Mecanismos de ocorrência.....	46
2.2.2.2 Micro-estrutura .....	46
2.2.2.3 Materiais e fatores influentes .....	46
2.2.2.4 Retração plástica e a argamassa auto-adensável de alta resistência.....	47
2.2.2.5 Combate à retração plástica .....	47
2.2.3 Retração Autógena.....	48
2.2.3.1 Mecanismos de ocorrência.....	50
2.2.3.2 Micro-estrutura .....	51
2.2.3.3 Materiais e fatores influentes .....	52
2.2.3.4 Retração autógena x argamassa auto-adensável de alta resistência.....	54
2.2.3.5 Combate à retração autógena.....	54
2.2.3.6 Ensaios para a determinação da retração autógena .	55
2.2.4 Retração por Secagem.....	56
2.2.4.1 Mecanismos de ocorrência.....	56

2.2.4.2. Materiais e fatores influentes .....	57
2.2.4.3 Retração por secagem x argamassa auto-adensável de alta resistência .....	57
2.2.4.4 Combate à retração por secagem.....	58
2.3 Aditivos Redutores de Retração.....	58
2.3.1 Propriedades .....	60
2.3.1.1 Resistência à compressão.....	60
2.3.1.2 Tempos de pega .....	61
2.3.1.3 Micro-estrutura .....	62
2.3.1.4 Fatores Influentes .....	65
<b>3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>66</b>
3.1 Materiais .....	66
3.1.1 Cimento Portland.....	66
3.1.2 Água .....	67
3.1.3 Agregados.....	67
3.1.4 Aditivo superplastificante.....	68
3.1.5 Aditivo redutor de retração (ARR).....	68
3.2 Definição do programa experimental.....	69
3.2.1 Variáveis.....	69
3.2.1.1 Relação água/cimento (a/c).....	69
3.2.1.2 Aditivo redutor de retração (ARR) .....	69
3.2.2 Parâmetros fixos .....	70
3.2.2.1 Aditivo superplastificante .....	70
3.2.2.2 Proporcionamento e procedimento das misturas.....	71
3.2.3 Legenda e forma da análise dos resultados .....	72
3.2.4 Propriedades estudadas.....	73
3.2.4.1 Estado fresco.....	73
3.2.4.2 Estado endurecido .....	73
3.2.4.3 Resumo dos ensaios realizados .....	73
<b>4 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....</b>	<b>76</b>
4.1 Propriedades no estado fresco.....	76
4.1.1 Ensaio da mesa de abatimento – diâmetro de espalhamento .....	76
4.1.2 Ensaio do funil “V” – tempo de escoamento.....	77
4.1.3 Massa específica das argamassas auto-adensáveis .....	78

4.1.4	Ensaio de perda de trabalhabilidade.....	79
4.1.5	Tempo de pega.....	79
4.2	Acompanhamento da retração linear .....	80
4.2.1	Relógio comparador.....	80
4.2.2	Transdutores de deslocamento .....	84
4.3	Propriedades no estado endurecido .....	87
4.3.1	Resistência à compressão.....	87
4.3.2	Módulo de elasticidade .....	89
<b>5</b>	<b>– APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>92</b>
5.1	Propriedades no estado fresco .....	92
5.1.1	Ensaio da mesa de abatimento – diâmetro de espalhamento.....	92
5.1.2	Ensaio do funil “V” – tempo de escoamento .....	94
5.1.3	Massa específica das argamassas auto-adensáveis.....	96
5.1.4	Ensaio de perda de trabalhabilidade.....	97
5.1.4.1	Relação a/c 0,30.....	97
5.1.4.2	Relação a/c 0,35.....	98
5.1.4.3	Relação a/c 0,40.....	99
5.1.5	Tempo de pega.....	100
5.1.5.1	Relação a/c 0,30.....	101
5.1.5.2	Relação a/c 0,35.....	101
5.1.5.3	Relação a/c 0,40.....	102
5.1.5.4	Comentários.....	103
5.2	Acompanhamento da retração linear .....	103
5.2.1	Resultados obtidos pelo relógio comparador no quadro de retração.....	103
5.2.1.1	Relação a/c 0,30.....	104
5.2.1.2	Relação a/c 0,35.....	107
5.2.1.3	Relação a/c 0,40.....	110
5.2.1.4	Comparativos entre relações a/c .....	113
5.2.2	Resultados obtidos por transdutores de deslocamento na bancada de retração .....	114
5.2.2.1	Relação a/c 0,30.....	115
5.2.2.2	Relação a/c 0,35.....	116
5.2.2.3	Relação a/c 0,40.....	117
5.2.2.4	Comparativos entre relações a/c .....	118

5.3 Propriedades no estado endurecido.....	120
5.3.1 Resistência à compressão .....	120
5.3.3.1 Relação a/c 0,30 .....	120
5.3.1.2 Relação a/c 0,35 .....	121
5.3.1.3 Relação a/c 0,40 .....	122
5.3.2 Módulo de elasticidade.....	123
5.3.2.1 Relação a/c 0,30 .....	124
5.3.2.2 Relação a/c 0,35 .....	125
5.3.2.3 Relação a/c 0,40 .....	126
5.3.3 Comentários.....	127
<b>6 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>128</b>
6.1 Propriedades no estado fresco.....	128
6.2 Acompanhamento da retração linear .....	128
6.2.1 Relógio comparador .....	128
6.2.2 Transdutores de deslocamento .....	129
6.3 Propriedades no estado endurecido.....	129
6.3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	129
6.4 Sugestões para trabalhos futuros.....	130
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>132</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO C .....</b>	<b>150</b>
<b>ANEXO D .....</b>	<b>156</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>170</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Tipos de água associadas à estrutura do C-S-H – Modelo Feldman-Sereda (Metha e Monteiro, 1994) moléculas da água interlamelares (x), adsorvidas (o) e presentes nos poros capilares..... 40
- Figura 2 - Formação do menisco de equilíbrio entre a pressão de vapor atmosférica e a tensão superficial da água no tubo capilar de raio R..... 41
- Figura 3 - Movimento de entrada e saída de água entre as lamelas de C-S-H segundo o mecanismo de pressão de desligamento. .... 43
- Figura 4 - Representação esquemática do modelo de Munich em três diferentes estágios da estrutura interna da pasta de cimento endurecida. (Ferraris e Wittmann, 1987). Em (a) a pasta encontra-se no estado seco, onde todas as partículas estão sob compressão por tensão superficial. Em (b) a tensão superficial é reduzida pela adsorção das moléculas de água e o sistema tem uma expansão inicial. Em (c) a umidade relativa atinge um valor elevado e uma expansão adicional é causada por pressão de desligamento. .... 44
- Figura 5 - Curing Meter. O dispositivo, desenvolvido por Jensen e Hansen, possibilita a medida instantânea da taxa de evaporação e deve ser posicionado sobre a superfície da amostra (Kumm,T.C., 2009). .... 45
- Figura 6 - Fissuras por retração plástica no concreto fresco (Mehta e Monteiro, 1994). .... 45
- Figura 7 - Como curar o concreto para minimizar a sua retração (Aïtcin, 2000). .... 48
- Figura 8 - Relação entre retração autógena e retração química (Nawa e Horita, 2005). .... 50

Figura 9 - Auto-secagem pela contração de Le Chatelier (Hua et al, 1995). .....	50
Figura 10 - Representação esquemática da sessão transversal de uma pasta de cimento em processo de hidratação (Jensen e Hansen, 2001). À esquerda: baixo grau de hidratação. À direita: alto grau de hidratação. A matéria sólida (produtos da hidratação, cimento anidro, sílica ativa, etc.) é representada na cor cinza-escuro, a água dos poros em cinza claro e os poros vazios em branco. A linha pontilhada representa a circunferência original da seção. A figura ilustra as conseqüências do processo de hidratação.....	51
Figura 11 - Medidas de retração em função do tempo com e sem ARR (Collepari, 2005). .....	59
Figura 12 - Evaporação (e) da água para misturas com e sem ARR (Collepari, 2005). .....	60
Figura 13 - Comparativo resistências à compressão entre ARR, ARR+EXP e EXP (Maltese et al, 2005).....	61
Figura 14 - Difratomia de raio X – Comparativo entre ARR, ARR + EXP e EXP na formação de etringita e Portlandita . Em (a) difratometria após 2h de hidratação, em (b) difratometria após 24h de hidratação (Maltese et al, 2005). .....	63
Figura 15 - Grafias eletrônicas das pastas após 2 h de hidratação (Maltese et al, 2005). Em (a) 0% de ARR, em (b) 3% de EXP, em (c) 3% de ARR, em (d) 3% de ARR + 3% de EXP.....	64
Figura 16 - Ensaio da mesa de abatimento. Em a) preenchimento do recipiente. Em b) espalhamento da argamassa e medidas ortogonais d1 e d2. ....	77
Figura 17 - Ensaio do funil V. Em a) preenchimento do recipiente. Em b) escoamento da argamassa após aberta a portinhola inferior.....	78
Figura 18 - Recipiente para a realização do ensaio de massa específica.....	78

Figura 19 - Resistência à penetração (a) Corpos de prova moldados e protegidos no topo com plástico. (b) Penetrômetro com anel dinamométrico e agulha de seção circular imersa em argamassa. .... 80

Figura 20 - Modelo de molde utilizado para preparo dos corpos de prova submetidos aos ensaios de retração com relógio comparador. Os corpos de prova prismáticos são baseados no descrito pela ASTM C 490 - 04 (2003). Para o ensaio de retração com o transdutor de deslocamento o mesmo molde foi utilizado, no entanto com outros modelos de pinos..... 81

Figura 21 - (a) Molde metálico com forma plástica . (b) moldagem dos prismas. .... 82

Figura 22 - Medidas de retração com corpos de prova prismáticos com base no procedimento proposto pela ASTM C 490 -04 (2003). Em (a) calibração do relógio comparador com base na barra de referência. Em (b) quadro de medição com corpo de prova posicionado para leitura. Em destaque a flecha indicativa da rotação do corpo sobre o próprio eixo e a seta indicando a extremidade do prisma que deve ser sempre orientada para cima durante as medições. Em (c) corpos de prova em repouso sobre roletes, na posição em que permaneceram entre as medições. .... 83

Figura 23 - Bancada de retração composta de moldes metálicos e transdutores de deslocamento. Em a) vista da bancada com amostra em ensaio. Em b) contato entre pino e transdutor ..... 86

Figura 24 - Esquema da bancada de retração..... 87

Figura 25 - (a) Moldagem dos corpos de prova sem adensamento. (b) Proteção com plástico no topo dos corpos de prova. .... 88

Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão axial. .... 88

Figura 27 - Ensaio de módulo de deformação: Aparato utilizado para realização do ensaio em corpos de prova cilíndricos, 5 x 10 cm. .... 90

Figura 28 - Diâmetro de espalhamento das AAA. Em a) relação a/c 0,30. Em b) relação a/c 0,35. Em c) relação a/c 0,40. .... 93

Figura 29 - Tempo de escoamento das AAA. Em a) relação a/c 0,30. Em b) relação a/c 0,35. Em c) relação a/c 0,40. ....	95
Figura 30 - Massa específica das AAA. Em a) relação a/c 0,30. Em b) relação a/c 0,35. Em c) relação a/c 0,40.....	97
Figura 31 - Perda de fluidez das AAA - relação a/c 0,30. Em a) Diâmetro de espalhamento. Em b) Tempo de escoamento. ....	98
Figura 32 - Perda de fluidez das AAA - relação a/c 0,35. Em a) Diâmetro de espalhamento. Em b) Tempo de escoamento. ....	99
Figura 33 - Perda de fluidez das AAA - relação a/c 0,40. Em a) Diâmetro de espalhamento. Em b) Tempo de escoamento. ....	100
Figura 34 - Retração autógena – relação a/c 0,30 - medidas realizadas com o relógio comparador.....	106
Figura 35 - Variação da retração autógena – relação a/c 0,30, em função do teor de aditivo, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....	107
Figura 36 - Retração autógena – relação a/c 0,35 - medidas realizadas com o relógio comparador.....	109
Figura 37 - Variação da retração autógena – relação a/c 0,35, em função do teor de aditivo, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....	110
Figura 38 - Retração autógena – relação a/c 0,40 - medidas realizadas com o relógio comparado. ....	112
Figura 39 - Variação da retração autógena – relação a/c 0,40, em função do teor de aditivo, nas idades de 3, 7 e 28 dias.....	112
Figura 40 - Comparativo de desempenho em relação às misturas de referência (%) do ARR entre as relações a/c pelo ensaio do relógio comparador no quadro de retração. Em a) 3 dias. Em b) 7 dias Em c) 28 dias. ....	114
Figura 41 - Evolução da retração autógena - relação a/c 0,30. Medidas tomadas por transdutores de deslocamento. ....	115

Figura 42 - Evolução da retração autógena - relação a/c 0,35. Medidas tomadas por transdutores de deslocamento. ....	116
Figura 43 - Evolução da retração autógena - relação a/c 0,40. Medidas tomadas por transdutores de deslocamento. ....	117
Figura 44 - Comparativo de desempenho (%) do ARR entre as relações a/c pelo ensaio do transdutor de deslocamento na bancada de retração. ....	119
Figura 45 - Comparativo de desempenho (%) do ARR entre as relações a/c pelo ensaio do transdutor de deslocamento na bancada de retração - Medidas tomando-se como o comprimento de referência (inicial) a idade de 1 dia. ....	119
Figura 46 - Resistência à compressão – relação a/c 0,30. ....	121
Figura 47 - Resistência à compressão – relação a/c 0,35. ....	122
Figura 48 - Resistência à compressão – relação a/c 0,40. ....	123
Figura 49 - Módulo de Elasticidade – relação a/c 0,30. ....	124
Figura 50 - Módulo de Elasticidade – relação a/c 0,35. ....	125
Figura 51 - Módulo de Elasticidade – relação a/c 0,40. ....	126
Figura 52 - Retração autógena – relação a/c 0,30. Em (a) 0,30-REF. (b) 0,30-1% (c) 0,30-1,5% (d) 0,30-2%. ....	140
Figura 53 - Retração autógena – relação a/c 0,35. Em (a) 0,35-REF. (b) 0,35-1% (c) 0,35-1,5% (d) 0,35-2%. ....	146
Figura 54 - Retração autógena – relação a/c 0,40. Em (a) 0,40-REF. (b) 0,40-1% (c) 0,40-1,5% (d) 0,40-2%. ....	152



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio para avaliar as propriedades básicas de um CAA (Repette, 2005).....	35
Tabela 2 - Tipos de Retração (adaptado de Bastos, 2001).....	38
Tabela 3 - Comparativo de tempo de pega entre ARR, ARR +EXP e EXP (Maltese et al, 2004).....	61
Tabela 4 - Características físicas do cimento. Dados fornecidos pelo fabricante. Cimento do tipo CPV-ARI-RS.....	66
Tabela 5 - Características químicas do cimento. Dados fornecidos pelo fabricante. Cimento do tipo CPV-ARI-RS.....	67
Tabela 6 - Ensaio de espalhamento em argamassa .....	68
Tabela 7 - Caracterização do aditivo superplastificante. Dados fornecidos pelo fabricante.....	68
Tabela 8 - Nomenclatura das misturas estudadas, a/c e teores de ARR.....	70
Tabela 9 - Procedimentos de mistura das argamassas.....	72
Tabela 10 - Tempos de início e fim de pega - relação a/c 0,30.....	101
Tabela 11 - Tempos de início e fim de pega - relação a/c 0,35.....	102
Tabela 12 - Tempos de início e fim de pega - relação a/c 0,40.....	102
Tabela 13 - Variação de massa dos corpos de prova submetidos ao ensaio de retração com relógio comparador. Variação aos 28 dias. Valores negativos indicam a perda de massa.....	104
Tabela 14 - Equações de correlação logarítmica para expressar a retração autógena em função da idade e respectivos coeficientes de	

determinação. Valores de retração autógena aos 3, 7 e 28 dias -  
relação a/c 0,30..... 105

Tabela 15 - Redução da retração aos 3, 7 e 28 dias – relação a/c 0,30 107

Tabela 16 - Equações de correlação logarítmica para expressar a  
retração autógena em função da idade e respectivos coeficientes de  
determinação. Valores de retração autógena aos 3, 7 e 28 dias -  
relação a/c 0,35..... 108

Tabela 17 - Redução da retração aos 3, 7 e 28 dias – relação a/c 0,35.109

Tabela 18 - Equações de correlação logarítmica para expressar a  
retração autógena em função da idade e respectivos coeficientes de  
determinação. Valores de retração autógena aos 3, 7 e 28 dias -  
relação a/c 0,40..... 111

Tabela 19 - Redução da retração aos 3, 7 e 28 dias – relação a/c 0,40 113

Tabela 20 - Redução da retração aos 3 dias – relação a/c 0,30 ..... 116

Tabela 21 - Redução da retração aos 3 dias – relação a/c 0,35 ..... 117

Tabela 22 - Redução da retração aos 3 dias – relação a/c 0,40 ..... 118

Tabela 23 - Queda resistência à compressão em relação à mistura de  
referência – relação a/c 0,30..... 121

Tabela 24 - Queda resistência à compressão em relação à mistura de  
referência – relação a/c 0,35..... 122

Tabela 25 - Queda resistência à compressão em relação à mistura de  
referência – relação a/c 0,40..... 123

Tabela 26 - Queda do módulo de elasticidade em relação à mistura  
de referência – relação a/c 0,30..... 124

Tabela 27 - Queda do módulo de elasticidade em relação à mistura  
de referência – relação a/c 0,35..... 125

Tabela 28 - Queda do módulo de elasticidade em relação à mistura  
de referência – relação a/c 0,40..... 126

Tabela 29 - Redução de resistência e módulo de elasticidade x Redução da retração.....	127
Tabela 30 - Relação a/c 0,30 - Retração média medida com relógio comparador aos 3 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	141
Tabela 31 - Relação a/c 0,30 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	142
Tabela 32 - Relação a/c 0,30 - Retração média medida com relógio comparador aos 28 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	143
Tabela 33 - Relação a/c 0,35 - Retração média medida com relógio comparador aos 3 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	147
Tabela 34 - Relação a/c 0,35 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	148
Tabela 35 - Relação a/c 0,35 - Retração média medida com relógio comparador aos 28 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	149
Tabela 36 - Relação a/c 0,40 - Retração média medida com relógio comparador aos 3 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	153
Tabela 37 - Relação a/c 0,40 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	154
Tabela 38 - Relação a/c 0,40 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan .....	155
Tabela 39 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas .....	170



# 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

O concreto auto-adensável está largamente difundido no mundo por apresentar excelente desempenho tanto no estado fresco como no estado endurecido, melhor trabalhabilidade, maior resistência e durabilidade (Jensen e Hansen, 2001).

No entanto, para assegurar suas propriedades, este tipo de concreto requer procedimentos e ensaios mais cuidadosos (Tviksta, 2000). Além disso, apresenta alguns aspectos negativos no que diz respeito ao aparecimento de fissuras devido à retração. (Cusson e Hoogeveen, 2007). A retração induz a tensões de tração no concreto que causa fissuras quando o concreto ainda não tem resistência suficiente para resistir a estas tensões.

Para o CAA de alta resistência, o principal tipo de retração que os acomete é a retração autógena, devido a pouca quantidade de água e a rápida hidratação do cimento. A eficácia das formas de combate à retração autógena é limitada, pois nem sempre por si só a cura úmida ou química são suficientes. Formas de combate à retração mais intensas, como o uso de aditivos redutores de retração, compensadores de retração e polímeros superabsorventes para realizar a cura interna são métodos efetivos no combate à retração e podem contribuir para a produção de edificações de melhor qualidade (Repette, 2005).

Como a presença de agregados graúdos limita a intensidade da retração, foram avaliadas neste estudo amostras de argamassas auto-adensáveis (AAA), para que seja possível observar o fenômeno da retração de forma mais clara. A bibliografia para concretos auto-adensáveis é vasta, mas o mesmo não ocorre para argamassas auto-adensáveis. Deste modo, a pesquisa realizada para concretos auto-adensáveis é aplicada para as argamassas e, da mesma forma, os resultados dos ensaios realizados em argamassas poderão ser aplicados aos concretos, já que a única diferença seria a ausência do agregado graúdo.

Não foram encontrados na bibliografia ensaios de combate à retração utilizando o aditivo redutor de retração em materiais (concretos ou argamassas) auto-adensáveis. Pouco se sabe sobre a compatibilidade entre estes dois tipos de aditivos, quais as influências no estado fresco e

no estado endurecido das argamassas quando utilizados simultaneamente.

Esta dissertação faz parte de um contexto de pesquisas sobre o tema da retração em materiais à base de cimento Portland e cimentos especiais coordenado pelo Prof. Dr. Wellington Longuini Repette em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da UFSC. Estas pesquisas abordam a caracterização do fenômeno e o emprego de soluções mitigadoras à retração, dentre os quais o uso de aditivos compensadores de retração, cura interna por polímeros de supersaturação, cura externa (cura química) e uso de aditivo redutor de retração.

Para esta pesquisa, foi eleito o uso do aditivo redutor de retração como estratégia de combate ao fenômeno da retração.

## **1.2 Objetivos**

O principal fim deste trabalho é avaliar a eficiência do aditivo redutor de retração no combate à retração autógena em argamassas auto-adensáveis confeccionadas à base de cimento Portland e aditivo à base de policarboxilato.

Os objetivos específicos deste trabalho são investigar as influências do aditivo redutor de retração nas seguintes propriedades:

- no estado fresco: tempo de trabalhabilidade e aplicação das AAA;
- retardo ou aceleração do tempo de pega;
- no estado endurecido: redução dos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

## **1.3 Estrutura da pesquisa**

O trabalho está organizado em seis capítulos, descritos a seguir:

No primeiro capítulo encontra-se a introdução com justificativa da pesquisa, mostrando a necessidade da realização de estudos que ampliem o conhecimento do mecanismo de ação dos aditivos redutores no combate à retração, além de estabelecer os objetivos e a estruturação deste trabalho.

O segundo capítulo contém uma ampla revisão bibliográfica sobre o fenômeno da retração, seus mecanismos de atuação, conceitos e definições, influência de materiais e como afeta as argamassas e concretos auto-adensáveis. Também são apresentados aditivos redutores de retração e suas influências na microestrutura nos materiais a base de

cimento Portland. A bibliografia sobre o CAA é vasta, e foi utilizada para caracterizar também o MCAA, pois como estes materiais são semelhantes, espera-se que os resultados observados no MCAA sejam análogos aos resultados possíveis de serem encontrados no CAA.

O terceiro capítulo descreve o programa experimental estabelecido de acordo com as propriedades e os fenômenos pretendidos. São apresentados os materiais, os métodos utilizados e as variáveis analisadas.

O quarto capítulo apresenta detalhadamente os procedimentos de ensaio e seus registros fotográficos.

No quinto capítulo consta a apresentação dos resultados, analisados estatisticamente.

O sexto capítulo contém as considerações finais, comentários e sugestões para trabalhos futuros.

Ao final dos capítulos, encontram-se as referências bibliográficas e os anexos com as tabelas, quadros e resultados de ensaios para a melhor compreensão do exposto.



## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Ao longo deste capítulo serão apresentadas as revisões bibliográficas (pesquisas realizadas com base em livros, artigos publicados, dissertações, teses, entre outros) sobre os principais temas pertinentes a esta dissertação. São eles:

- Concretos e argamassas auto-adensáveis à base de cimento Portland;
- Retração;
- Aditivo Redutor de Retração.

### **2.1 Concretos e argamassas auto-adensáveis à base de cimento Portland**

No Japão, durante muitos anos, o foco de maior interesse de pesquisa foi o problema da durabilidade das estruturas de concreto devido à falta de mão-de-obra experiente e capacitada. Foi por este motivo que os japoneses desenvolveram um concreto que não mais dependeria desta mão de obra, um concreto que não necessitaria de adensamento e preencheria as fôrmas apenas com seu peso próprio (Okamura e Ouchi, 2003). O desenvolvimento do concreto auto-adensável (CAA) foi um marco na história da tecnologia do concreto de cimento Portland e desde que o professor Okamura da Universidade de Tóquio o produziu pela primeira vez, as pesquisas a seu respeito não cessaram.

O CAA ainda é considerado um concreto especial e, por este motivo, atualmente é pouco utilizado no mercado mundial. Para reverter esta posição, o processo de produção deverá ser normalizado através da definição de método de dosagem e ensaios. Porém, na Europa e no Japão, seu emprego nos setores de pré-moldados e pré-fabricados é maior a cada dia (Repetto, 2005).

Os CAA possuem muitas vantagens em relação ao concreto convencional, entre elas destacam-se: rapidez do espalhamento, ausência de vibração e conseqüentemente diminuição de ruídos, possibilidade de preenchimento de espaços com difícil acesso ou grande taxa de armadura, menor quantidade de mão de obra, superfícies com bom acabamento aparente, melhor qualidade do concreto devido à baixa

porosidade e baixa relação água/cimento e possibilidade de criação de elementos estruturais de diferentes formatos.

Uma das características do CAA é a resistência à segregação. Porém, como o objeto de estudo deste trabalho é a argamassa auto-adensável, o combate à segregação não é tão intenso, admitindo-se a dosagem de finos e aditivos promotores de viscosidade em menor quantidade.

### 2.1.1 Características no Estado Fresco

O CAA pode ser produzido nas mesmas centrais e com os mesmos materiais empregados na produção de concretos convencionais. Suas características que o diferem dos concretos convencionais são a alta fluidez e estabilidade, resistindo à segregação e à exsudação, e a capacidade de preenchimento de espaços e de passar por restrições apenas com seu peso próprio sem o auxílio de adensamento manual ou mecânico. (Repette, 2005 e Tviksta, 2000). Por este motivo, os ensaios a serem realizados no CAA não são os mesmos do concreto convencional, pois para um CAA deve-se garantir que estas três condições sejam atendidas no estado fresco.

Dentre os diversos ensaios propostos, destacam-se, por serem de uso mais difundido, os ensaios apresentados na Tabela 1 (Repette, 2005):

Tabela 1 - Ensaios para avaliar as propriedades básicas de um CAA (Repette, 2005)

<b>Propriedades básicas</b>	<b>Ensaios</b>
Habilidade de preenchimento dos espaços	Ensaio de espalhamento
Habilidade de passar por restrições	Ensaios no funil V e ensaios das caixas L e U
Capacidade de resistir à segregação	Não há ainda um método de ensaio consagrado

Dentre as propriedades mais utilizadas para a avaliação da argamassa auto-adensável estão o espalhamento na mesa de abatimento (cone e mesa de ensaio de argamassa), e de escoamento no funil V. Estes ensaios serão descritos no terceiro capítulo, por fazer parte dos métodos de ensaio do presente estudo.

As características do CAA são muito influenciadas pelas suas propriedades reológicas, baseada na tensão de escoamento e na viscosidade plástica. A tensão de escoamento consiste na tensão de cisalhamento mínima necessária para que o escoamento se inicie, relacionada ao estado de floculação ou dispersão das partículas. Já a viscosidade representa o declive da reta no gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento, sendo um indicativo da estabilidade da mistura (Banfill, 1994). Não foram avaliadas as propriedades reológicas das argamassas neste trabalho, sendo esta tarefa uma das sugestões para trabalhos futuros, pois os equipamentos para tais avaliações não pertencem à unidade de estudo presente.

### **2.1.2 Características no Estado Endurecido**

*Resistência à compressão:* O comportamento do CAA à resistência à tração e à compressão é bastante similar à dos concretos convencionais (Repette, 2005 e Tviksta, 2000). A baixa relação de água/cimento e o emprego de superplastificantes resultam em resultados maiores de resistência à compressão quando comparado com os concretos e argamassas convencionais. (Holschemacher, 2004).

*Microestrutura:* Em geral, o CAA possui em sua composição adição de finos, o que proporciona uma microestrutura homogênea, com boa distribuição granulométrica, promovendo maior retenção da água, favorecendo o processo de hidratação do cimento e tornando a zona de transição mais densa (Holschemacher, 2004).

*Retração/Fluência:* Como o teor de pasta nos CAA geralmente é maior do que nos concretos convencionais, há uma maior preocupação em relação à retração e à fluência, porém, isto não é um consenso entre os pesquisadores, pois um teor elevado de pasta nem sempre está vinculado a um teor elevado de cimento, já que num CAA geralmente há a adição de outros tipos de finos (Repette, 2005).

*Durabilidade:* Os resultados em relação à durabilidade sugerem que no CAA a superfície é mais densa, resistente e menos permeável do que num concreto convencional, o que dificulta a entrada de agentes agressivos (Holschemacher, 2004, Repette, 2005 e Tviksta, 2000).

*Aderência:* Com a adição de finos, há menos água livre para se acumular na interface com o aço em decorrência do efeito parede e há

maior homogeneidade do concreto na interface com a armadura (Sharendahl, 2003 apud Repette, 2005).

*Módulo de deformação:* No CAA, os agregados são empregados em menores proporções. Como o módulo de deformação do concreto está diretamente ligado ao módulo de deformação de cada um dos materiais que o compõe, o resultado tende a ser reduzido se comparado a concretos convencionais (Holschemacher, 2004).

## **2.2 Retração**

É um consenso na literatura que os materiais cimentícios sofrem reduções de volume, denominadas retrações, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido que são causados por diversos fatores. Em sua maioria, a perda de água é a principal causa da retração desses materiais. Após o lançamento, estes materiais geralmente são submetidos à umidade relativa inferior a 100%, favorecendo a perda de água e contribuindo, assim, para o fenômeno da retração.

A retração e fissuração estão sempre associadas. A retração sempre vai ocorrer, em menor ou maior intensidade, ocasionando o risco de fissuração, que dependerá, dentre outros, das dimensões da peça, da resistência do material, do grau de restrição às deformações e principalmente da tendência do material em retrair (Neville, 1997).

A retração medida corresponde a uma combinação de diversas retrações elementares. Para compreender a origem e as causas principais de cada uma dessas retrações elementares, é essencial entender as reações de hidratação e as suas conseqüências físicas, termodinâmicas e mecânicas (Aitcin, 2000). Como cada um destes fenômenos ocorre em magnitude e tempo particulares, dependendo dos materiais e proporções utilizados nas misturas e quais as condições de exposição ao ambiente, para cada tipo de retração há uma forma específica de combate. Por isso, é tão importante saber classificar as causas destes tipos de retração e, dependendo do tipo de material cimentício utilizado, utilizar a melhor forma de combate à retração de modo a prevenir o aparecimento de fissuras.

Bastos (2001) sugere uma classificação para os tipos de retração, sobre quatro aspectos: quanto ao estado físico da mistura, quanto à natureza do fenômeno, quanto ao grau de restrição do material e quanto à permanência do fenômeno. Um resumo das classificações apresentadas por este autor pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de Retração (adaptado de Bastos, 2001)

Quanto ao ESTADO FÍSICO do material	Quanto à NATUREZA DO FENÔMENO	Quanto ao GRAU DE RESTRIÇÃO do material	Quanto à PERMANÊNCIA do fenômeno
Retração plástica (no estado fresco)	Retração hidráulica Retração química Retração autógena	Retração livre	Retração reversível
Retração no estado endurecido	Retração térmica Retração por carbonatação	Retração restringida	Retração irreversível

Para entender o mecanismo de funcionamento dos vários tipos de retração, é imprescindível uma abordagem sobre os vazios contidos dentro de uma estrutura de concreto e também sobre as diversas formas em que a água se encontra distribuída dentro destes vazios.

#### ***Tipos e Distribuição de vazios:***

- Espaço interlamelar do C-S-H – Corresponde em torno de 28% do volume da estrutura do C-S-H e possuem tamanhos da ordem de 0,5 a 2,5nm. Este tamanho de vazio é muito pequeno para influenciar à resistência e permeabilidade da pasta. No entanto, a remoção da água retida nestes espaços pode contribuir para a retração (Metha e Monteiro, 1994).

- Vazios capilares – são os espaços entre os componentes sólidos da pasta (produtos hidratados e anidros). Para pastas com baixa relação água/cimento e bem hidratadas, seu tamanho pode variar entre 10 e 50 nm. Já em pastas recentes (feitas há pouco tempo) e com relação água/cimento elevada, estas dimensões podem atingir de 3 a 5  $\mu\text{m}$ . Desta maneira, o volume e tamanho destes poros variam com o tempo (grau de hidratação), sendo também função da distância inicial entre os grãos de cimento. Na literatura, há um consenso da maior importância da distribuição destes poros e não da porosidade capilar total. O tamanho de 50 nm tem sido sugerido como o limite entre os poros que afetam à resistência e à permeabilidade – macroporos - e os poros que influenciam primordialmente a retração - microporos (Metha e Monteiro, 1994).

- Ar incorporado – Este vazio é geralmente esférico e a origem mais comum é a incorporação proposital de ar ou o aprisionamento acidental durante o processo de mistura. O ar incorporado possui tamanhos de 50 e 200 $\mu$ m e o ar aprisionado chega a cerca de 3 mm. Assim, ambos são maiores que os vazios capilares, podendo afetar principalmente a resistência e a permeabilidade (Metha e Monteiro, 1994).

### ***Tipos de combinação de água:***

A quantidade de água presente no concreto ou argamassas endurecidos depende, dentre outros, da umidade do ambiente em que a peça está inserida. Assim como há diferentes formas e tamanhos de poros, a água também pode estar presente sob diferentes circunstâncias. Segundo Neville (1997) e Metha e Monteiro (1994), a água pode ser classificada de acordo com a facilidade com que é removida da pasta, conforme a seguir:

- Água capilar – É a água que fica retida nos poros capilares. Nos macroporos (>50nm), esta água pode ser considerada livre, pois não sofre ação das forças superficiais da fase sólida, podendo assim entrar e sair da pasta sem proporcionar variações volumétricas consideráveis. Já a água contida nos microporos (5 a 50 nm) é retida por tensão capilar e sua remoção geralmente causa retração. Segundo Neville (1997), toda a água capilar já foi removida quando a umidade relativa ambiente atinge valores abaixo de 45 %.

- Água adsorvida – Esta água encontra-se aderida nas paredes do sólido da pasta, geralmente do C-S-H, por forças superficiais (ligações de Van der Walls), podendo formar uma ou poucas camadas. De acordo com Metha e Monteiro (1994), as camadas de moléculas de água mais afastadas das paredes podem ser removidas com umidades relativas do ambiente de 30%. A remoção deste tipo de água é uma das principais causas da retração.

- Água interlamelar (ou intersticial) – Encontra-se retida entre as superfícies das lâminas sobrepostas que formam o C-S-H, em camada monomolecular, ligada a paredes por pontes de hidrogênio. Esta água permanece dentro da pasta mesmo a umidades relativas ambientes bem baixas. Metha e Monteiro (1994) apresentam valores de umidade relativa ambiente da ordem de 11% para a remoção deste tipo de água que, segundo os autores, gera forte retração da estrutura do C-S-H.

- Água combinada – É a água combinada quimicamente e constitui uma parte definida nos compósitos hidratados. Assim, este tipo de água só pode ser removido sobre severas condições as quais se decompõe os produtos hidratados.

Segundo o modelo de Feldman-Sereda para o C-S-H, os diferentes tipos de água associados estão ilustrados na Figura 1 (Taylor, 1990; Metha e Monteiro, 1994 e Neville, 1997)

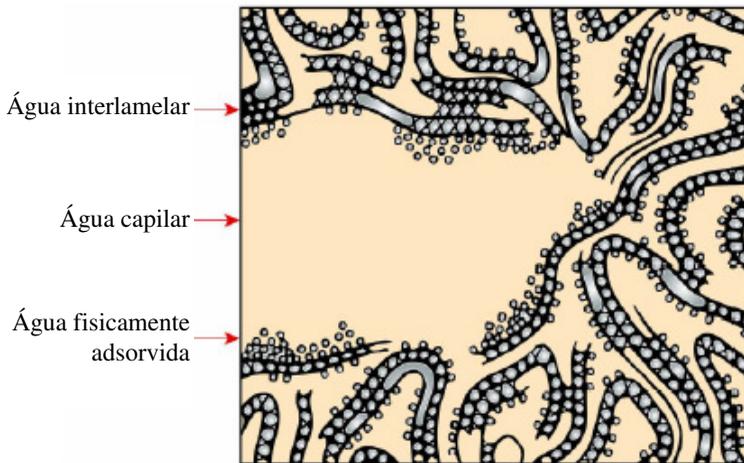


Figura 1 - Tipos de água associadas à estrutura do C-S-H – Modelo Feldman-Sereda (Metha e Monteiro, 1994) moléculas da água interlamelares (x), adsorvidas (o) e presentes nos poros capilares.

## 2.2.1 Mecanismos de retração

Na literatura, existem três mecanismos para explicar a retração (Hua et al, 1995).

### 2.2.1.1 Depressão capilar (ou tensão capilar)

A tensão capilar é aquela à qual está submetido o líquido no interior de um poro capilar semi-saturado. Quando o líquido evapora, as tensões nos meniscos são transferidas para as paredes do poro, que tende a retrair (Taylor, 1990), conforme apresentado na Figura 2:

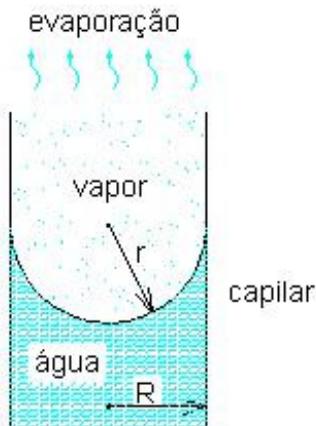


Figura 2 - Formação do menisco de equilíbrio entre a pressão de vapor atmosférica e a tensão superficial da água no tubo capilar de raio R.

Segundo Hua et al (1995), este mecanismo é deduzido da Equação 1 - Lei de Kelvin e Equação 2 - Lei de Laplace:

$$p_c - p_v = \frac{RT \ln(h)}{Mv}$$

Equação 1 - Lei de Kelvin

$$p_c - p_v = \frac{\sigma}{(1/r + 1/R)}$$

Equação 2 - Lei de Laplace

onde:

$p_c$  = pressão da água;

$p_v$  = pressão do vapor de água;

R = constante geral dos gases perfeitos;

T = temperatura;

M = massa de um mol de água;

v = volume específico da água;

h = umidade relativa;

$\sigma$  = tensão superficial na interface água / vapor de água;

r = raio de curvatura do menisco;

R = raio de curvatura do capilar.

De acordo com as leis de Kelvin e Laplace, quanto menor a umidade relativa do ambiente, menor será o raio de curvatura do menisco “ $r$ ”, e maior será a diferença de pressão entre a fase líquida e a fase gasosa dentro do capilar (depressão capilar). Desta forma, para manter o equilíbrio, os vasos seriam contraídos e haveria retração. Fica subentendido também que, para cada UR, há um tamanho limite de poro para o qual pode haver água em equilíbrio. Assim, os poros perderiam água, dos maiores para os menores, à medida que a umidade relativa fosse diminuindo.

No entanto, Hua et al (1995) afirmam que estas leis são macroscópicas e este sistema seria adequado somente para raios de curvatura do menisco maiores que 50 nm e umidades relativas acima de 80%. Já Taylor (1990) afirma que este efeito é significativo quando a umidade relativa está entre 45 e 90%. O autor acredita que acima de 90% os poros que seriam esvaziados são grandes demais criando tensões insignificantes e abaixo de 45% um menisco estável não poderia ser formado.

### **2.2.1.2 Variação da tensão superficial**

Este modelo enfatiza a variação da tensão superficial dos elementos sólidos da pasta. É resultante do desequilíbrio de forças superficiais dos materiais, decorrente de cargas não neutralizadas presentes na superfície (Melo Neto, 2002). A estrutura interna é comprimida pelos átomos da superfície dos elementos sólidos que, por terem ligações incompletas, rearrajam-se criando uma tensão superficial parecida com àquela presente nos líquidos. Esta compressão poderá ser aliviada quando outro elemento (como exemplo, a água) for adsorvido pela superfície do sólido, por ligações de Van der Waals. Porém, quando há a dessorção destas moléculas, as tensões de compressão aparecerão, causando a retração (Hua et al, 1995).

Estas moléculas de água adsorvidas podem estar em uma ou várias camadas. Taylor afirma que a maior tensão ocorre quando a última camada adsorvida é removida, com umidade relativa em torno de 20%.

### **2.2.1.3 Variação da pressão de desligamento**

Este mecanismo ocorre entre duas moléculas sólidas, muito próximas, na presença de água adsorvida entre elas. Se a umidade relativa é alta, a adsorção da água tende a separar as duas superfícies

sólidas, através da pressão repulsiva entre elas (Hua et al, 1995). Quando a umidade relativa é baixa, a água tende a evaporar, e a pressão de desligamento torna-se nula, contraindo o sistema. Quando a água retorna, o efeito é contrário, ocorrendo a expansão. Os efeitos deste modelo são observados na Figura 3, baseada no modelo da estrutura de C-S-H proposto por Feldman e Sereda, 1968.

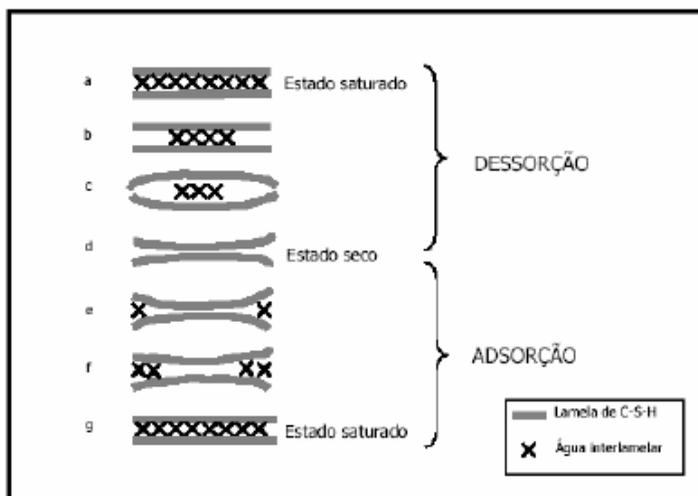


Figura 3 - Movimento de entrada e saída de água entre as lamelas de C-S-H segundo o mecanismo de pressão de desligamento.

Segundo o modelo de Munich, apresentado por Ferraris e Wittmann (1987) e Taylor (1990), para umidades relativas abaixo de 40% a variação de tensão superficial é o principal responsável pela retração. Já com umidades relativas entre 40 e 80%, o principal mecanismo seria o da pressão de desligamento. Para umidades relativas acima de 80%, a quantidade de água presente na pasta praticamente preenche os capilares e prevalece o mecanismo de depressão capilar, conforme pode-se observar na Figura 4.

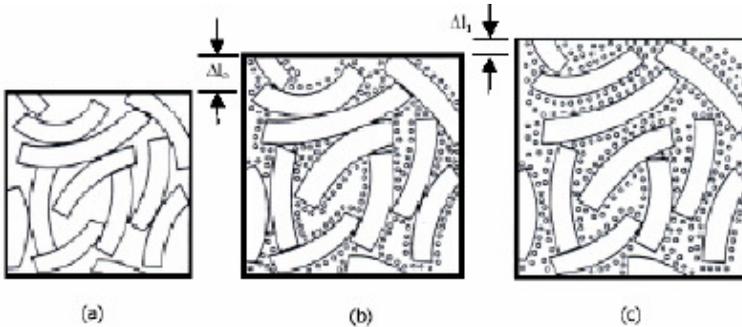


Figura 4 - Representação esquemática do modelo de Munich em três diferentes estágios da estrutura interna da pasta de cimento endurecida. (Ferraris e Wittmann, 1987). Em (a) a pasta encontra-se no estado seco, onde todas as partículas estão sob compressão por tensão superficial. Em (b) a tensão superficial é reduzida pela adsorção das moléculas de água e o sistema tem uma expansão inicial. Em (c) a umidade relativa atinge um valor elevado e uma expansão adicional é causada por pressão de desligamento.

## 2.2.2 Retração Plástica

A retração plástica é a redução de volume que ocorre no estado fresco, antes e durante o tempo de pega (Neville, 1997). Esta redução de volume se dá pela perda da água de amassamento por diversos fatores: temperatura ambiente e do concreto, umidade relativa, velocidade do vento, etc (ACI 224, 1998).

Portanto, maior será a magnitude da retração plástica quanto mais desfavorável for a condição do ambiente em questão (baixa umidade relativa, elevada temperatura, maior velocidade do vento). Turcry e Loukili (2006), ao estudar a retração plástica no concreto auto adensável, verificaram que quando a taxa de evaporação é moderada, a retração plástica ocorre antes e durante o tempo de pega, mas quando a taxa de evaporação é alta, este fenômeno ocorre antes do início da pega. Neville (1997) recomenda que a velocidade de evaporação da água não deve exceder o valor de  $1 \text{ kg/m}^2$  por hora, e que a evaporação aumenta quando a temperatura do concreto for muito mais alta do que a temperatura ambiente, mesmo que a umidade relativa do ar esteja relativamente alta. Jensen (2006) desenvolveu um aparelho denominado Curing Meter (Figura 5), que mede facilmente a taxa de evaporação quando posicionado sobre a superfície da amostra.

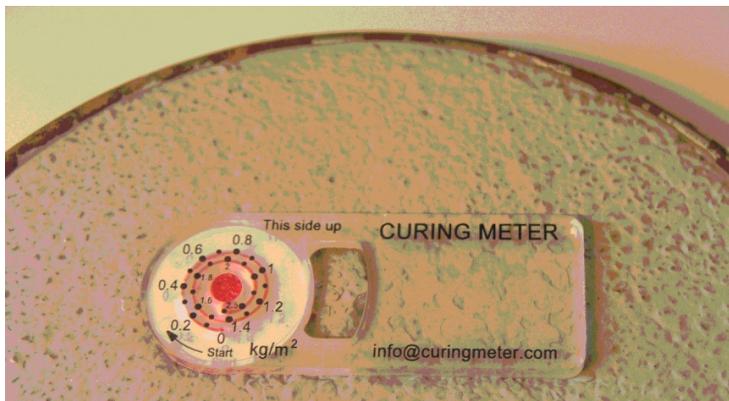


Figura 5 - Curing Meter. O dispositivo, desenvolvido por Jensen e Hansen, possibilita a medida instantânea da taxa de evaporação e deve ser posicionado sobre a superfície da amostra (Kumm,T.C., 2009).

A fissuração devido à retração plástica também pode ocorrer quando, em uma grande área horizontal, a dificuldade para a contração na horizontal é maior do que na vertical. O resultado são fissuras irregulares e profundas. Essas fissuras podem ser apropriadamente denominadas de fissuras antes da pega, que são geralmente paralelas entre si e espaçadas de 0,3m a 1,0m, com 25 a 50mm de profundidade, (Mehta e Monteiro, 1994), conforme mostra a Figura 6.



Figura 6 - Fissuras por retração plástica no concreto fresco (Mehta e Monteiro, 1994).

De acordo com Jensen (2006), estas fissuras ocorrem porque a tensão superficial da água nos poros capilares forma meniscos, que por sua vez, geram tensões capilares críticas na fase da pasta endurecida.

### **2.2.2.1 Mecanismos de ocorrência**

O assentamento plástico é comandado por dois fenômenos: o movimento das partículas sólidas pela ação da gravidade e, no sentido contrário, o da exsudação, representando o ar aprisionado e a água. Durante o estado fresco, poderá haver perda de água da mistura seja por evaporação ou pela absorção da sub-base ou fôrmas. Quando a taxa da exsudação é inferior à taxa de evaporação para a reposição desta perda, tensões capilares se desenvolvem, e a consequência é a retração plástica (Banthia et Gupta, 2006). Segundo Turcry e Loukili (2006), a água do menisco gera uma tensão capilar negativa que tende a puxar as partículas sólidas, causando a fissuração.

### **2.2.2.2 Micro-estrutura**

De acordo com Hasparyk et al. (2005), o termo mais apropriado para este tipo de retração seria contração Le Chatelier. Durante a hidratação do cimento, ocorre uma redução do volume absoluto total, pois o volume do cimento anidro + água é maior que o volume dos hidratos formados. Esta redução de volume consiste na retração química, que é formada por duas etapas: a contração Le Chatelier que ocorre antes da pega e a retração autógena que ocorre após a pega, e será discutida no decorrer deste trabalho. Portanto, denomina-se contração Le Chatelier o fenômeno de redução de volume que ocorre quando o concreto está no estado fluido. De acordo com este autor, tal fenômeno não estaria sendo referenciado por retração porque líquido não retrai, uma vez que não há poro. Há, sim, a diminuição do volume do material, que puxa o líquido para adaptar-se à forma do molde.

### **2.2.2.3 Materiais e fatores influentes**

Quanto maior for o consumo de cimento, menor for a relação água/cimento e maior for a proporção de finos no concreto, maior será a ocorrência da retração plástica (Hasparyk et al., 2005). Neville (1997) afirma que não é muito evidente a relação entre a exsudação e a retração plástica. Por exemplo, o retardamento de pega favorece maior

exsudação e leva a uma maior retração plástica. Por outro lado, uma maior capacidade de exsudação impede uma secagem da superfície do concreto reduzindo a fissuração por retração plástica.

#### **2.2.2.4 Retração plástica e a argamassa auto-adensável de alta resistência**

A literatura revela que argamassas e concretos auto-adensáveis geralmente possuem um maior consumo de cimento e menor relação água/cimento que materiais convencionais, e o risco de haver fissuras por retração plástica é também muito maior (Turcry et Loukili, 2006).

Este autor revela que, para condições de moderada taxa de evaporação, o concreto auto-adensável, com maior consumo de cimento e menor relação água/cimento, apresenta maior retração plástica que um concreto convencional e afirma que isso se deve a este último possuir uma blindagem natural, devido à exsudação, que funciona como cura, enquanto o último, pela alta quantidade de finos e o emprego de promotores de viscosidade retém a maior parte da água. Porém, para altas taxas de evaporação, Turcry e Loukili (2006) revelam que os dois tipos de concretos estudados apresentaram retração plástica semelhantes.

#### **2.2.2.5 Combate à retração plástica**

A técnica mais eficaz para o combate à retração plástica é a prevenção da perda da água do concreto através dos métodos de cura, quando o material ainda estiver fresco (Banthia et Gupta, 2006).

Para que não haja sucção das fôrmas ou material adjacente, estes devem estar previamente umedecidos. Também as condições do ambiente poderão ser amenizadas utilizando-se um quebra-vento temporário e a temperatura do material cimentício poderá ser mantida baixa através do resfriamento dos agregados e água de amassamento, reduzindo assim a velocidade de evaporação. Deve-se evitar atraso no lançamento do material, para que a cura seja iniciada o mais rápido possível, protegendo-o com sacos de aniagem e água (Hasparyk et al., 2005).

A cura adequada é o item mais importante para prevenir fissuras por retração plástica, formando uma blindagem e evitando a evaporação da água (Turcry et Loukili, 2006). Aïtcin (2000) afirma que, é necessário curar o concreto com água, tão logo ele comece a hidratar, e pelo maior tempo possível. Quanto mais rapidamente o cimento hidrata,

mais rapidamente deve ser curado e mais crítica é a cura do concreto. Este autor construiu um esquema de cura para o concreto, evidenciando sua importância, conforme ilustra a Figura 7.

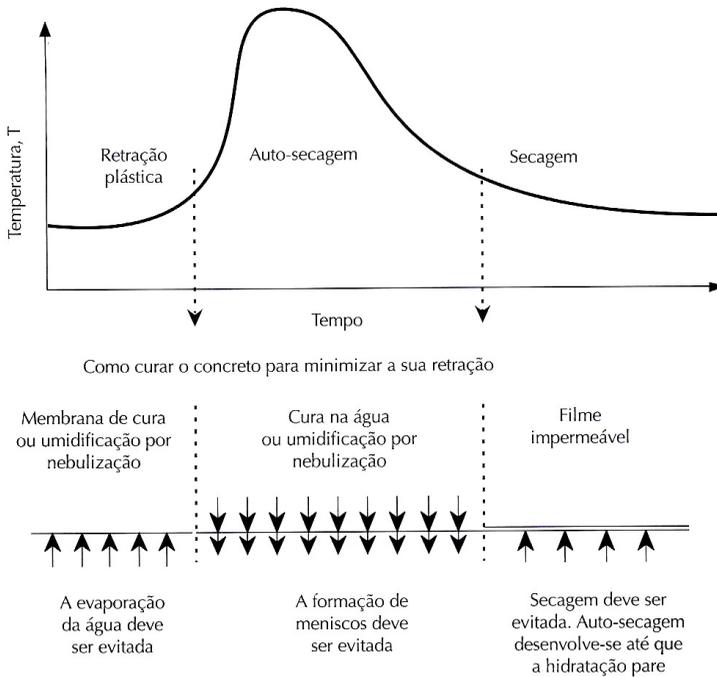


Figura 7 - Como curar o concreto para minimizar a sua retração (Aïtcin, 2000).

Esta perda de água, além de ser controlada por procedimentos adequados de concretagem, adensamento e cura, pode também ser controlada por um correto estudo de dosagem experimental.

### 2.2.3 Retração Autógena

A retração autógena foi descoberta no início do século 20. Porém, este fenômeno mereceu sua devida atenção apenas a partir do início da década de 90, devido aos avanços tecnológicos desenvolvidos em

relação ao concreto de alto desempenho, com a utilização de superplastificantes e adições (Jensen e Hansen, 2001).

De acordo com estes autores, um dos pioneiros pesquisadores dos materiais cimentícios, Le Chatelier, destacou a diferença entre volume absoluto e volume aparente e classificou como retração química a diminuição do volume absoluto e retração autógena como a diminuição do volume aparente da pasta endurecida. Esta diminuição de volume ocorre sem haver perda de água para o ambiente (Tazawa et al, 1995). Durante a hidratação do cimento, o volume absoluto do produto hidratado ( $V_h$ ) é menor do que a soma do volume de água consumido ( $V_{wh}$ ) e o volume do cimento anidro ( $V_{ch}$ ). Este fenômeno, descoberto por Le Chatelier, é denominado contração Le Chatelier, representado por  $\Delta V$ , como mostra a Equação 3 (Hua et al, 1995):

$$V_h = V_{wh} + V_{ch} - \Delta V \quad \text{Equação 3 - Contração Le Chatelier}$$

A auto-secagem é comandada por três aspectos: a retração química, a sensibilidade da variação da umidade relativa e a estrutura de poros existentes na pasta de cimento (Jensen e Hansen, 2001).

Quando o cimento entra em contato com a água, são iniciadas as reações de hidratação, formando uma microestrutura cada vez mais rígida. A retração química vai ocorrer até que toda a água livre nos capilares seja consumida, independente da quantidade de grãos de cimento que existirem. A água presente nos microporos é considerada “água imobilizada”, pois não participará da auto-secagem (Hua et al, 1995).

A Figura 8 exibe a relação entre a retração autógena e a retração química devido à hidratação da pasta de cimento. Quando a pasta de cimento está no estado líquido, há a variação no volume aparente, causado pela retração autógena, que coincide com a diminuição do volume absoluto, causado pela retração química. Conforme a hidratação do cimento avança, a microestrutura fica um pouco mais rígida e suporta um pouco mais as tensões existentes e a retração autógena não mais corresponde à retração química. A partir deste momento, o volume de ar nos poros capilares aumenta. (Nawa e Horita, 2005).

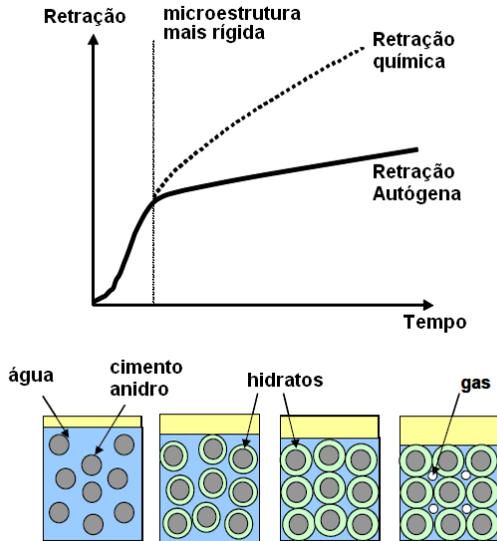


Figura 8 - Relação entre retração autógena e retração química (Nawa e Horita, 2005).

### 2.2.3.1 Mecanismos de ocorrência

A Figura 9 ilustra uma amostra de pasta de cimento endurecida protegida por uma camada de água, sem comunicação com o ambiente externo. De acordo com a contração de Le Chatelier, surgirão volumes de gás nos recentes poros saturados de água. À medida que a hidratação avança, aumenta o volume de espaços vazios, diminuindo o equilíbrio da pressão de vapor, ocorrendo então o que é denominado de auto-secagem (Hua et all, 1995).

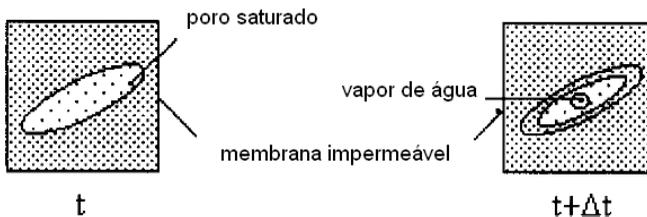


Figura 9 - Auto-secagem pela contração de Le Chatelier (Hua et all, 1995).

Durante as reações de hidratação do cimento, a água contida nos poros capilares é adsorvida pelo cimento anidro para a formação dos produtos hidratados e, como consequência, há uma queda da umidade relativa interna do material cimentício.

De acordo com Hua et al (1995), a variação da depressão capilar, regida pelas leis de Laplace e Kelvin exercem maior papel se comparada aos outros fenômenos físico-químicos.

### 2.2.3.2 Micro-estrutura

Durante o processo de hidratação, os primeiros sólidos são formados na pasta endurecida do material cimentício, aumentando os pontos de nucleação e os poros formados são preenchidos por bolhas de gás. Isto ocasiona a queda da umidade relativa e o aumento das bolhas de ar no interior da pasta aumenta a formação de meniscos ar/água, contribuindo para o aumento da tensão capilar (Lei de Kelvin). A presença de meniscos também causa tensões hidrostáticas no fluido dos poros (Lei de Laplace). Neste estágio de hidratação, a rigidez da pasta é tão baixa e o comportamento viscoso é tão pronunciado que a menor tensão atuante no sistema é capaz de gerar grandes deformações (Lura et al, 2003).

De acordo com Jensen e Hansen (2001) é possível explicar melhor o fenômeno da retração autógena através da Figura 10.

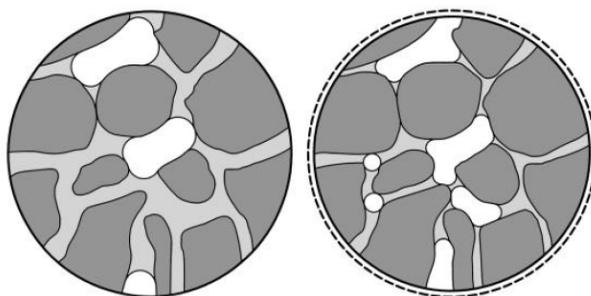


Figura 10 - Representação esquemática da seção transversal de uma pasta de cimento em processo de hidratação (Jensen e Hansen, 2001). À esquerda: baixo grau de hidratação. À direita: alto grau de hidratação. A matéria sólida (produtos da hidratação, cimento anidro, sílica ativa, etc.) é representada na cor cinza-escuro, a água dos poros em cinza claro e os poros vazios em branco. A linha pontilhada representa a circunferência original da seção. A figura ilustra as consequências do processo de hidratação.

Primeiramente, há a redução da quantidade de água nos poros capilares pela incorporação aos produtos da hidratação, ocasionando o aumento da quantidade de material sólido. Após, há o refinamento da estrutura de poros e a formação dos poros vazios causados pela retração química. Finalmente, há a diminuição do raio de curvatura do menisco e a grande retração gerada pelo aumento das tensões capilares nos poros.

### **2.2.3.3 Materiais e fatores influentes**

De acordo com a literatura, a deformação autógena e a variação da umidade relativa são influenciadas por vários fatores: relação água/cimento, composição e finura do cimento, adições, volumes dos agregados e temperatura (Jensen e Hansen, 2001).

#### *Temperatura:*

Num estudo sobre a influência da temperatura na retração autógena, Jensen e Hansen (1999) detectaram que, com o aumento da temperatura, a variação da umidade relativa e a retração autógena serão aceleradas.

#### *Tipo de Cimento*

Tazawa e Miyzawa (1995b) realizaram ensaios com diferentes tipos de cimento em pastas com relação a/c igual a 0,3. Os autores observaram que a retração autógena aumenta com a finura dos cimentos.

O cimento Portland de médio calor de hidratação e o cimento rico em  $C_2S$  resultam em menor retração autógena do que cimentos Portland comuns, pois a velocidade de hidratação do  $C_2S$  é mais lento do que o  $C_3S$  (Hasparyk et al., 2005).

A retração do concreto feito com cimento aluminoso tem a mesma ordem de grandeza dos concretos de cimento Portland, mas ocorre muito mais rapidamente (Neville, 1997).

#### *Adições*

As adições, em geral, vêm sendo largamente utilizadas, especialmente em materiais cimentícios de alta-resistência. Suas características no estado endurecido são a de tornar a estrutura mais fechada, devido ao refinamento dos poros, aumentando a vida útil da

estrutura. Porém, nem toda adição é benéfica em se tratando de retração autógena.

Adições que causem um refinamento na porosidade podem aumentar a retração autógena ao passo que adições que retenham água no interior da pasta e que a liberem vagarosamente no decorrer da hidratação evitam que a umidade interna do concreto diminua minimizando os efeitos da retração (Tazawa e Miyazawa, 1995a).

- Escória de alto-forno: Estudos realizados com a adição de escória de alto-forno mostraram que a retração autógena aumenta se comparada a materiais cimentícios convencionais. Quanto maior a quantidade de escória de alto-forno utilizada, maior a retração autógena, para uma mesma relação água/cimento (Lee et al, 2006).

- Sílica Ativa: Zhang et al (2003) realizaram um estudo em materiais cimentícios variando as relações água/cimento e os teores de sílica ativa. Como era de se esperar, a retração autógena aumentou com a diminuição da relação água cimento e com o aumento do teor de sílica ativa. As amostras foram monitoradas por 98 dias, porém 60% da retração autógena ocorreu apenas nas primeiras duas semanas de idade.

- Cinza Volante: Muitos estudos afirmam que o uso de cinza volante diminui consideravelmente os efeitos da retração autógena. No entanto, quando as partículas desta adição são mais refinadas do que as partículas do cimento utilizado, o efeito é o contrário. Isto implica que a cinza volante de partículas muito pequenas comporta-se da mesma maneira que a sílica ativa. Este efeito é pronunciado porque, quanto menores as partículas, menores serão as distâncias entre elas e menores serão os poros formados, resultando em maiores tensões capilares (Termkhajornkita et al, 2005).

### *Aditivos*

Os aditivos superplastificantes são geralmente utilizados em argamassas e concretos de baixa relação água/cimento com o intuito de melhorar a trabalhabilidade do material. Metha e Monteiro (1994) afirmam que o emprego destes aditivos, por causar uma melhor distribuição das partículas constituintes da massa, resulta no maior refinamento dos poros. Desse modo, espera-se que o seu emprego conduza a maiores valores de retração.

#### **2.2.3.4 Retração autógena x argamassa auto-adensável de alta resistência**

De acordo com Aïtcin (2000), no concreto convencional de alta relação água/cimento, a água contida nos capilares mais grossos será facilmente drenada pela porosidade muito fina gerada pela contração química porque está fracamente retida nestes grandes capilares. As forças de tração originadas pela criação dos meniscos nos capilares mais grossos não são fortes e a retração autógena resultante é pequena ou desprezível. Naturalmente, quando a água contida nos capilares mais grossos tiver sido drenada, a porosidade criada pelas contrações volumétricas drenará a água contida nos capilares mais finos e as correspondentes tensões de tração crescerão. Mas nos concretos usuais, a maioria da água de mistura está contida em capilares muito grossos que contêm grande volume de água e, como não existe muito cimento neles, as tensões de tração nunca se tornam altas o suficiente para resultar retração autógena significativa.

Já nos concretos de alto desempenho com baixa relação água/cimento, na ausência de qualquer cura com água, a retração autógena se desenvolve rapidamente, pois a água drenada pelos poros muito finos resultantes da contração volumétrica é drenada dos capilares que já têm um diâmetro muito pequeno. Além disso, tudo acontece muito rapidamente em concretos com baixa relação água/cimento: sua reação de hidratação, a drenagem da água de capilares cada vez mais finos e o desenvolvimento de tensões de tração resultando no desenvolvimento de uma rápida retração autógena (Aïtcin, 2000).

#### **2.2.3.5 Combate à retração autógena**

Todos os métodos empregados ou propostos para controlar a retração autógena têm em comum o seguinte princípio: diminuir as forças de tração no menisco criado pela autodessecação num sistema fechado. Os principais métodos utilizados são a incorporação de aditivos químicos e a provisão de água externa para a hidratação da pasta. Esses aditivos podem reduzir a tensão de superfície da água presente nos poros capilares e, então, diminuir a retração autógena sem a alteração de outras propriedades do concreto endurecido. A combinação de aditivos expansivos e aditivos redutores de retração por secagem pode ser altamente eficiente para reduzir a retração autógena (Hasparyk et al., 2005).

Uma excelente opção para prevenir e combater a retração autógena é através da cura interna. Bentur et al (2001) estudaram a influência do uso de agregados leves saturados para o combate a este tipo de retração. A água dos poros dos agregados leves é transportada para os poros capilares da estrutura da pasta. Os mecanismos deste transporte podem estar associados à sucção por capilaridade já que os poros capilares da pasta são menores que os poros dos agregados.

Termkhajornkita et al (2005) afirmam que a retração autógena em materiais cimentícios de alta resistência não poderá ser evitada mesmo com excelentes condições de cura por molhagem, devido à dificuldade da água penetrar no interior do concreto. Portanto, a cura para evitar a retração autógena só será eficaz em peças com pequenas espessuras (Repetto, 2005).

### **2.2.3.6 Ensaio para a determinação da retração autógena**

Na prática, a determinação da medida da retração autógena é dificultada porque as reações de hidratação começam muito cedo, sendo necessário medir o desenvolvimento das variações volumétricas durante as primeiras 24 horas de idade imediatamente após a mistura (Nawa e Horita, 2005).

A retração autógena se desenvolve pelas tensões oriundas do mecanismo de hidratação do cimento. Por este motivo, não há um consenso entre os pesquisadores a respeito do tempo em que devem ser iniciadas as medições da retração autógena. Este tempo, definido como “tempo zero”, seria a determinação precisa do tempo em que as tensões começariam a se desenvolver na pasta de cimento numa condição de restrição total ou plena do movimento do material, sendo que as deformações que ocorrerem antes deste “tempo zero” poderiam ser ignoradas nos cálculos. O instituto japonês de concreto, no entanto, recomenda as medidas da retração autógena desde o início do tempo de pega (Cusson e Hoogeveen, 2007).

Existem dois tipos de medição da retração autógena: a medida volumétrica e a medida linear. A medida volumétrica pode ser tomada através de balões de borracha preenchidos com pasta de cimento fresca e imersos na água. A medida é feita pela variação do nível da água onde o balão está imerso. Neste método as medidas podem ser tomadas desde o início do preparo da mistura. Porém, a pressão exercida tanto pela membrana como pelo líquido podem influenciar nos resultados (Jensen e Hansen, 2001). No presente estudo as medidas de retração tomadas

serão as lineares, como proposto pela ASTM C157 (2003), através da bancada de retração e do relógio comparador, descritos no terceiro capítulo.

## **2.2.4 Retração por Secagem**

A retração por secagem pode ser definida como uma redução volumétrica do material que ocorre pela perda de água de seu interior no estado endurecido. Esta perda de água ocorre principalmente por evaporação devido a elevações bruscas da temperatura e/ou principalmente por reduções significativas na umidade relativa ambiente onde a estrutura está inserida.

A retração por secagem pode ser dividida em duas partes: uma parte reversível e outra irreversível, ou seja, o material depois de retraído, ao ser molhado, sofre uma expansão menor que a retração anteriormente sofrida, apresentando desta maneira uma deformação residual (deformação irreversível). Taylor (1990) afirma que os primeiros ciclos de molhagem e secagem do material propiciam algum incremento da retração irreversível, mas após alguns ciclos as variações volumétricas devido às mudanças de UR são essencialmente reversíveis.

Há um consenso entre pesquisadores da área que o fenômeno da retração por secagem no estado endurecido é influenciado principalmente pelo tamanho e tipo de vazio que perde água, ou seja, dependendo do espaço de onde a água é removida, a retração ocorre com maior ou menor intensidade. Afirmam ainda que outro fator importantíssimo é a forma como a água estaria ligada às superfícies sólidas do vazio quando foi removida. Neville (1997) relega papel importante ainda ao tamanho e estrutura dos cristais formados na hidratação do cimento, porém em menor escala que os anteriormente apresentados.

### **2.2.4.1 Mecanismos de ocorrência**

Os fatos de que a variação do volume do concreto ao secar não seja igual ao volume de água retirada e que a perda de água livre (água dos macroporos) não gera redução de volume considerável comprovam que o fenômeno da retração por secagem não se trata apenas de uma relação volumétrica. Por outro lado, quando se trata da perda da água adsorvida nos pequenos poros, a variação relativa de volume da pasta, quando não restringida, é bastante grande sendo aproximadamente igual

ao volume de água retirada. Da mesma maneira ocorre com a remoção de água interlamelar (ou intersticial), que, apesar de mais difícil, gera grandes reduções de volume e também da mesma ordem de grandeza do volume de água retirada (Neville, 1997). Diante disto, esta não linearidade de comportamento tem gerado uma falta de consenso entre pesquisadores sobre o mecanismo de funcionamento da retração por secagem, ou melhor, da possível combinação de mecanismos.

Existem várias teorias que tentam explicar os mecanismos de funcionamento de retração das pastas de cimento, sendo consenso que a interação entre as superfícies sólidas e a água é o principal fator a ser considerado. No entanto, o modelo mais adequado para explicar fisicamente o fenômeno da perda de água e retração vem sendo discutido. Estes mecanismos estão relacionados com a combinação da água na pasta, seja adsorvida, combinada ou presa em capilares: mecanismos da depressão capilar, variação da pressão de desligamento e da tensão superficial, explicados anteriormente.

#### **2.2.4.2. Materiais e fatores influentes**

Vários fatores influenciam o fenômeno da retração por secagem. De maneira geral, tudo o que afetar a quantidade e a qualidade da pasta afetará a retração por secagem de concretos e argamassas, pois a retração ocorre essencialmente na pasta. Para a confecção de argamassas e concretos auto-adensáveis, são utilizados os mesmos tipos de insumos que os convencionais, porém com proporcionamento adequado de modo a assegurar as propriedades específicas, principalmente no estado fresco. Além do uso de aditivos superplastificantes, também são utilizados geralmente uma maior quantidade de finos para evitar a exsudação, o que proporciona redes capilares muito estreitas, facilitando a ocorrência do fenômeno da retração.

#### **2.2.4.3 Retração por secagem x argamassa auto-adensável de alta resistência**

Na superfície do concreto de alto desempenho, a secagem desenvolve-se mais lentamente, porque a sua porosidade é globalmente mais fina e porque ela já foi drenada pelo processo de auto-secagem. A retração por secagem, em conseqüência, desenvolve-se com menos intensidade no concreto de alto desempenho do que no concreto usual (Aitcin, 2000).

#### 2.2.4.4 Combate à retração por secagem

Em concretos com resistência convencional (<50 MPa), a promoção de cura e a não remoção precoce das formas são tidas como procedimentos adequados para minimizar a retração. A cura por saturação ou molhagem, a cura química, que cria uma película de proteção e a cobertura da superfície por lonas impermeáveis colaboram no combate à retração por secagem (Repette, 2005).

Segundo Neville (1997), a cura prolongada retarda a retração, mas não diminui a intensidade. A explicação estaria nos efeitos sobrepostos e complexos do grau de hidratação, retenção da retração por partículas parcialmente hidratadas de cimento e de evolução da resistência da pasta. Este autor afirma ainda que a velocidade de secagem não interfere na intensidade da retração, salvo casos de transferência imediata do concreto de ambiente saturado para condições de baixa umidade. O vento e/ou convecção forçada não influenciam a velocidade de secagem do concreto endurecido, exceto nas primeiras idades. A explicação estaria na velocidade de transferência de umidade no concreto ser muito baixa e praticamente independente da movimentação do ar (Neville, 1997).

### 2.3 Aditivos Redutores de Retração

O aditivo redutor de retração (ARR) (shrinkage reducing admixture, SRA) foi patenteado no Japão em 1982 e introduzido no mercado norte-americano em 1995. É encontrado na forma líquida e facilmente adicionado no momento da adição da água de amassamento, sem a necessidade de se alterar a seqüência do carregamento e tempo de mistura. Os teores mais comumente utilizados para o combate da retração em concretos convencionais são de 1 a 2% da massa de cimento, reduzindo-se o volume de água de amassamento pelo volume do aditivo utilizado (Repette, 2007). O ARR tem como base éter de glicol - éter de polialquila,  $(CH_2)_2-C-(CH_2OH)_2$  e é eficaz tanto no combate à retração por secagem como na autógena (Collepari et al, 2005).

O ARR diminui os efeitos da retração sem utilizar de expansão, reduzindo a retração pela diminuição da tensão superficial da água no poro capilar. Portanto, quando ocorre a perda de água dos poros capilares, a tendência para a ocorrência do fenômeno da retração é menor (Folliard e Berke, 1997). Segundo Bentz, Hansen e Geiker (2001), o fator de redução da tensão superficial em água destilada pode

ser maior do que 2. Folliard e Berke (1997) indicam que os ARR reduzem a tensão superficial da água dos poros para aproximadamente 40 dynes/cm).

A Figura 11 ilustra o desenvolvimento da retração em duas misturas, ambas com um consumo de cimento de  $390\text{kg/m}^3$  e relação  $a/c$  de 0,40, com  $4\text{kg/m}^3$  de ARR ( $\approx 1\%$ ) e 0% de ARR (referência), com cura úmida realizada durante a primeira semana. Os resultados mostram uma diminuição da retração de 0,04% para 0,02% (Collepari et al, 2005).

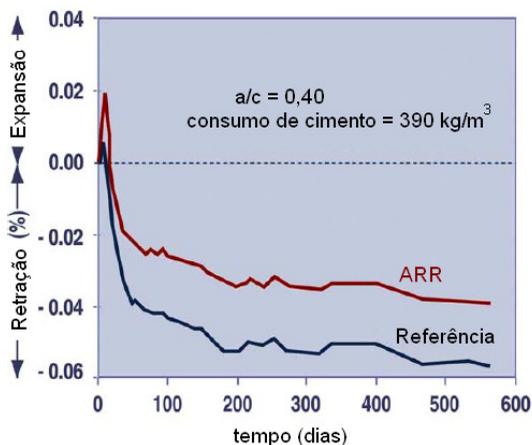


Figura 11 - Medidas de retração em função do tempo com e sem ARR (Collepari, 2005).

O uso do ARR não reduz a taxa de evaporação da água, quando exposto a ambientes com umidades relativas abaixo de 100%. A Figura 12 mostra a perda de massa devido à evaporação da água para misturas com e sem ARR, ambos expostos sob as mesmas condições: umidade relativa de 60% e temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  (Collepari et al, 2005).

Collepari et al (2005) também afirmam que, apesar dos bons resultados no combate à retração, este aditivo não é tão utilizado devido ao seu elevado custo. Por exemplo, em 2004, o custo do aditivo na Europa era de 4,00 a 5,00 €/kg. Para a dosagem de  $4\text{kg/m}^3$ , seriam gastos de 12 a 20 €/m<sup>3</sup> para a adição do aditivo.

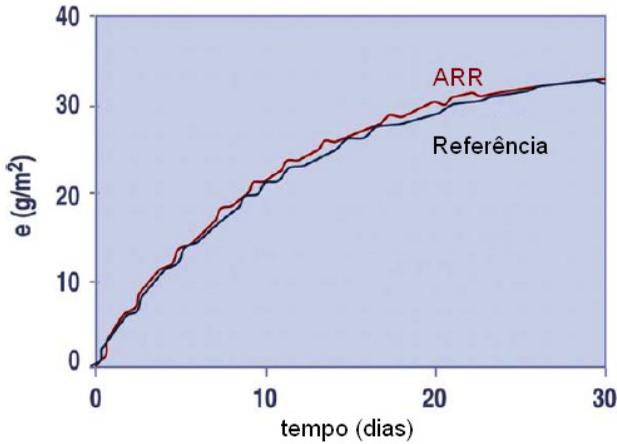


Figura 12 - Evaporação (e) da água para misturas com e sem ARR (Collepari, 2005).

### 2.3.1 Propriedades

#### 2.3.1.1 Resistência à compressão

Folliard e Berke (1997) estudaram a influência do ARR na resistência à compressão, através de ensaios em que variavam a dosagem de superplastificante e mantiveram a mesma relação água/cimento. Para tais misturas, perceberam que a adição do ARR tendeu a reduzir os valores de resistência à compressão, especialmente na ruptura com 1 dia de idade, atribuindo-se esta perda aos efeitos do ARR na hidratação do cimento, e para os 28 dias, a resistência chegou em até 90% da resistência de uma pasta sem o ARR. Porém, já que o ARR tende a agir como um redutor de água, a dosagem do superplastificante poderia ser mantida constante, diminuindo, assim, a quantidade de água de amassamento para atingir o slump desejado, e a diferença entre as resistências à compressão não seria tão evidente (Folliard e Berke, 1997).

Maltese et al (2005) compararam os efeitos nas propriedades mecânicas entre o uso de ARR (à base de propilenoglicol) e aditivo expansivo – EXP - (ACR - à base de óxido de cálcio). Os resultados, de acordo com a Figura 13, mostraram que as amostras com 3% de ARR e com o uso combinado de 3% de ARR e 3% de ACR apresentaram

valores de resistência à compressão inferiores às da amostra de referência. Estes dados também sugerem que o uso apenas do ACR não influenciou no desenvolvimento da resistência à compressão.

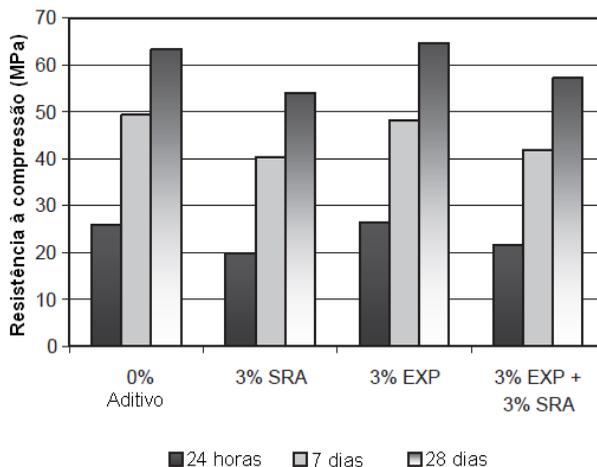


Figura 13 - Comparativo resistências à compressão entre ARR, ARR+EXP e EXP (Maltese et al, 2005).

### 2.3.1.2 Tempos de pega

Neste mesmo estudo, Maltese et al (2005) avaliaram o efeito do ARR no tempo de pega e constataram que o ARR agiu como um retardador de pega, se comparado com a amostra padrão, como mostra a Tabela 3:

Tabela 3 - Comparativo de tempo de pega entre ARR, ARR +EXP e EXP (Maltese et al, 2004)

Amostra	Tempo de pega	
	Inicial	Final
0% aditivo	2h 30 min	5 h
3% EXP	2h	3 h
3% ARR	4h	6 h 30 min
3% EXP + 3% ARR	3h 30 min	6 h

A ação de reduzir a tensão superficial implica na alteração de algumas propriedades da matriz cimentícia. A principal justificativa seria que a redução da tensão superficial produzida pelo aditivo também reduz a força de atração entre as partículas na fase de floculação do aglomerante, afetando diretamente no tempo de pega (Brooks, Johari, Mazloom, 2000).

### **2.3.1.3 Micro-estrutura**

Maltese et al (2005), em estudo mencionado anteriormente, afirmaram que o ARR inibiu a formação do hidróxido de cálcio. Por outro lado, como esperado, o aditivo expansivo (ACR), aumentou significativamente a formação do hidróxido de cálcio, devido à quantidade suplementar de óxido de cálcio presente em sua formulação. Após 2 e 24 horas de hidratação, análise em difratometria de raio X mostrou a formação de portlandita e etringita cristalina e, para a mistura com 3% ARR + 3% ACR, foi notada uma maior quantidade de portlandita em relação à quantidade de etringita formadas. Esta diferença está ilustrada na Figura 14.

Também foi constatado um aumento na área específica na hidratação do cimento pelo uso do ARR. Foram realizadas Micrografias eletrônicas das pastas após 2 h de hidratação, conforme ilustra a Figura 15. Na mistura padrão (a), notou-se uma típica morfologia da hidratação do cimento Portland: um material de gel em volta dos grãos de cimento. Na mistura com 3% ACR (b), já havia a presença de placas hexagonais de portlandita. Na mistura com 3% de ARR (c), a presença de longas agulhas prismáticas na superfície chamou a atenção. De acordo com a difratometria de raio X, estas agulhas poderiam ser cristais de etringita ou, mais provavelmente, de portlandita, apesar destes cristais não apareceram em seu formato padrão (hexagonais). Seu aparecimento foi mais pronunciado na mistura com 3% ACR + 3% ARR (d). Talvez o ARR tenha influenciado a precipitação do hidróxido de cálcio, conforme pesquisaram Maltese et al (2005).

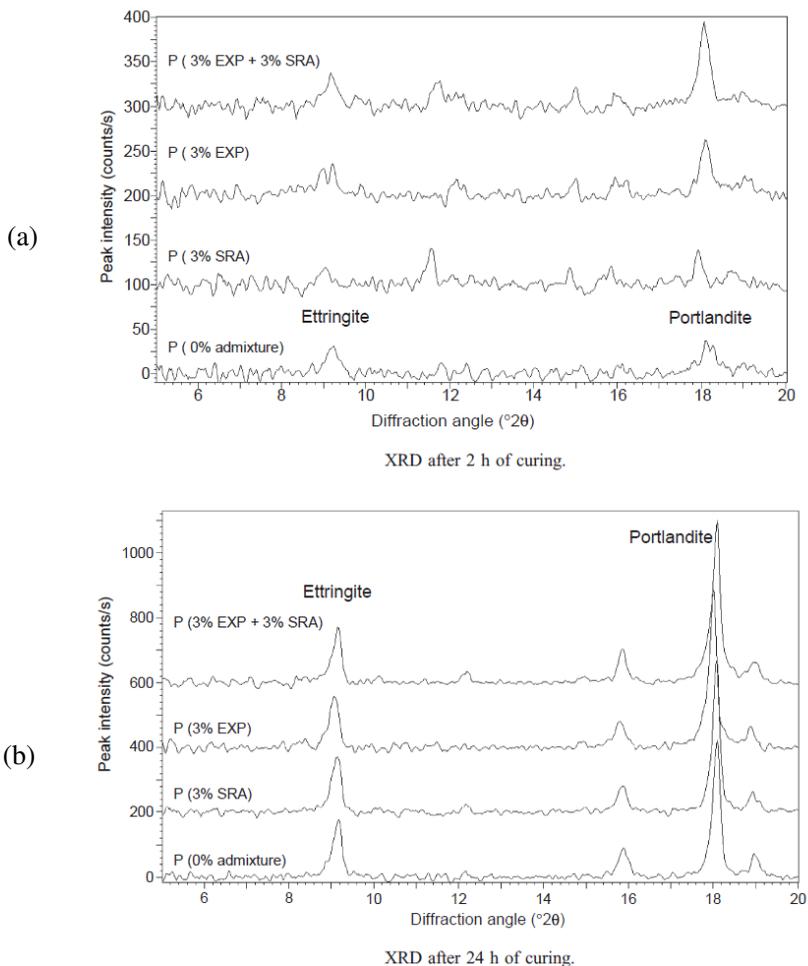


Figura 14 - Difratoimetria de raio X – Comparativo entre ARR, ARR + EXP e EXP na formação de etringita e Portlandita . Em (a) difratometria após 2h de hidratação, em (b) difratometria após 24h de hidratação (Maltese et al, 2005).

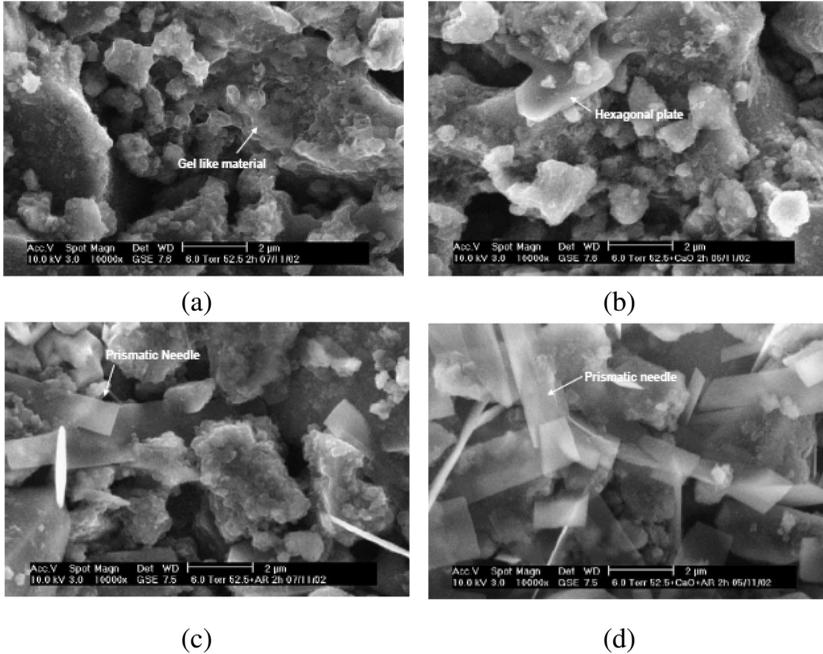


Figura 15 - Grafias eletrônicas das pastas após 2 h de hidratação (Maltese et al, 2005). Em (a) 0% de ARR, em (b) 3% de EXP, em (c) 3% de ARR, em (d) 3% de ARR + 3% de EXP

Foi observado neste estudo um melhor desempenho no combate à retração no uso combinado dos aditivos compensador e redutor de retração, devido à perfeita interação entre estes aditivos. A primeira hipótese para explicar este fato é a formação destas agulhas prismáticas, que podem favorecer a expansão inicial. Outrossim, supondo que tais cristais sejam realmente de portlandita, Maltese et al (2005) afirmam que quanto mais baixa é solubilidade de hidróxido de cálcio, maior é a expansão da argamassa. O ARR, sendo uma molécula hidrofóbica, reduz a permissividade da água, e aumenta a habilidade da água em dissolver sais. Portanto, o ARR reduz a solubilidade do hidróxido de cálcio, promovendo a expansão e compensando eficazmente a retração quando utilizado juntamente com o ACR à base de óxido de cálcio.

### **2.3.1.4 Fatores Influentes**

Em estudo realizado em concretos de alto desempenho, o uso do ARR reduziu a retração, com ou sem a adição de sílica ativa, porém, neste último notou-se a redução mais significativa. Contudo, ainda não se conhece completamente o mecanismo de atuação que melhorou a eficácia do uso combinado do ARR e sílica ativa (Folliard e Berke, 1997).

Os ARR são um eficiente método para o combate à retração quando a cura não é realizada completamente. Porém, a cura continua sendo recomendada para minimizar os efeitos da retração não apenas para melhorar a qualidade do concreto, mas também para extrair ao máximo o efeito benéfico do ARR (Folliard e Berke, 1997). Repette (2005) recomenda que a cura seja iniciada o mais cedo possível e perdure no mínimo durante as primeiras 24 horas após a mistura, destacando que a cura úmida não poderá deixar de ser realizada.

### 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na composição das argamassas estudadas, bem como seus traços e procedimentos de mistura.

Também contém um resumo abordando as propriedades estudadas, os ensaios realizados e os equipamentos envolvidos em cada ensaio.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CPV-ARI-RS - ABNT NBR 5733/91) da marca Votoran. Este tipo de cimento foi selecionado por apresentar elevada finura formando uma microestrutura de poros refinados de modo a favorecer o fenômeno de retração. As características físicas do cimento utilizado nos experimentos constam na Tabela 4 e as características químicas na Tabela 5:

Tabela 4 - Características físicas do cimento. Dados fornecidos pelo fabricante. Cimento do tipo CPV-ARI-RS

Item de controle		Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Físicos	Material retido #200 (mesh)	%	0,11	0,04	0,00	0,29
	Material retido #325 (mesh)	%	1,59	0,43	0,71	2,45
	Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4916,28	101,76	48,97	53,32
	Água de consistência	%	28,96	0,18	28,51	29,21
	Início de pega	horas	3:14	0:10	3:07	3:41
	Fim de pega	horas	4:11	0:10	4:02	4:41
	Expansibilidade a quente	mm	0,56	0,55	0,00	1,60
	Resistência R1	MPa	24,03	0,83	22,47	25,44
	Resistência R3	MPa	34,03	1,03	32,14	35,54
	Resistência R7	MPa	38,86	0,94	37,18	40,27
Resistência R28	MPa	48,46	0,80	47,07	50,26	

Tabela 5 - Características químicas do cimento. Dados fornecidos pelo fabricante. Cimento do tipo CPV-ARI-RS

Item de controle		Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Químicos	Perda ao fogo	%	3,52	0,20	3,20	4,00
	SiO <sub>2</sub>	%	23,62	0,35	22,78	24,37
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	7,45	0,24	6,98	7,86
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,27	0,04	3,15	3,35
	CaO	%	13,25	0,83	12,42	14,07
	MgO	%	14,39	4,10	10,39	18,39
	K <sub>2</sub> O	%	1,10	0,02	1,03	1,15
	Na <sub>2</sub> O	%	0,07	0,00	0,07	0,07
	SO <sub>3</sub>	%	3,25	0,06	3,04	3,38
	Resíduo Insolúvel	%	13,09	0,83	11,17	14,64
	CO <sub>2</sub>	%	2,43	0,21	1,96	2,55

### 3.1.2 Água

A água empregada no preparo das argamassas foi fornecida pela rede pública de abastecimento de Florianópolis. A água utilizada nos ensaios foi armazenada previamente em sala climatizada por pelo menos 24 horas.

### 3.1.3 Agregados

Os agregados utilizados nestes experimentos foram uma composição de 30% de areia natural e 70% de areia de britagem, secas previamente em estufa. A determinação da composição ideal das areias foi realizada através do ensaio de espalhamento em argamassa (Flow-table test). Para tanto, foram preparadas argamassas no traço 1:2 (cimento: areia), com diversas proporções de areia, procurando o maior espalhamento possível, com a mesma relação água/cimento. O resultado está ilustrado na Tabela 6, onde o melhor desempenho encontra-se em destaque (em asterisco e negrito).

Tabela 6 - Ensaio de espalhamento em argamassa

Areia de britagem	Areia natural	Espalhamento (cm)
40%	60%	23,0
50%	50%	24,0
60%	40%	24,5
<b>*70%</b>	<b>*30%</b>	<b>*25,0</b>

### 3.1.4 Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante de base éter carboxílico modificado, fornecido pela Basf e comercialmente denominado “Glenium 51”. Suas principais características foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização do aditivo superplastificante. Dados fornecidos pelo fabricante

Função	Aditivo super plastificante de terceira geração para concreto.		
Base Química	Éter policarboxílico.		
Aspecto	Líquido		
Cor	Branco turvo		
Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112 B	5 - 7	-
Densidade	TM 103 B	1,067 - 1,107	g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	TM 613 B	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cps

### 3.1.5 Aditivo redutor de retração (ARR)

O aditivo redutor de retração utilizado foi de base éter propileno glicol produzido pela Grace Brasil e comercialmente denominado “Eclipse”. De acordo com o fabricante, o aditivo não contém água, porém recomenda-se que o volume adicionado seja considerado como parte da água da mistura. É fornecido na forma líquida e sua massa específica é de 0,91kg/dm<sup>3</sup>.

## 3.2 Definição do programa experimental

Os ensaios relacionados ao acompanhamento da evolução da retração<sup>1</sup> são o tema central deste programa experimental, sendo a sua análise apoiada em resultados de ensaios complementares, como a caracterização das misturas no estado fresco e a verificação de propriedades mecânicas no estado endurecido.

Os ensaios realizados nas misturas no estado fresco asseguram que as argamassas sejam auto-adensáveis, e por este motivo, os testes foram sempre realizados antes da realização de qualquer moldagem. Os parâmetros para considerar a argamassa auto-adensável serão descritos no próximo capítulo.

Os ensaios mecânicos para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade foram previstos por serem parâmetros fundamentais para uma futura análise das tensões geradas pela retração, além da resistência à compressão ser um importante indicador de desempenho.

O programa experimental foi desenvolvido no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal de Santa Catarina, em sala climatizada com a temperatura de  $24 \pm 4$  °C e umidade relativa de  $65 \pm 10$  %.

### 3.2.1 Variáveis

#### 3.2.1.1 Relação água/cimento (a/c)

A fim de compreender melhor a intensidade da retração em argamassas auto-adensáveis, foram consideradas três diferentes relações água/cimento:

relação água/cimento: 0,30 – 0,35 – 0,40
--

#### 3.2.1.2 Aditivo redutor de retração (ARR)

De acordo com a recomendação do fabricante, o teor recomendado para a obtenção da máxima eficiência do ARR é de aproximadamente 2% sobre a massa de material cimentício e qualquer

---

<sup>1</sup> Note-se que ao longo deste capítulo a menção do termo “retração” refere-se ao fenômeno de retração autógena.

dosagem entre 1% e 2,5% pode ser utilizada para a obtenção do nível de controle desejado. Portanto foram escolhidas 3 diferentes dosagens deste aditivo, ensaiadas nas três relações água/cimento mencionadas:

teor de ARR: 1,0% - 1,5% - 2,0%

Para cada relação água/cimento também foram realizados ensaios com 0% de ARR nomeados “referência – REF” para a comparação de desempenho do aditivo na mitigação da retração autógena.

Dado o exposto, foram realizadas ao todo 12 misturas, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Nomenclatura das misturas estudadas, a/c e teores de ARR

nº misturas	Relação água/cimento	Nome da mistura	ARR (%)
1	0,30	0,30 – REF	0,0%
2		0,30 – 1%	1,0%
3		0,30 – 1,5%	1,5%
4		0,30 – 2%	2,0%
5	0,35	0,35 – REF	0,0%
6		0,35 – 1%	1,0%
7		0,35 – 1,5%	1,5%
8		0,35 – 2%	2,0%
9	0,40	0,40 – REF	0,0%
10		0,40 – 1%	1,0%
11		0,40 – 1,5%	1,5%
12		0,40 – 2%	2,0%

### 3.2.2 Parâmetros fixos

#### 3.2.2.1 Aditivo superplastificante

O objetivo inicial seria fixar um teor de aditivo superplastificante para cada relação água/cimento, de modo a se obter aproximadamente a mesma fluidez em todas as misturas. A dosagem seria feita por tentativas, adicionando-se aos poucos até obter a consistência desejada.

No entanto, encontrou-se dificuldade em estabelecer uma dosagem de aditivo superplastificante que resultasse em mesma fluidez para todas as misturas. A fluidez encontrada não foi a mesma para os diferentes grupos de relação água/cimento, pois ao adicionar mais aditivo, a argamassa apresentava sinais de segregação, e ao diminuir o teor de aditivo, a argamassa não apresentava fluidez suficiente para ser considerada auto-adensável. Portanto, procurou-se apenas obter aproximadamente a mesma fluidez dentro de cada grupo de relação água/cimento.

Ao final dos testes, os teores de aditivo superplastificante estabelecidos foram os seguintes:

- a/c 0,30 – 1,0%
- a/c 0,35 – 0,50%
- a/c 0,40 – 0,25%

Conforme recomendação dos fabricantes, os volumes de aditivos adicionados às argamassas foram considerados como parte da água da mistura, sendo considerados 100% no ARR e 70% no aditivo superplastificante.

### **3.2.2.2 Proporcionalamento e procedimento das misturas**

O traço utilizado na composição das argamassas foi, em massa, na proporção de 1:2 (cimento: areia) em todas as misturas.

Os procedimentos de mistura das argamassas foram padronizados conforme a Tabela 9, onde o tempo está expresso em min:seg. A adição dos materiais ocorreu lentamente, ao longo do tempo considerado para cada adição. A argamassadeira utilizada foi da marca Contenco - eletromecânica I-3010 e contém duas velocidades padronizadas, de 830 e 1880 rpm, conforme fornecido pelo fabricante.

Para todas as misturas preparadas nesta pesquisa, os insumos foram mantidos em sala climatizada por pelo menos 24 horas antes de serem utilizados. Nesta mesma sala, foram realizados os ensaios nas misturas frescas, bem como as moldagens dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos submetidos a todos os outros ensaios relatados nesta dissertação.

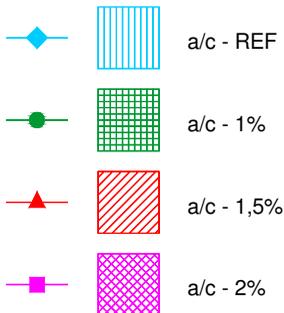
Tabela 9 - Procedimentos de mistura das argamassas

procedimento	velocidade da argamassadeira (rpm)	tempo parcial	tempo total
adição da água	0	0:00	0:00
adição do cimento	830	0:30	0:30
adição das areias	830	0:30	1:00
homogeneização da mistura	830	1:00	2:00
paralisação para raspagem	0	1:00	3:00
adição do aditivo superplastificante	830	0:10	3:10
homogeneização da mistura	830	0:10	3:20
adição do aditivo redutor de retração (quando houver)	830	0:10	3:30
homogeneização da mistura	830	0:30	4:00
homogeneização da mistura	1880	0:30	4:30
paralisação para raspagem	0	0:30	5:00
homogeneização da mistura	830	1:00	6:00

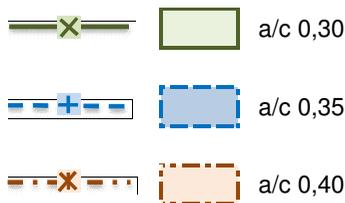
### 3.2.3 Legenda e forma da análise dos resultados

As análises dos resultados foram divididas por grupos de acordo com a relação água/cimento, pois, de acordo com a bibliografia, esta relação está diretamente ligada à magnitude da retração, aos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Para facilitar a compreensão e leitura dos gráficos, foram estabelecidos padrões de cores e linhas para cada dosagem de ARR, conforme a seguir:



Contudo, em alguns casos fez-se necessário realizar comparação entre as relações água/cimento. Neste caso, adotou-se o seguinte padrão de cores:



### 3.2.4 Propriedades estudadas

As propriedades avaliadas neste estudo experimental foram:

#### 3.2.4.1 Estado fresco

- deformação do tronco de cone na mesa de abatimento – diâmetro de espalhamento (d);
- ensaio do Funil “V” de seção retangular – tempo de escoamento (s);
- massa específica (m);
- perda de fluidez (d' e s');
- tempos de pega (t).

#### 3.2.4.2 Estado endurecido

- evolução da retração autógena (Ra) desde as primeiras horas após a adição de água ao cimento e de 1 dia até os 28 dias,
- evolução da resistência à compressão aos 3 (R3), 7 (R7) e 28 (R28) dias;
- módulo de elasticidade (Ec) medido aos 28 dias.

#### 3.2.4.3 Resumo dos ensaios realizados

Quadro 1 - Resumo dos ensaios realizados definidos pelo programa experimental.

	<b>Ensaio</b>	<b>Propriedades avaliadas</b>	<b>Equipamentos envolvidos</b>	<b>Idade no momento do ensaio</b>	<b>nº resultados (por mistura)</b>
<b>fresco</b>	diâmetro de espalhamento	capacidade de escoar pela ação do peso próprio - habilidade de preenchimento	mesa de abatimento - paquímetro	imediatamente após o preparo	5 a 11 *
	funil V	capacidade de escoamento e de passar por estreitamentos	funil V - cronômetro - inspeção visual do operador		
	massa específica	massa específica	recipiente de metal - balança	imediatamente após o preparo	7 a 11 *
	tempo de pega	tempo de início e fim de pega	penetrômetro com agulha de proctor		
	perda de trabalhabilidade	tempo de aplicação	mesa abatimento – funil V	imediatamente após o preparo até 1 hora	1
	acompanhamento da retração linear (relógio comparador)	retração autógena	relógio comparador com precisão de 0,001mm	entre 1 e 28 dias de idade	2
<b>endurecido</b>	acompanhamento da retração linear (transdutores de deslocamento)	retração autógena	transdutor de deslocamento – termopar tipo K – aquisitor de dados	“tempo zero” até os 3 dias de idade	3
	resistência à compressão	resistência à compressão	prensa	3 e 7 dias de idade	4
				28 dias de idade	3
	módulo de deformação	módulo de deformação	suporte p/ fixação de sensores de deslocamento -sensores - prensa - célula de carga	28 dias de idade	3

\* A quantidade dos ensaios realizados no estado fresco foi variável, pois vários ensaios tiveram que ser repetidos, e todas as argamassas moldadas foram antes submetidas ao ensaio da avaliação da fluidez para garantir seu comportamento auto-adensável.



## **4 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO**

Serão apresentados os procedimentos e métodos de ensaio nos estados fresco e endurecido das argamassas auto-adensáveis.

### **4.1 Propriedades no estado fresco**

Os ensaios no estado fresco foram realizados antes de qualquer outro ensaio, de modo a garantir o comportamento auto-adensável das argamassas. Este comportamento foi determinado visualmente, quando as argamassas tinham a capacidade de preencher as formas sem o auxílio da espátula. Foi determinado que a argamassa poderia ser considerada auto-adensável com diâmetro de espalhamento a partir de 200 mm e tempo de escoamento inferior a 9 segundos. É importante esclarecer que os parâmetros estabelecidos foram determinados para as argamassas aqui estudadas, pois os materiais utilizados, principalmente, areia e cimento, influenciam diretamente na fluidez das misturas. Portanto, estes parâmetros poderão não ser aplicáveis em outras misturas.

#### **4.1.1 Ensaio da mesa de abatimento – diâmetro de espalhamento**

O ensaio da mesa de abatimento, também conhecido como índice de consistência, possibilita analisar a capacidade de escoar pela ação do peso próprio e sua habilidade de preenchimento. Este ensaio consiste no preenchimento de um tronco de cone sem adensamento, o qual é suspenso verticalmente e, após a argamassa parar de se mover, são medidos dois diâmetros ortogonais. O valor final é a média destas duas medidas (d). Este ensaio é padronizado pela NBR 13276-1995, porém, foram feitas pequenas adaptações: o material não foi adensado e não foram realizados golpes na mesa por se tratar de material auto-adensável (Figura 16).



Figura 16 - Ensaio da mesa de abatimento. Em a) preenchimento do recipiente. Em b) espalhamento da argamassa e medidas ortogonais  $d1$  e  $d2$ .

O ensaio da mesa de abatimento foi realizado para todas as misturas confeccionadas ao longo da execução do programa experimental. Portanto, para cada uma das misturas foram realizados de 5 a 11 ensaios, e foi considerada a média dos resultados, desconsiderando os valores espúrios.

#### 4.1.2 Ensaio do funil “V” – tempo de escoamento

Para avaliar a capacidade de escoamento da argamassa e de passar por restrições apenas com seu peso próprio, foi realizado o ensaio do Funil V, de seção retangular. O ensaio consiste em medir o tempo necessário para que a argamassa possa escoar pelo funil resistindo à segregação. Preenche-se o funil por completo sem o adensamento da argamassa e abre-se a portinhola inferior. Com o auxílio de um cronômetro, mede-se o tempo de escoamento da argamassa até que a luz seja visível através da parte superior do equipamento (Figura 17).

Como este ensaio faz parte da caracterização das argamassas auto-adensáveis, também para todas as misturas confeccionadas ao longo da execução do programa experimental, o ensaio do funil “V” foi realizado. Portanto, para cada uma das misturas foram realizados de 5 a 13 ensaios, e foi considerada a média dos resultados, desconsiderando os valores espúrios.



Figura 17 - Ensaio do funil V. Em a) preenchimento do recipiente. Em b) escoamento da argamassa após aberta a portinhola inferior.

#### 4.1.3 Massa específica das argamassas auto-adensáveis

Este ensaio seguiu parcialmente a NBR 13278 (1995). A principal modificação do ensaio sugerido pela norma foi a ausência de adensamento da mistura no recipiente. Além disso, foi utilizado um recipiente de metal, e de volume diferente do recomendado pela referida norma (Figura 18).



Figura 18 - Recipiente para a realização do ensaio de massa específica.

Para maior confiabilidade dos resultados, o ensaio da massa específica foi realizado para todas as misturas confeccionadas ao longo da execução do programa experimental. Portanto, para cada uma das misturas foram realizados de 7 a 13 ensaios, e foi considerada a média dos resultados, desconsiderando os valores espúrios.

#### 4.1.4 Ensaio de perda de trabalhabilidade

O ensaio da perda de trabalhabilidade tem como objetivo verificar o tempo de aplicação das argamassas, pois devido à ação do superplastificante, este período tende a ser limitado.

Para todas as misturas, imediatamente depois de concluída a homogeneização, foram realizados os ensaios de mesa de abatimento (diâmetro de espalhamento – d) e do funil “V” (tempo de escoamento – s), realizados no denominado “tempo zero”<sup>2</sup>.

Depois da realização destes ensaios no “tempo zero” as argamassas foram colocadas num recipiente plástico fechado permanecendo na sala climatizada e os ensaios repetidos aos 30 e 60 minutos<sup>3</sup>, para novas medidas dos diâmetros de espalhamento e tempos de escoamento. Aproximadamente 2 minutos antes de repetir os ensaios, as argamassas foram homogeneizadas com o auxílio de uma espátula.

#### 4.1.5 Tempo de pega

O ensaio de pega, determinado através do método de resistência à penetração, teve dois objetivos:

- determinar o tempo zero, a partir do qual a retração autógena começará a ser considerada;
- verificar se o aditivo redutor de retração interfere nos tempos de pega, agindo como retardador de pega, conforme pesquisado.

Os tempos de início e fim de pega foram determinados através do método de resistência à penetração, de acordo com a NBR NM 9 (2003). Dois corpos de prova foram moldados, protegidos no topo com plástico e armazenados em câmara úmida, sob temperatura de  $25 \pm 2$  °C e umidade relativa do ar superior a 90%. Desta forma, os resultados são a média de duas determinações (Figura 19).

O ensaio consiste em medir a resistência de penetração das argamassas através do penetrômetro com anel dinamométrico, e registrar o início de pega quando a resistência à penetração atingir a 3,4 MPa e o fim de pega quando a resistência à penetração atingir a 27,0 MPa, conforme a NBR NM 9 (2003).

---

<sup>2</sup> O “tempo zero” na verdade oscila entre 6 e 10 minutos, pois após o contato do aglomerante com a água, são necessários 6 minutos para a completa homogeneização da mistura, e os ensaios de funil e mesa de abatimento não são realizados simultaneamente.

<sup>3</sup> 30 e 60 minutos após o primeiro contato do aglomerante com a água.



(a)



(b)

Figura 19 - Resistência à penetração (a) Corpos de prova moldados e protegidos no topo com plástico. (b) Penetrômetro com anel dinamométrico e agulha de seção circular imersa em argamassa.

## 4.2 Acompanhamento da retração linear

### 4.2.1 Relógio comparador

Este ensaio utiliza os corpos de prova descritos na norma norte-americana ASTM C 490 - 04 (2003). Trata-se de corpos prismáticos, de dimensões 2,5 x 2,5 x 28,5 cm, com um pino metálico em cada uma das extremidades, axialmente centrados (Figura 20). A distância interna entre os pinos é chamada distância livre, e deve ser tomada antes da moldagem dos prismas.

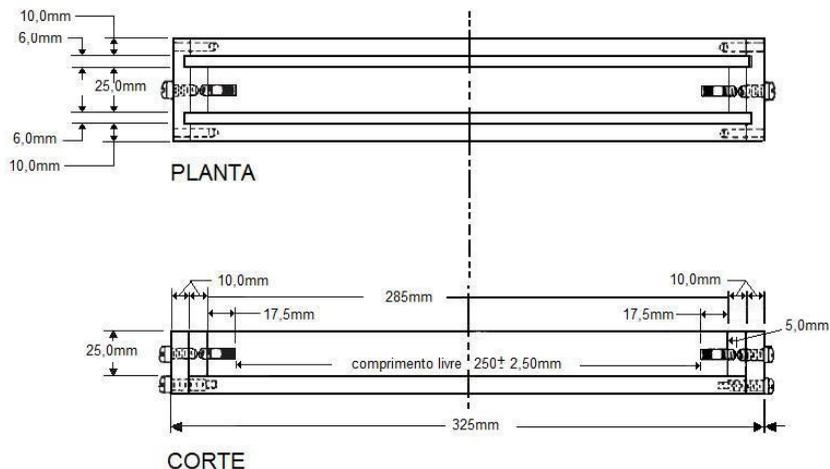


Figura 20 - Modelo de molde utilizado para preparo dos corpos de prova submetidos aos ensaios de retração com relógio comparador. Os corpos de prova prismáticos são baseados no descrito pela ASTM C 490 - 04 (2003). Para o ensaio de retração com o transdutor de deslocamento o mesmo molde foi utilizado, no entanto com outros modelos de pinos

Para cada traço estudado foram moldados 5 prismas. Dentro das formas metálicas, foram confeccionadas formas de plástico endurecido para auxiliar a permanência dos prismas em condições autógenas (Figura 21). Os prismas foram moldados em sala climatizada e permaneceram em câmara úmida até completar a idade de 22 horas, quando se iniciava a desmoldagem e a embalagem dos prismas para que a primeira leitura fosse realizada o mais próximo possível da idade de 01 dia. A forma de plástico não fora retirada e os prismas foram embalados em fita adesiva aluminizada. A primeira leitura foi realizada logo após a selagem dos prismas. 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.



Figura 21 - (a) Molde metálico com forma plástica . (b) moldagem dos prismas.

A conferência das condições autógenas foi realizada dia-a-dia com a pesagem dos prismas. A variação de massa dos prismas foi regularmente medida em balança, com precisão de 0,01g, após cada medida com relógio comparador.

Durante todo o período, os prismas foram mantidos em sala climatizada, com umidade e temperatura controladas. Durante o tempo em que os prismas estiveram em ensaio foram registradas temperaturas de 24 °C a 17,8°C. A umidade relativa no interior da sala, por sua vez, teve máxima registrada de 46% e mínima de 37%.

O ensaio de medição da retração pelo relógio comparador está ilustrado na Figura 22. A medição dos corpos de prova foi realizada até os 28 dias. O método utilizado foi o proposto pela ASTM C 490-04 (2003). Este consiste na medida do corpo de prova posicionado verticalmente, tendo um relógio medidor em contato com um dos pinos expostos. Foi utilizado 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 maior 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 maior medida registrada pelo relógio comparador é a leitura considerada. Após cada medição, os prismas foram pesados e reconicionados à posição horizontal sobre roletes.

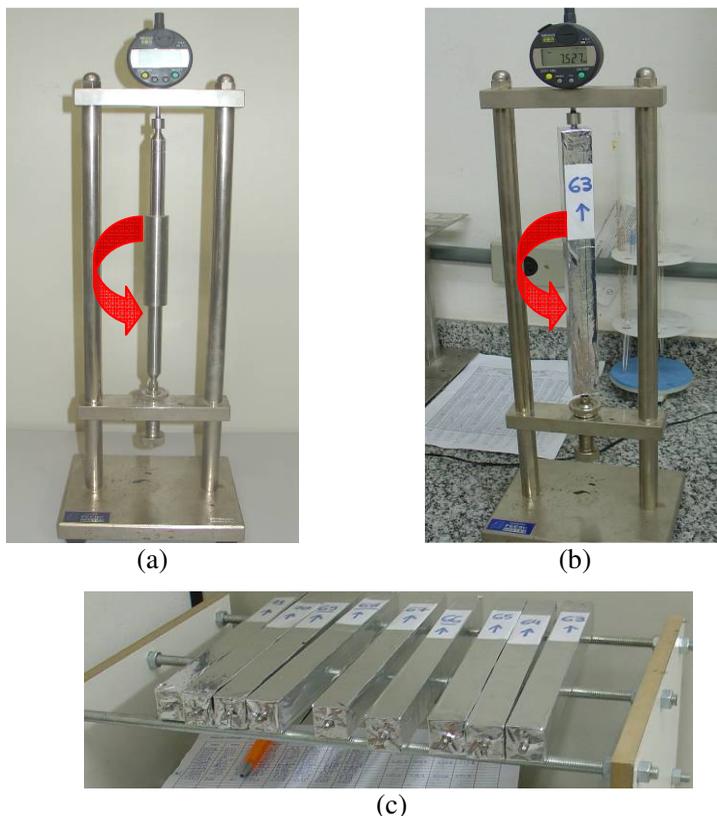


Figura 22 - Medidas de retração com corpos de prova prismáticos com base no procedimento proposto pela ASTM C 490 -04 (2003). Em (a) calibração do relógio comparador com base na barra de referência. Em (b) quadro de medição com corpo de prova posicionado para leitura. Em destaque a flecha indicativa da rotação do corpo sobre o próprio eixo e a seta indicando a extremidade do prisma que deve ser sempre orientada para cima durante as medições. Em (c) corpos de prova em repouso sobre roletes, na posição em que permaneceram entre as medições.

Para calcular a variação de comprimento dos corpos de prova foi utilizada a Equação 4:

$$\varepsilon_{\text{medida}} = \frac{(L_{x_i} - L_i)}{G} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

onde:

$\varepsilon_{\text{medida}}$  = deformação medida (mm/mm x  $10^{-6}$ )

$L_i$  = leitura inicial do comprimento do corpo de prova [mm]

$L_{x_i}$  = leitura de comprimento do corpo de prova realizado na idade prevista [mm]

G = distância interna livre entre os pinos, medido para cada corpo de prova [mm]

O resultado da aplicação da Equação 4 são valores expressos em porcentagem. Todavia, é largamente difundida a unidade mm/mm x  $10^{-6}$ , definida por Metha e Monteiro (1994) como microdeformação<sup>4</sup>.

#### 4.2.2 Transdutores de deslocamento

Para cada argamassa preparada foram moldados 2 prismas. Dentro das formas metálicas, foram confeccionadas formas de plástico endurecido, sendo todas as faces dos prismas seladas, para evitar a troca de umidade com o ambiente ao longo dos 3 dias de ensaio. Após a moldagem dos prismas a face superior tem reforço na selagem, realizado com fitas de plástico. Durante este período os prismas permaneceram moldados, e os próprios moldes são parte do aparato utilizado nas medições. Como existia apenas um equipamento para a realização do ensaio, e ao todo seriam 12 misturas para testar, foram estabelecidos 3 dias a duração do ensaio como tempo suficiente, já que aos 3 dias também haveria os resultados da retração realizados pelo relógio comparador e da resistência à compressão.

Nas extremidades da forma em que são moldados os prismas ficam dispostos dois pinos metálicos alinhados com o eixo longitudinal. Um deles atravessa a barreira de contenção, e fica em contato com o transdutor de deslocamento. Este pino fica livre para a retração ou a expansão do prisma. A extremidade do corpo de prova em contato com o transdutor é considerada livre, apesar do possível atrito entre o pino e

---

<sup>4</sup> Tradução do termo em Inglês “microstrain”.

o furo passante do molde. O pino inserido na outra extremidade do corpo de prova permanece fixo ao longo de todo o ensaio. A cabeça dos pinos permanece no interior da forma, de modo que com o endurecimento da argamassa esteja ancorada. Apenas um transdutor foi utilizado em contato com cada corpo de prova. A distância (interna) entre os pinos é medida, e considerada nos cálculos como a distância livre.

A temperatura de um dos corpos de prova de cada mistura também foi monitorada por um termopar do tipo K inserido na meia-altura da seção do prisma, 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. A retração autógena foi calculada descontando-se a parcela referente às deformações térmicas pela Equação 5:

$$\varepsilon_{RA} = \varepsilon_{medida} - \varepsilon_{\theta} \quad \text{Equação 5}$$

onde:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{RA} &= \text{deformação por retração autógena (mm/mm x } 10^{-6}\text{)} \\ \varepsilon_{\theta} &= \text{deformação por variação térmica (mm/mm x } 10^{-6}\text{)} \end{aligned}$$

A retração ou expansão térmica foi calculada pela Equação 6:

$$\varepsilon_{\theta} = \alpha \times \Delta T \quad \text{Equação 6}$$

onde:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{coeficiente de variação térmica (adotado igual a } 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \\ \Delta T &= \text{variação de temperatura na mistura} \end{aligned}$$

A Figura 23 ilustra a bancada de retração composta de moldes metálicos e transdutores de deslocamento e a Figura 24 mostra o esquema de montagem da bancada de retração:

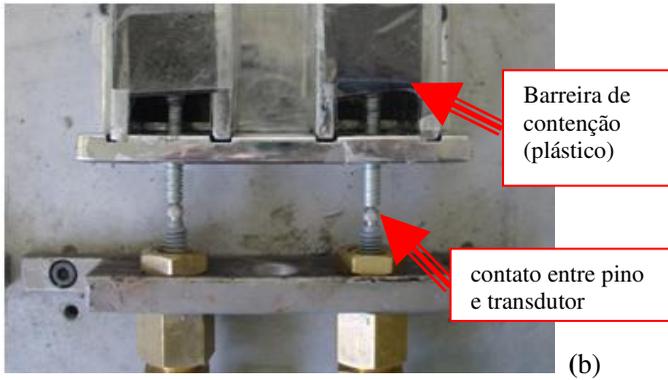
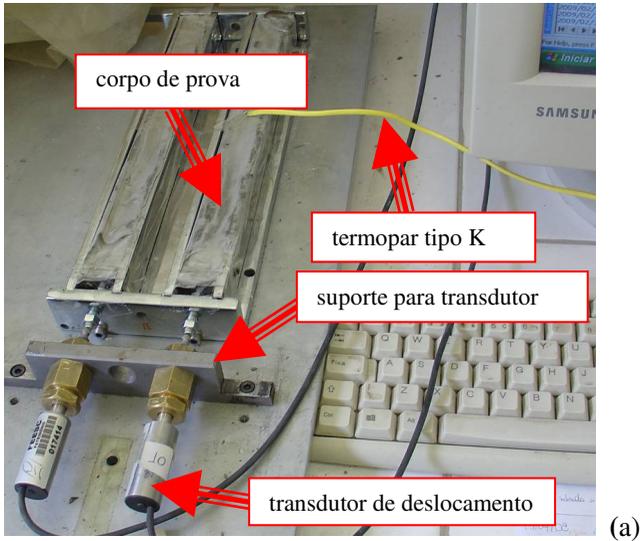


Figura 23 - Bancada de retração composta de moldes metálicos e transdutores de deslocamento. Em a) vista da bancada com amostra em ensaio. Em b) contato entre pino e transdutor

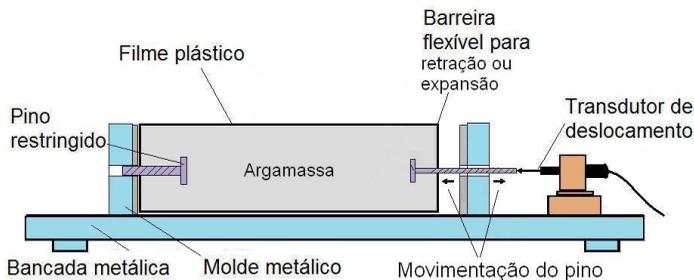


Figura 24 - Esquema da bancada de retração.

Os corpos de prova e equipamentos que compõem a bancada de retração permaneceram em sala climatizada durante todo o período. As medidas de deformação foram tomadas de maneira automatizada, em intervalos de 20 minutos, por sensores de deformação conectados a um aquisitor de dados.

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 os 2 prismas de cada mistura.

### 4.3 Propriedades no estado endurecido

#### 4.3.1 Resistência à compressão

O procedimento de moldagem dos corpos de prova foi executado de acordo com a NBR 5738 (2003), com a diferença da ausência de adensamento, por se tratar de material auto-adensável. Foram utilizados corpos de prova de dimensões 5x10 cm em formas plásticas, e após a moldagem, o topo foi protegido com plástico (Figura 25). Após a moldagem, eles foram mantidos em câmara úmida até a idade de 1 dia, quando foram desformados e transferidos para tanque de água com temperatura controlada conforme a referida norma, até o dia de ruptura.



Figura 25 - (a) Moldagem dos corpos de prova sem adensamento. (b) Proteção com plástico no topo dos corpos de prova.

Para cada traço foram moldadas 10 unidades de corpos de prova, sendo 3 unidades para as idades de 3 dias, 3 unidades para 7 dias e 4 unidades para ruptura aos 28 dias. Os resultados apresentados é a média das resistências obtidas a partir destes corpos de prova.

Na data de cada ensaio à compressão, os corpos de prova a serem rompidos foram retificados com disco diamantado e medidos com paquímetro digital, para fazer a correção prescrita pela NBR 7680/07 em função da relação  $h/d$ . O ensaio de resistência à compressão foi executado em prensa elétrica marca Pavitest, Modelo I-3025-A, com capacidade de carga de 100t, calibrada de 6 em 6 meses, conforme ilustra a Figura 26.



Figura 26 - Ensaio de resistência à compressão axial.

### 4.3.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma importante característica dos materiais a base de cimento. Esta propriedade 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 um dos fatores que pode induzir à fissuração, além da deformação por retração e resistência à tração.

A realização do ensaio baseou-se na NBR 8522 (2003). O método de ensaio utilizado neste trabalho toma esta norma como base, e por ele foram determinados os módulos de elasticidade (Figura 27). Para cada mistura, o ensaio foi realizado em 3 corpos de prova, sempre aos 28 dias de idade, e os mesmos corpos de prova foram posteriormente ensaiados à compressão.

A NBR 8522 (2003) recomenda que sejam realizados três ciclos de carregamento até a tensão maior ( $\sigma_b$ ) e descarregamento até a tensão básica ( $\sigma_a$ ) antes de realizar as leituras definitivas de deformação para o cálculo de módulo de elasticidade. O carregamento deve ser aplicado a uma velocidade que conduza a uma deformação específica constante de  $(10 \pm 2) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  ou a uma tensão constante de  $(0,25 \pm 0,05) \text{ MPa/s}$  até que seja alcançada uma tensão de aproximadamente 40% da resistência à compressão do material ( $\sigma_b$ ). No entanto, estes ciclos de pré-carregamento não foram realizados, pois a prensa não tem capacidade para manter a carga constante.

O aparato utilizado para monitoramento das deformações ao longo do carregamento pode ser visualizado na Figura 27. Ele é composto por dois suportes metálicos presos, por 3 parafusos cada, ao corpo de prova. Em um dos suportes são fixados dois relógios comparadores com resolução de  $1 \pm 0,001 \text{ mm}$ . A carga é aplicada uma única vez em velocidade constante conforme a NBR 5738 (2003) até atingir aproximadamente 70% de sua carga de ruptura. Um operador controla a aplicação de carga e outros dois operadores realizam as leituras de deformação a cada 1000 kg aplicados. Com os resultados plotados em um gráfico de tensão x deformação, pode-se determinar o

módulo de deformação de cada espécime. Neste trabalho, foi utilizada a função Atingir Meta do Software Microsoft Office Excel para determinar o módulo de deformação.



Figura 27 - Ensaio de módulo de deformação: Aparato utilizado para realização do ensaio em corpos de prova cilíndricos, 5 x 10 cm.



## **5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análise dos ensaios realizados. Para a análise estatística dos resultados foi utilizado o programa Microsoft Excel 2007. Em todas as análises realizadas, as hipóteses sobre a homogeneidade de variância e a normalidade dos dados foram ensaiadas e considerados significativos os resultados com nível de confiabilidade igual ou superior a 95%. Para a comparação de médias foi realizado o teste de Duncan, pois permite distinguir quais níveis são diferentes significativamente entre si.

### **5.1 Propriedades no estado fresco**

#### **5.1.1 Ensaio da mesa de abatimento – diâmetro de espalhamento**

Como foi discutido anteriormente, para que uma argamassa seja considerada auto-adensável, ela deve resistir à segregação e à exsudação, ter a capacidade de preenchimento de espaços e de passar por restrições apenas com seu peso próprio.

O ensaio da mesa de abatimento permite verificar visualmente a ocorrência de segregação e exsudação, e a procura pelo teor de aditivo superplastificante foi obter a máxima fluidez sem que houvesse nenhum destes fenômenos.

Além disso, este ensaio permite visualmente comparar as misturas no que diz respeito à sua viscosidade e fluidez. Como foi mencionado anteriormente, não foi possível manter todas as misturas de diferentes relações água/cimento na mesma fluidez, pois dependendo da quantidade de aditivo superplastificante, a mistura não conseguia manter a coesão. Contudo, como o ensaio se complementa com o ensaio do funil “V” e seus resultados foram satisfatórios (descrito a seguir), as misturas foram aceitas com esta diferença de diâmetro de espalhamento.

Os ensaios da mesa de abatimento foram repetidos sempre antes de qualquer moldagem. Os valores espúrios foram desconsiderados e as médias foram analisadas estatisticamente pelo teste de Duncan com confiabilidade de 95%. Na Figura 28 são visualizados os resultados, com as médias e os pontos obtidos.

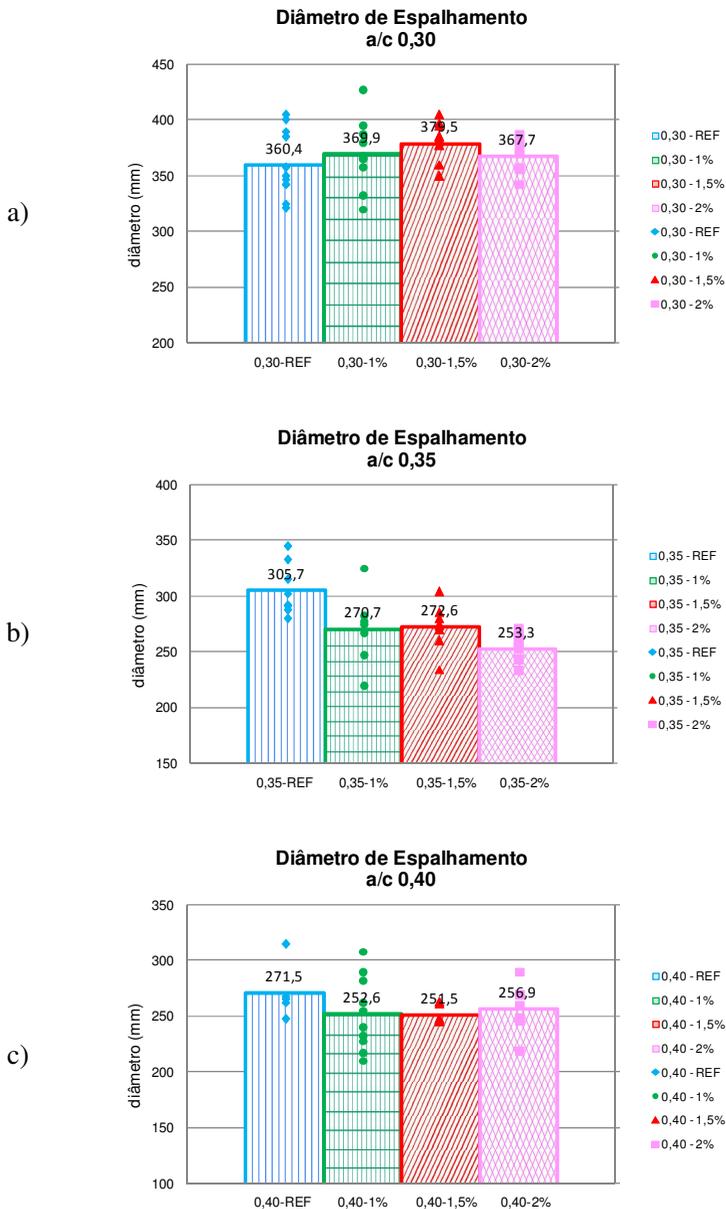


Figura 28 - Diâmetro de espalhamento das AAA. Em a) relação a/c 0,30. Em b) relação a/c 0,35. Em c) relação a/c 0,40.

No grupo de relação água/cimento 0,30, nenhuma mistura diferiu significativamente entre si, com 95% de confiabilidade.

No grupo de relação água/cimento 0,35, a argamassa de referência apresentou diâmetro de espalhamento superior às misturas com teores de ARR. Entre estas misturas, os resultados foram muito próximos.

Também para o grupo de relação água/cimento 0,40, não houve diferença significativa entre as misturas.

É importante acrescentar que, apesar de haver diferenças entre os diâmetros de espalhamento, todas as misturas apresentaram comportamento de argamassas auto-adensáveis, pois o ensaio se complementa com o tempo de escoamento, cujos resultados são apresentados a seguir.

### **5.1.2 Ensaio do funil “V” – tempo de escoamento**

São apresentados na Figura 29 os tempos de escoamento obtidos pelo ensaio do funil “V” para cada grupo de relação água/cimento.

Os ensaios foram repetidos sempre que as argamassas eram confeccionadas (antes de qualquer moldagem). Os resultados foram analisados com 95% de confiabilidade e os valores espúrios foram desconsiderados.

Dentro de cada grupo de relação água/cimento, não houve diferença significativa entre as argamassas estudadas. Como o ensaio do funil “V” complementa o ensaio da mesa de abatimento e vice-versa, os teores de superplastificante encontrados para cada relação água/cimento foram considerados satisfatórios.

Nota-se que quanto maior a relação água/cimento, menor é o tempo de escoamento, ou seja, maior é a fluidez da argamassa. Em contrapartida, menor é o diâmetro de espalhamento, ou seja, menor é a viscosidade da mistura. Isso pode ser explicado pela influência do aditivo superplastificante, que adicionado em maiores quantidades torna a argamassa mais viscosa. Por exemplo: Para as argamassas de relação a/c igual a 0,30, o teor de aditivo superplastificante utilizado foi de 1,0%. Este teor não ultrapassa o teor máximo recomendado pelo fabricante, mas faz com que a viscosidade da mistura seja maior do que na argamassa de relação a/c 0,40, na qual foi adotado um teor de apenas 0,25%. Apesar desta diferença, todos os parâmetros estabelecidos para que uma argamassa seja considerada auto-adensável foram atingidos em todas as misturas e para todas as relações água/cimento.

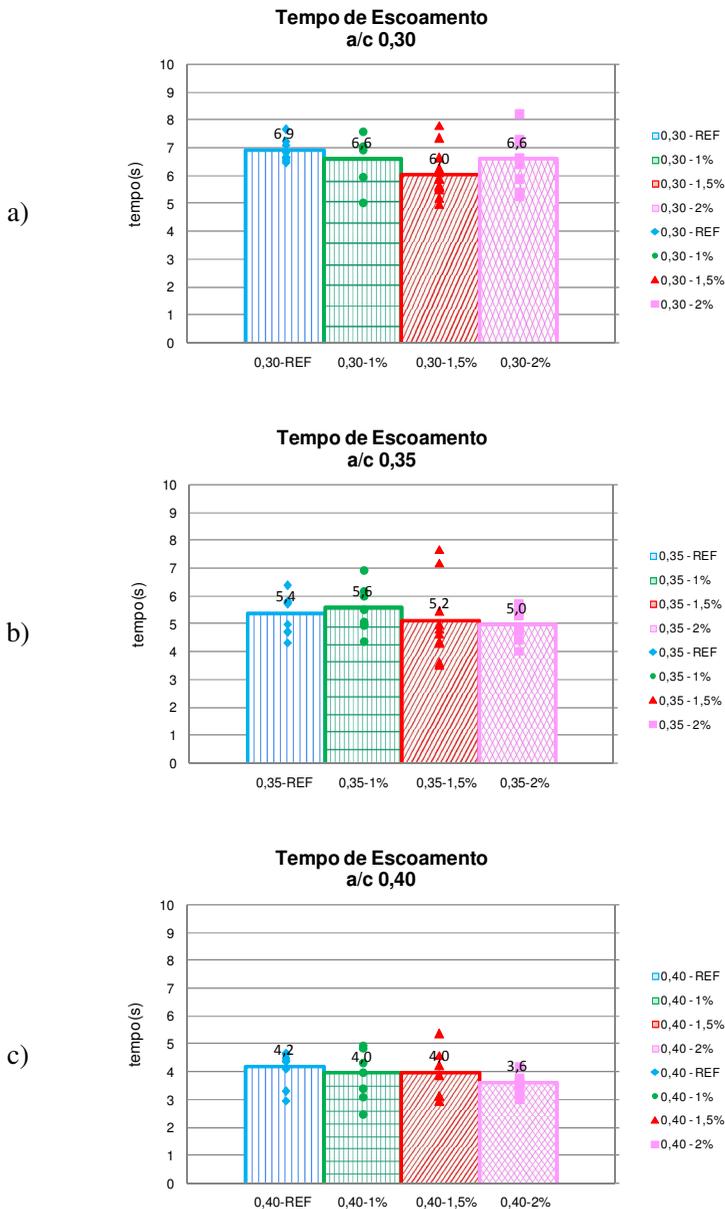


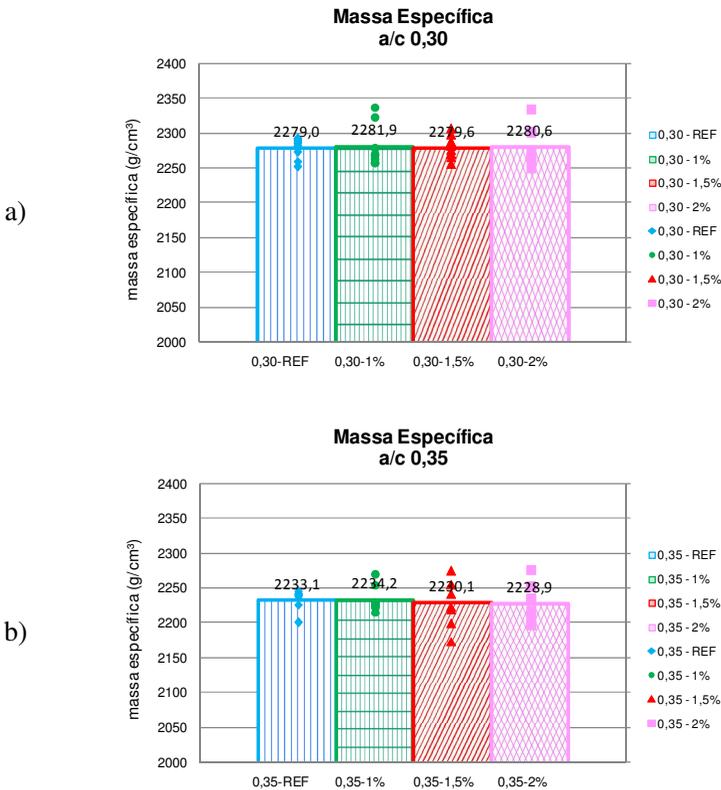
Figura 29 - Tempo de escoamento das AAA. Em a) relação a/c 0,30. Em b) relação a/c 0,35. Em c) relação a/c 0,40.

### 5.1.3 Massa específica das argamassas auto-adensáveis

Os resultados da realização do ensaio da massa específica estão expressos na Figura 30, e suas médias foram analisadas estatisticamente pelo teste de Duncan.

Dentro de cada grupo de relação água/cimento, não houve diferença significativa entre as misturas estudadas.

A principal conclusão dos resultados do ensaio de massa específica é que a adição do ARR não incorporou ar à mistura, em nenhum dos teores ensaiados.



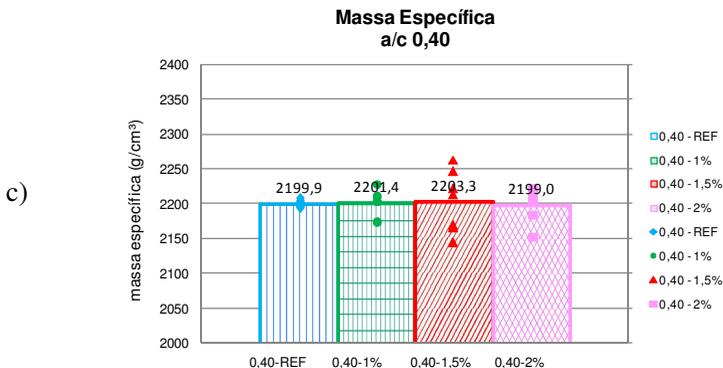


Figura 30 - Massa específica das AAA. Em a) relação a/c 0,30. Em b) relação a/c 0,35. Em c) relação a/c 0,40.

## 5.1.4 Ensaio de perda de trabalhabilidade

Em todos os casos, as argamassas de referência apresentaram maiores perdas frente às argamassas com adição de ARR. Conforme mencionado pelo fabricante, o ARR poderá causar um leve efeito de retardo da pega, inferior à 1 hora, o que ajudará a aumentar o tempo de manutenção do abatimento.

### 5.1.4.1 Relação a/c 0,30

Os resultados do grupo de relação a/c 0,30 estão representados na Figura 31. As perdas de viscosidade<sup>5</sup> obtidas pelos diâmetros de espalhamento e perdas de fluidez obtidas pelos tempos de escoamento apresentaram grande impacto entre o “tempo zero” e o segundo ensaio (aos 30 minutos). As misturas com maiores teores de ARR (1,5% e 2%) aos 30 minutos apresentaram valores de diâmetro de espalhamento superiores a 200 mm e tempos de escoamento inferiores a 9 segundos, o que as enquadraria ainda nos padrões de argamassa auto-adensável neste período. Apesar de permanecerem com diâmetro de espalhamento superior a 200 mm, aos 60 minutos todas as misturas apresentaram tempo de escoamento superior a 9 segundos, indicando que, a partir dos 30 minutos, seria necessário o uso do adensamento, pois as argamassas perderam as características básicas de um material auto-adensável.

<sup>5</sup> O diâmetro de espalhamento está apenas relacionado à viscosidade, mas não pode ser avaliado como viscosidade sem o uso do reômetro. Aqui usa-se o termo “viscosidade” apenas para diferenciar do termo “fluidez” medido pelo ensaio do funil “V”.

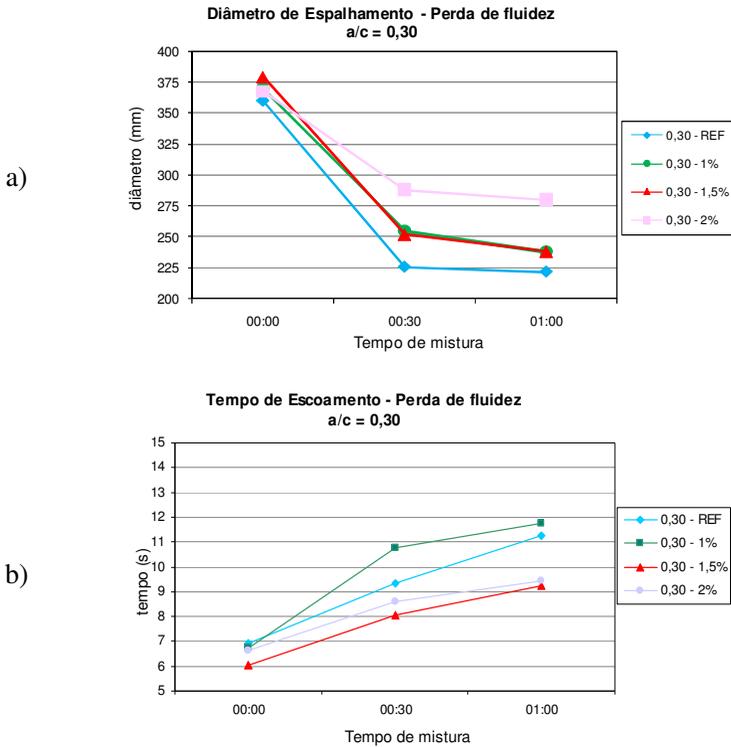


Figura 31 - Perda de fluidez das AAA - relação a/c 0,30. Em a) Diâmetro de espalhamento. Em b) Tempo de escoamento.

#### 5.1.4.2 Relação a/c 0,35

Na Figura 32 são visualizados os resultados de perda de fluidez para o grupo de relação a/c 0,35. As perdas de viscosidade obtidas pelos diâmetros de espalhamento e perdas de fluidez obtidas pelos tempos de escoamento apresentaram pouco impacto entre o “tempo zero” e o ensaio realizado aos 30 minutos. Porém, as perdas acentuaram-se após este período, concluindo que o comportamento auto-adensável da argamassa de relação a/c 0,35 é superior a 30 minutos e inferior a 60 minutos, sendo necessário o uso de adensamento após este período.

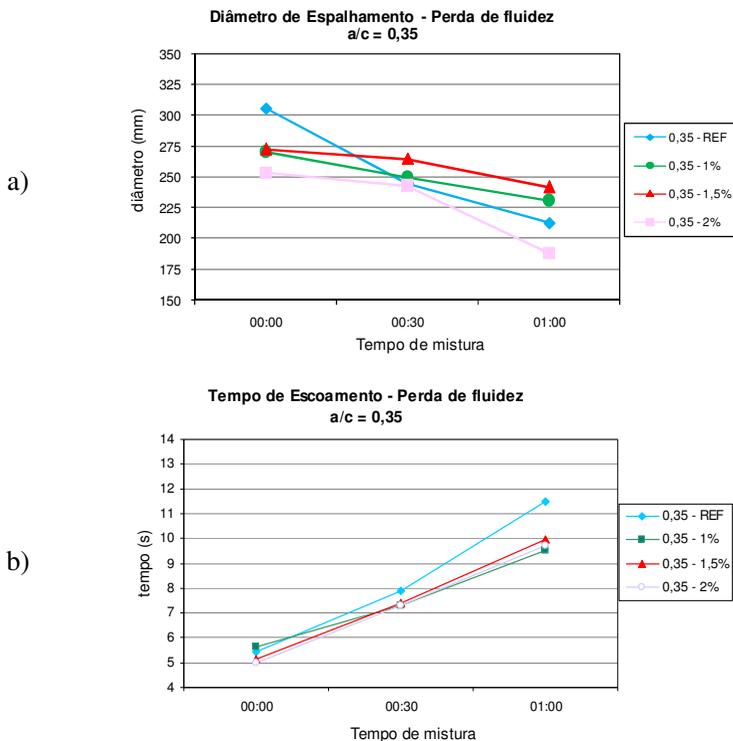


Figura 32 - Perda de fluidez das AAA - relação a/c 0,35. Em a) Diâmetro de espalhamento. Em b) Tempo de escoamento.

### 5.1.4.3 Relação a/c 0,40

Os resultados para o grupo de relação a/c 0,40 estão representados na Figura 33, onde se verifica que o comportamento das argamassas entre os tempos 0, 30 e 60 minutos é quase “linear”, ou seja, as perdas ocorreram de forma homogênea ao longo deste período, não havendo perdas acentuadas entre o primeiro intervalo de ensaio, como ocorreu com a relação a/c 0,30, ou entre o segundo intervalo de ensaio, como ocorreu na relação a/c 0,35. Contudo, estas perdas ocorreram, pois no ensaio aos 60 minutos todas as argamassas apresentaram diâmetro de espalhamento inferior a 200 mm, concluindo que o comportamento auto-adensável da argamassa de relação a/c 0,40 é superior a 30 minutos e inferior a 60 minutos, sendo necessário o uso de adensamento após este período.

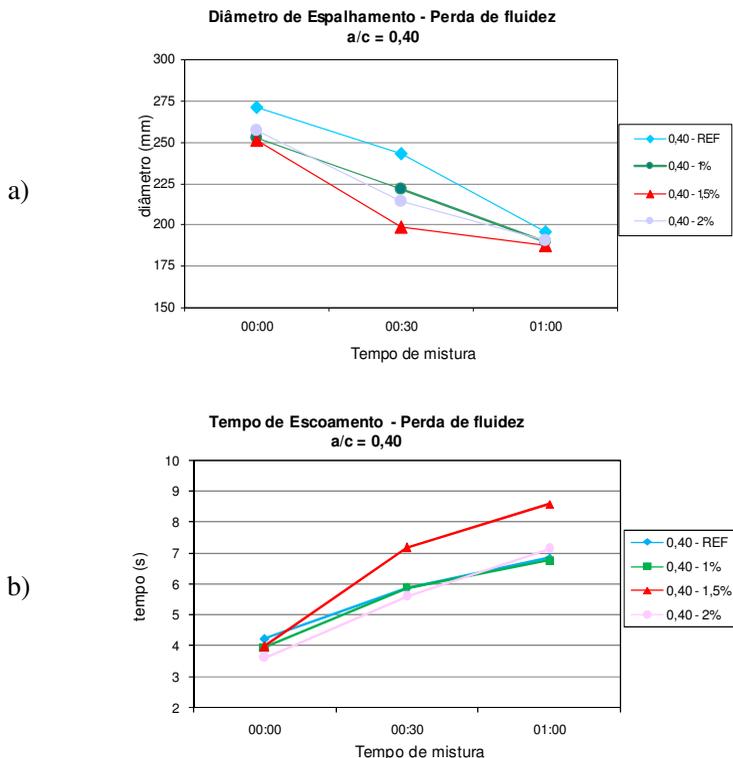


Figura 33 - Perda de fluidez das AAA - relação a/c 0,40. Em a) Diâmetro de espalhamento. Em b) Tempo de escoamento.

### 5.1.5 Tempo de pega

Estudos comprovam que um dos efeitos negativos do ARR é o retardo de pega. Para confirmar este fato, as AAA foram submetidas ao ensaio de pega de acordo com a NBR NM 9 (2003), através do ensaio de resistência à penetração.

Foram realizados 2 ensaios para cada mistura, conforme recomenda a referida norma. Para a análise estatística dos resultados, a diferença entre as médias foram analisadas pelo teste de Duncan, com 95% de confiabilidade. Os dados dos ensaios realizados estão expostos no ANEXO D.

### 5.1.5.1 Relação a/c 0,30

Os tempos de pega para o grupo de relação água/cimento 0,30 em relação às outras relações a/c foram acentuadamente retardados, pois o uso de maior quantidade de superplastificante possui este efeito colateral. A mistura de referência, apesar do atraso do início da pega, foi acelerada se comparada às outras misturas com os teores de ARR, comprovando que a adição do ARR provoca um atraso no início da pega. Não houve diferença significativa entre os tempos de início de pega entre as misturas com teores de ARR. Ao contrário do esperado, o intervalo entre o início e fim de pega foi acelerado quando comparado com a mistura referência, para quaisquer teores de ARR adicionados e, neste caso, não houve diferença entre a mistura referência e às demais argamassas.

Resumindo, a adição de ARR ocasionou retardo no início da pega, mas devido à aceleração entre os tempos de início e fim de pega, não apresentou retardo no fim da pega, quando comparados com a mistura de referência. A Tabela 10 exibe os resultados das médias dos ensaios:

Tabela 10 - Tempos de início e fim de pega - relação a/c 0,30

Mistura	Tempo de início de pega (hh:mm)	Variação em relação à referência (hh:mm)	Tempo de fim de pega (hh:mm)	Variação em relação à referência (hh:mm)	Intervalo entre o início e o fim de pega (hh:mm)	Diminuição ou aumento do intervalo entre o início e o fim de pega (hh:mm)
0,30 - REF	10:32	-	13:15	-	2:42	-
0,30 - 1%	11:09	+ 0:36	13:30	+ 0:15	2:21	- 0:21
0,30 - 1,5%	11:25	+ 0:53	13:53	+ 0:38	2:28	- 0:14
0,30 - 2%	10:56	+ 0:24	12:56	- 0:19	1:59	- 0:43

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

### 5.1.5.2 Relação a/c 0,35

Na Tabela 11 estão expostos os resultados para o grupo de relação água/cimento 0,35, que apresentou variabilidade dos resultados, entre retardo e aceleração de pega. As acelerações do início da pega foram da ordem de 32 minutos para as misturas com 1% e 2% de ARR. Já a mistura com 1,5% de ARR apresentou retardo do início da pega de 22 minutos. O intervalo entre o início e fim de pega não foi muito diferente da mistura de referência. Analisados estatisticamente pelo

método de Duncan, não houve diferenças significativas entre as misturas tanto para o início da pega, quanto para o fim do tempo de pega, contrariando o atraso esperado.

Tabela 11 - Tempos de início e fim de pega - relação a/c 0,35

Mistura	Tempo de início de pega (hh:mm)	Varição em relação à referência (hh:mm)	Tempo de fim de pega (hh:mm)	Varição em relação à referência (hh:mm)	Intervalo entre o início e o fim de pega (hh:mm)	Diminuição ou aumento do intervalo entre o início e o fim de pega (hh:mm)
0,35 - REF	7:40	-	9:33	-	1:53	-
0,35 - 1%	7:06	- 0:33	8:43	- 0:50	1:36	- 0:17
0,35 - 1,5%	8:02	+ 0:22	9:09	- 0:24	1:06	- 0:14
0,35 - 2%	7:07	- 0:32	9:06	- 0:27	1:58	+ 0:05

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

### 5.1.5.3 Relação a/c 0,40

Para o grupo de relação a/c 0,40, também não houve diferença significativa entre a mistura referência e às demais misturas em relação aos tempos de início e fim de pega. Curiosamente, a mistura com 1,5% de ARR, que apresentou leve retardo no início da pega, também apresentou aceleração no fim da pega, mas não significativamente diferente entre as outras misturas, pelo método de Duncan, conforme ilustra a Tabela 12.

Tabela 12 - Tempos de início e fim de pega - relação a/c 0,40

Mistura	Tempo de início de pega (hh:mm)	Varição em relação à referência (hh:mm)	Tempo de fim de pega (hh:mm)	Varição em relação à referência (hh:mm)	Intervalo entre o início e o fim de pega (hh:mm)	Diminuição ou aumento do intervalo entre o início e o fim de pega (hh:mm)
0,40 - REF	6:16	-	7:33	-	1:17	-
0,40 - 1%	6:34	+ 0:18	8:18	+ 0:45	1:44	+ 0:27
0,40 - 1,5%	6:52	+ 0:36	8:36	+ 1:03	1:43	- 0:26
0,40 - 2%	6:18	+ 0:02	8:24	+ 0:51	2:06	+ 0:49

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

### **5.1.5.4 Comentários**

De acordo com a literatura, a adição do aditivo redutor de retração ocasiona retardo nos tempos de início e fim de pega. Estes efeitos eram esperados nos ensaios realizados, mas os resultados não apresentaram diferenças significativas em relação às amostras de referência, para nenhum teor de ARR adicionado, nem para qualquer relação água/cimento ensaiada.

## **5.2 Acompanhamento da retração linear**

### **5.2.1 Resultados obtidos pelo relógio comparador no quadro de retração**

A medição dos prismas pelo ensaio do relógio comparador foi realizada entre 1 e 28 dias de idade, após a desforma e embalado dos prismas.

A conferência das condições autógenas foi realizada dia-a-dia com a pesagem dos prismas. Mesmo com todos os cuidados para embalar os prismas, não foi possível evitar a perda de massa das amostras. Segundo Illston e Pomeroy (1975), a selagem aceitável ocorre quando a perda de massa do corpo de prova com relação a sua massa de água atinge o valor máximo de 0,5%, para corpos de prova prismáticos de dimensões semelhantes aos corpos de prova ensaiados para este estudo. Os resultados apresentados na Tabela 13 indicam que a selagem foi eficiente, onde a média das perdas de massas foi de -0,12%.

A variação de massa dos prismas foi regularmente medida em balança, com precisão de 0,01g, após cada medida com relógio comparador. A máxima variação de massa ocorreu aos 28 dias para um dos prismas da mistura 0,30-2%. A média da variação máxima de massa aos 28 dias (considerando todos os corpos de prova válidos) foi de -0,12%. 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.

Embora o acompanhamento da retração tenha sido feito ao longo de 28 dias para cada mistura, as idades em que foram tomadas as medidas de cada prisma não coincidem com exatidão. Por isto, após plotar o gráfico microdeformações x idade, foi aplicada a linha de tendência que melhor se ajustasse aos pontos<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Foi utilizado nesta etapa o software Microsoft Office Excel 2007.

Tabela 13 - Variação de massa dos corpos de prova submetidos ao ensaio de retração com relógio comparador. Variação aos 28 dias. Valores negativos indicam a perda de massa

Mistura	Variação máxima de massa (%)	Desvio Padrão
0,30 - REF	-0,15%	0,02%
0,30 - 1%	-0,12%	0,01%
0,30 - 1,5%	-0,14%	0,04%
0,30 - 2%	-0,21%	0,05%
0,35 - REF	-0,11%	0,04%
0,35 - 1%	-0,07%	0,01%
0,35 - 1,5%	-0,17%	0,06%
0,35 - 2%	-0,08%	0,01%
0,40 - REF	-0,05%	0,02%
0,40 - 1%	-0,13%	0,03%
0,40 - 1,5%	-0,09%	0,04%
0,40 - 2%	-0,16%	0,02%
Variação média da massa	-0,12%	
Variação máxima da massa	-0,21%	

Para cada mistura foram moldados 5 corpos de prova. Porém, em alguns casos houve quebra de um dos corpos de prova e foram registrados 4 prismas. Para cada prisma, foi adicionada uma linha de tendência com função logarítmica para a determinação da retração autógena aos 3, 7 e 28 dias. Seus gráficos, equações e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) estão expostos no Anexo A. Com base nestes valores foi feita a análise estatística dos resultados.

Para a análise, as misturas foram separadas em grupos de acordo com a relação água/cimento.

### 5.2.1.1 Relação a/c 0,30

Os valores de retração autógena para o grupo de relação a/c 0,30 aos 3, 7 e 28 dias foram determinados pelas equações das funções logarítmicas e estão representados na Tabela 14. O tratamento estatístico dos resultados foi realizado com ajuda do programa Microsoft Office Excel 2007. Todas as amostras foram analisadas pelo teste de Duncan,

para verificar se há diferença significativa de retração entre as misturas estudadas. Esta análise encontra-se detalhada no Anexo A.

Além disso, a Figura 34 exibe as curvas de retração autógena para o grupo de relação água/cimento 0,30 em função do tempo. Estas curvas foram obtidas através das médias dos prismas. Na ocasião das medidas dos prismas também foi realizado o controle de temperatura da sala climatizada onde se encontravam, que também estão plotadas no gráfico.

Tabela 14 - Equações de correlação logarítmica para expressar a retração autógena em função da idade e respectivos coeficientes de determinação. Valores de retração autógena aos 3, 7 e 28 dias - relação a/c 0,30

Valores de retração autógena para a mistura 0,30 - REF					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 67	$y = -133\ln(x) - 47,57$	0,977	-193,69	-306,38	-490,75
Prisma 68	$y = -150\ln(x) - 47,26$	0,983	-212,05	-339,15	-547,09
Prisma 69	$y = -147\ln(x) - 51,24$	0,977	-212,74	-337,29	-541,07
Prisma 70	$y = -149\ln(x) - 26,51$	0,991	-190,20	-316,45	-523,01
Prisma 71	$y = -156\ln(x) - 19,76$	0,992	-191,14	-323,32	-539,58
Valores de retração autógena para a mistura 0,30 - 1%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 63	$y = -94,8\ln(x) - 27,65$	0,974	-131,80	-212,12	-343,54
Prisma 64	$y = -96,9\ln(x) - 32,68$	0,983	-139,14	-221,24	-355,57
Prisma 65	$y = -101\ln(x) - 33,44$	0,973	-144,40	-229,98	-369,99
Prisma 66	$y = -91,6\ln(x) - 34,74$	0,969	-135,37	-212,99	-339,97
Valores de retração autógena para a mistura 0,30 - 1,5%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 72	$y = -95,3\ln(x) - 5,403$	0,987	-110,10	-190,85	-322,96
Prisma 73	$y = -97,7\ln(x) - 1,01$	0,988	-108,34	-191,13	-326,57
Prisma 74	$y = -93,5\ln(x) + 3,907$	0,971	-98,81	-178,04	-307,65
Prisma 75	$y = -83,3\ln(x) - 14,12$	0,986	-105,63	-176,21	-291,69
Valores de retração autógena para a mistura 0,30 - 2%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 76	$y = -83,9\ln(x) - 7,607$	0,966	-99,78	-170,87	-287,18
Prisma 77	$y = -80,5\ln(x) - 12,40$	0,949	-100,84	-169,05	-280,64
Prisma 78	$y = -82,4\ln(x) - 11,07$	0,940	-101,60	-171,41	-285,64
Prisma 79	$y = -71,0\ln(x) - 30,68$	0,933	-108,68	-168,84	-267,27
Prisma 80	$y = -75,9\ln(x) - 19,87$	0,957	-103,25	-167,56	-272,78

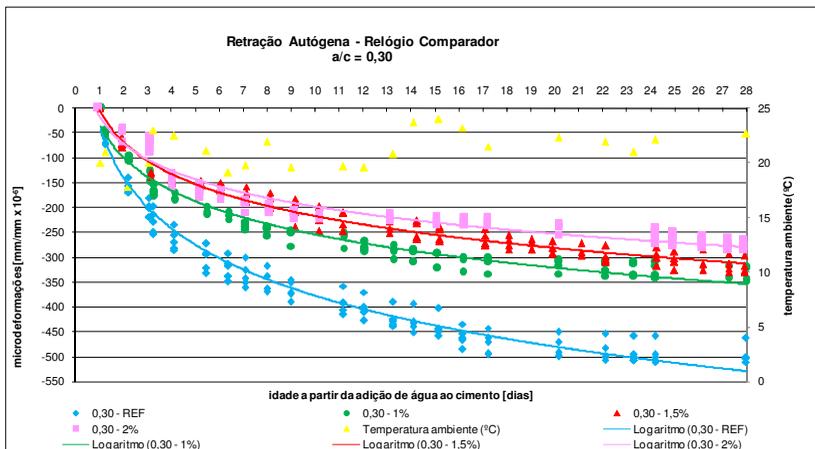


Figura 34 - Retração autóloga – relação a/c 0,30 - medidas realizadas com o relógio comparador.

Conforme esperado, a mistura referência apresentou valores superiores de retração quando comparados a quaisquer teores de ARR, para todas as idades. Isso mostra a eficiência do ARR no combate à retração autóloga.

Todavia, deve-se analisar se as diferenças seriam tão significativas a pontos de apresentar benefícios que justifiquem o uso de maiores teores.

Todas as misturas com os diferentes teores de ARR em todas as idades diferem significativamente entre si, com 95% de confiabilidade, exceto aos 3 dias, em que as misturas com 1,5% e 2% tiveram seus resultados na ordem de  $-100$  microdeformações ( $\text{mm/mm} \times 10^{-6}$ ), conforme destacado<sup>7</sup> na Figura 35, que apresenta a redução da retração autóloga, em função do teor de aditivo ARR, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Para todas as idades, percebe-se que a diferença entre a retração autóloga da argamassa de referência e das outras misturas é muito grande. Isso evidencia o bom desempenho do aditivo na função de diminuir consideravelmente a retração.

<sup>7</sup> ND significa *Não Difere Significativamente*, conforme análise pelo teste de Duncan, com 95% de confiabilidade.

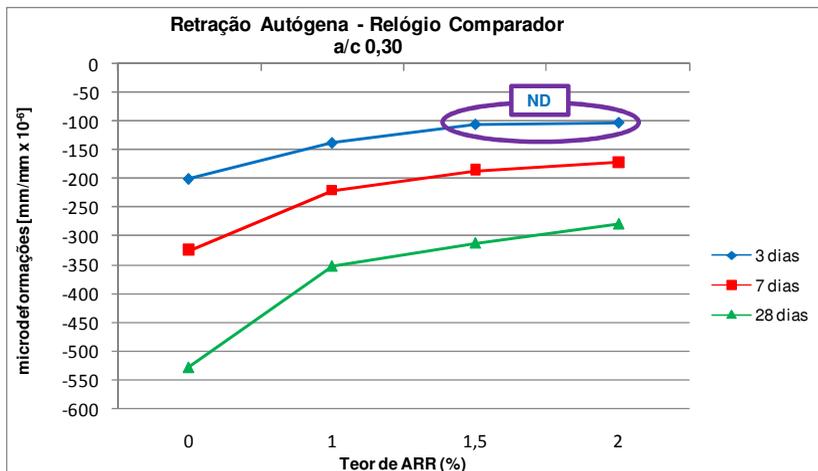


Figura 35 - Variação da retração autóloga – relação a/c 0,30, em função do teor de aditivo, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

A análise estatística pelo método de Duncan nos mostrou que a diferença entre os teores de ARR ensaiados também é significativa, mas é possível visualizar que esta diferença é menor quando comparada com a mistura referência. A eficiência do ARR aumentou conforme o teor de aditivo adicionado. A retração foi reduzida em até 47,3% aos 28 dias, conforme mostra a Tabela 15:

Tabela 15 - Redução da retração aos 3, 7 e 28 dias – relação a/c 0,30

Mistura	3 dias	%	7 dias	%	28 dias	%
0,30 - REF	-199,97	-	-324,52	-	-528,30	-
0,30 - 1%	-137,71	31,1%	-219,13	32,5%	-352,35	33,3%
0,30 - 1,5%	-105,67	47,2%	-183,96	43,3%	-312,05	40,9%
0,30 - 2%	-102,79	48,6%	-169,47	47,8%	-278,57	47,3%

### 5.2.1.2 Relação a/c 0,35

Para o grupo de relação água/cimento 0,35, os valores de retração aos 3, 7 e 28 dias obtidos através das equações logarítmicas estão expostos na Tabela 16:

Tabela 16 - Equações de correlação logarítmica para expressar a retração autógena em função da idade e respectivos coeficientes de determinação. Valores de retração autógena aos 3, 7 e 28 dias - relação a/c 0,35

Valores de retração autógena para a mistura 0,35 - REF					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 101	$y = -108\ln(x) + 6,071$	0,983	-112,58	-204,09	-353,81
Prisma 102	$y = -122\ln(x) + 2,942$	0,987	-131,09	-234,46	-403,59
Prisma 103	$y = -125\ln(x) + 10,81$	0,988	-126,52	-232,43	-405,72
Prisma 104	$y = -111\ln(x) + 5,093$	0,996	-116,85	-210,90	-364,78
Prisma 105	$y = -111\ln(x) - 8,407$	0,989	-129,99	-224,04	-377,92
Valores de retração autógena para a mistura 0,35 – 1%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 81	$y = -74,6\ln(x) - 6,617$	0,971	-88,57	-151,78	-255,20
Prisma 82	$y = -76,6\ln(x) - 33,80$	0,925	-117,95	-182,86	-289,05
Prisma 83	$y = -72,4\ln(x) - 35,92$	0,932	-115,46	-176,80	-277,17
Prisma 84	$y = -73,6\ln(x) - 33,08$	0,925	-113,94	-176,30	-278,33
Prisma 85	$y = -81,5\ln(x) - 20,74$	0,961	-110,28	-179,33	-292,31
Valores de retração autógena para a mistura 0,35 – 1,5%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 86	$y = -66,7\ln(x) - 66,58$	0,916	-139,86	-196,37	-288,84
Prisma 87	$y = -83,5\ln(x) + 2,859$	0,990	-88,88	-159,62	-275,38
Prisma 88	$y = -75,6\ln(x) - 9,491$	0,965	-92,55	-156,60	-261,41
Prisma 89	$y = -71,5\ln(x) + 5,113$	0,968	-73,44	-134,02	-233,14
Prisma 90	$y = -78,5\ln(x) + 20,51$	0,926	-65,73	-132,24	-241,07
Valores de retração autógena para a mistura 0,35 – 2%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 91	$y = -63,9\ln(x) + 10,43$	0,973	-59,77	-113,91	-202,50
Prisma 92	$y = -57,9\ln(x) - 37,02$	0,948	-100,63	-149,69	-229,95
Prisma 93	$y = -62,3\ln(x) - 13,39$	0,988	-81,83	-134,62	-220,99
Prisma 94	$y = -56,8\ln(x) - 14,23$	0,987	-76,63	-124,76	-203,50
Prisma 95	$y = -58,7\ln(x) - 16,67$	0,973	-81,16	-130,89	-212,27

Visualizam-se na Figura 36 as curvas de retração autógena em função do tempo. Todas as amostras foram analisadas pelo teste de Duncan. No anexo B encontram-se os gráficos de cada mistura deste grupo e a análise estatística detalhada.

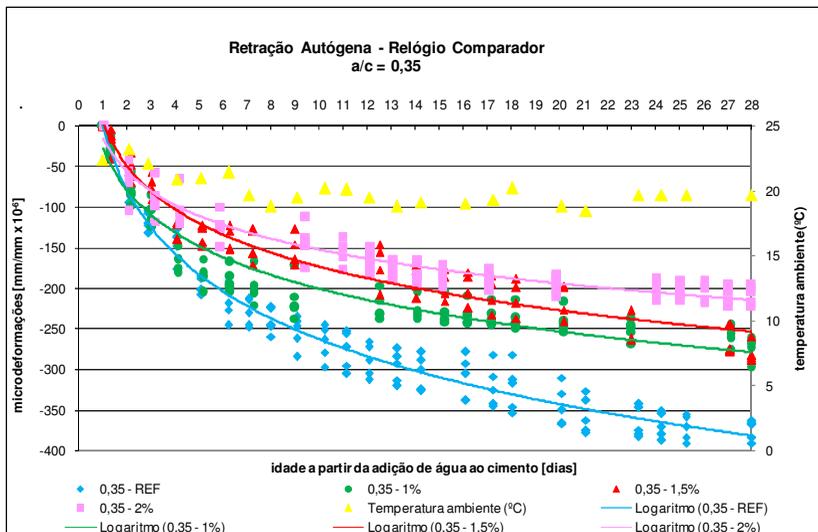


Figura 36 - Retração autôgena – relação a/c 0,35 - medidas realizadas com o relógio comparador.

Na idade de 3 dias, as misturas contendo 0% e 1% de ARR, 1% e 1,5% de ARR, 1,5% e 2% de ARR tiveram seus resultados muito próximos. Para todas as outras misturas, houve grande variabilidade de resultados.

Aos 7 dias, houve diferenças entre todas as misturas, exceto entre as misturas contendo 1% e 1,5% de ARR.

A maior diferença entre a mistura referência e as outras misturas está na idade de 28 dias, pois a eficiência do aditivo foi crescente ao longo do tempo, conforme visualizado na Tabela 17

Tabela 17 - Redução da retração aos 3, 7 e 28 dias – relação a/c 0,35.

Mistura	3 dias	%	7 dias	%	28 dias	%
0,35 - REF	-123,04	-	-220,48	-	-379,90	-
0,35 - 1%	-109,30	11,2%	-173,53	21,3%	-278,61	26,7%
0,35 - 1,5%	-92,13	25,1%	-155,85	29,3%	-260,10	31,5%
0,35 - 2%	-79,98	35,0%	-130,73	40,7%	-213,77	43,7%

A Figura 37 apresenta a redução da retração autógena, em função do teor de aditivo ARR, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os valores que não diferem significativamente (ND) estão em destaque. Todos os outros resultados (não destacados) diferem significativamente entre si, de acordo com a análise pelo método de Duncan, exposto no Anexo B.

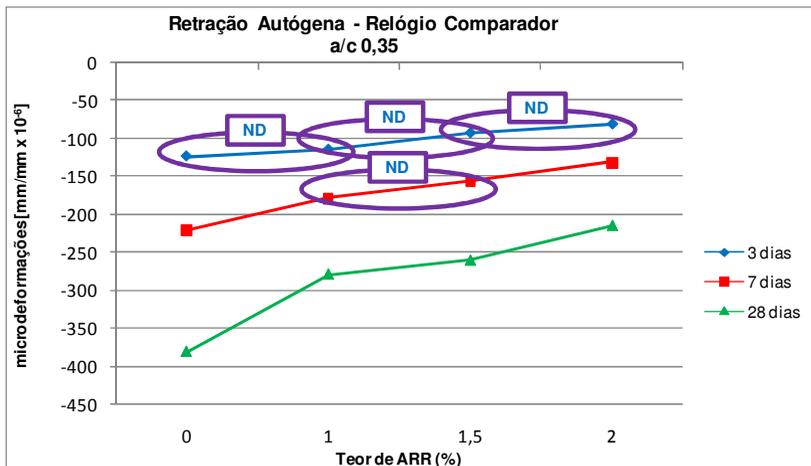


Figura 37 - Variação da retração autógena – relação a/c 0,35, em função do teor de aditivo, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

### 5.2.1.3 Relação a/c 0,40

No grupo de relação água/cimento 0,40, as curvas da retração autógena aos 3, 7 e 28 dias medidas pelo relógio comparador estão representadas na Tabela 18 e Figura 38. Todas as amostras foram analisadas pelo teste de Duncan.

No anexo C encontram-se os gráficos de cada mistura deste grupo e a análise estatística detalhada.

Tabela 18 - Equações de correlação logarítmica para expressar a retração autógena em função da idade e respectivos coeficientes de determinação. Valores de retração autógena aos 3, 7 e 28 dias - relação a/c 0,40

Valores de retração autógena para a mistura 0,40 - REF					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 96	$y = -108\ln(x) + 2,105$	0,991	-116,55	-208,05	-357,77
Prisma 97	$y = -104\ln(x) + 2,936$	0,995	-111,32	-199,44	-343,61
Prisma 98	$y = -106\ln(x) - 8,651$	0,990	-125,10	-214,92	-361,86
Prisma 99	$y = -106\ln(x) + 1,182$	0,986	-115,27	-205,08	-352,03
Prisma 100	$y = -107\ln(x) - 11,630$	0,992	-129,18	-219,84	-368,18
Valores de retração autógena para a mistura 0,40 - 1%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 116	$y = -87,6\ln(x) + 48,56$	0,935	-47,68	-121,90	-243,34
Prisma 117	$y = -97,5\ln(x) + 61,38$	0,917	-45,73	-128,35	-263,51
Prisma 118	$y = -91,0\ln(x) + 44,54$	0,956	-55,43	-132,54	-258,69
Prisma 119	$y = -83,0\ln(x) + 26,36$	0,957	-64,82	-135,15	-250,21
Prisma 120	$y = -87,4\ln(x) + 43,07$	0,953	-52,95	-127,00	-248,16
Valores de retração autógena para a mistura 0,40 - 1,5%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 106	$y = -62,2\ln(x) + 16,57$	0,984	-51,76	-104,47	-190,69
Prisma 107	$y = -61,1\ln(x) + 17,10$	0,952	-50,03	-101,80	-186,50
Prisma 108	$y = -62,8\ln(x) + 5,686$	0,995	-63,31	-116,52	-203,58
Prisma 109	$y = -66,4\ln(x) + 24,52$	0,964	-48,43	-104,69	-196,74
Prisma 110	$y = -66,9\ln(x) + 43,77$	0,918	-29,73	-86,41	-179,15
Valores de retração autógena para a mistura 0,40 - 2%					
n°	Equação	R <sup>2</sup>	3 dias	7 dias	28 dias
Prisma 111	$y = -49,7\ln(x) + 11,79$	0,979	-42,81	-84,92	-153,82
Prisma 112	$y = -47,3\ln(x) + 21,17$	0,929	-30,79	-70,87	-136,44
Prisma 113	$y = -47,5\ln(x) + 24,27$	0,919	-27,91	-68,16	-134,01
Prisma 114	$y = -41,4\ln(x) - 0,429$	0,947	-45,91	-80,99	-138,38
Prisma 115	$y = -48,6\ln(x) + 32,01$	0,908	-21,38	-62,56	-129,94

Todos os teores de ARR em todas as idades diferem significativamente entre si, com 95% de confiabilidade, exceto aos 3 dias, em que as misturas com 1% e 1,5% apresentaram resultados muito próximos (ND significa *Não Difere Significativamente*, conforme análise pelo teste de Duncan). A Figura 39 apresenta a redução da retração autógena, em função do teor de aditivo ARR, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

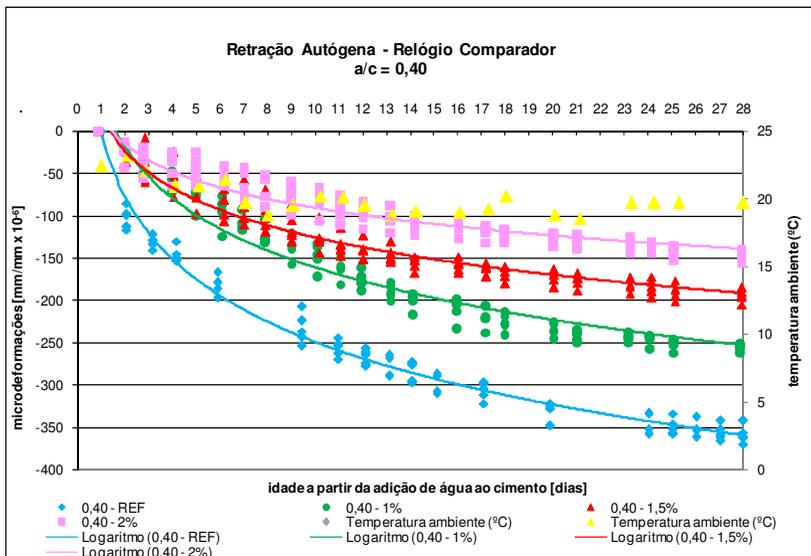


Figura 38 - Retração autógena – relação a/c 0,40 - medidas realizadas com o relógio comparado.

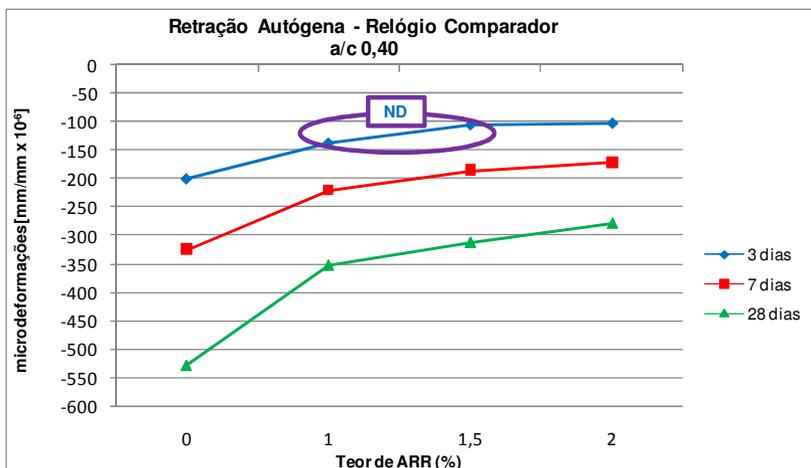


Figura 39 - Variação da retração autógena – relação a/c 0,40, em função do teor de aditivo, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Novamente, percebe-se que a maior diferença de resultados é entre a mistura de referência e as misturas com quaisquer teores de ARR. Na Tabela 19 é possível visualizar a redução do ARR em porcentagem, que foi superior à redução das outras relações a/c.

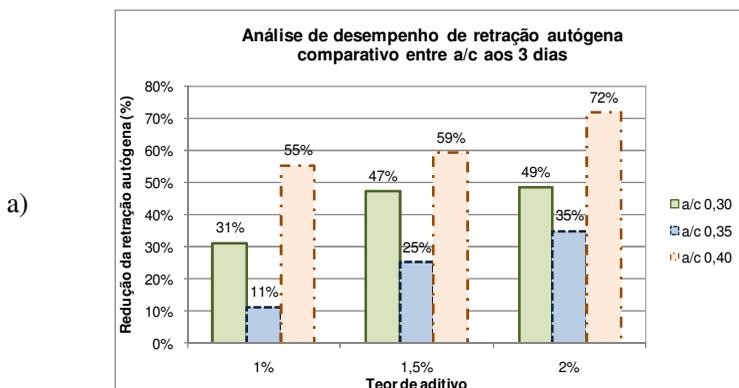
Tabela 19 - Redução da retração aos 3, 7 e 28 dias – relação a/c 0,40

Mistura	3 dias	%	7 dias	%	28 dias	%
0,40 - REF	-119,26	-	-209,08		-356,03	
0,40 - 1%	-53,33	55,3%	-128,99	38,3%	-252,79	29,0%
0,40 - 1,5%	-48,67	59,2%	-102,81	50,8%	-191,40	46,2%
0,40 - 2%	-33,76	71,7%	-73,50	64,8%	-138,52	61,1%

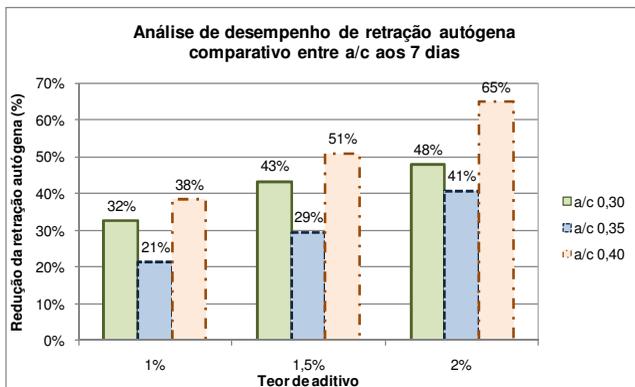
De acordo com o fabricante, em teores de até 2% sobre a massa de material cimentício, o ARR poderá reduzir a retração em até 80% aos 28 dias e 50% depois de 1 ano. Não foi obtida redução da retração nesta magnitude para nenhuma relação água/cimento estudada.

#### 5.2.1.4 Comparativos entre relações a/c

Comparando o desempenho do ARR entre as relações a/c, observa-se que a maior eficiência foi na relação a/c 0,40. Curiosamente, a relação a/c 0,35 teve a pior eficiência do aditivo, fato que não pôde ser explicado pelos ensaios realizados, devendo-se expandir os estudos para elucidar esta questão. Esta análise de desempenho está ilustrada na Figura 40, separada por idade:



b)



c)

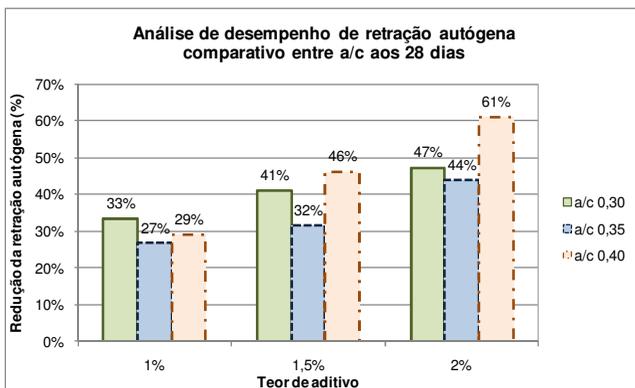


Figura 40 - Comparativo de desempenho em relação às misturas de referência (%) do ARR entre as relações a/c pelo ensaio do relógio comparador no quadro de retração. Em a) 3 dias. Em b) 7 dias Em c) 28 dias.

### 5.2.2 Resultados obtidos por transdutores de deslocamento na bancada de retração

Conforme foi mencionado, não há consenso entre os pesquisadores sobre a definição do “tempo zero”. Cusson e Hoogeveen (2007) instituem o “tempo zero” como sendo o tempo de início de pega, e este foi o tempo adotado neste trabalho.

Os ensaios de tempos de pega foram realizados e aplicados para todas as misturas para o início da medição. Logo após a moldagem dos

prismas, o equipamento iniciava as leituras, mesmo no estado fresco. Porém, para o cálculo da retração autógena, o comprimento de referência (inicial) foi adotado a partir do tempo do início de pega, cujos resultados foram expostos no item 0.

Para todas as misturas, houve expansão seguida de retração. Algumas misturas, no entanto, apresentaram uma forte retração inicial, seguida da expansão e novamente da retração. A expansão normalmente ocorre pela formação de cristais de etringita, e ocorreu até aproximadamente 30 horas de idade. Todos os ensaios que geraram algum tipo de dúvida foram repetidos.

### 5.2.2.1 Relação a/c 0,30

Na Figura 41 está ilustrada a evolução da retração para o grupo de relação água/cimento 0,30. Para todas as misturas, após forte retração inicial, foi detectada expansão entre 18 e 30 horas. Percebe-se que a mistura referência apresentou retração muito superior às outras, independente do teor de ARR adicionado.

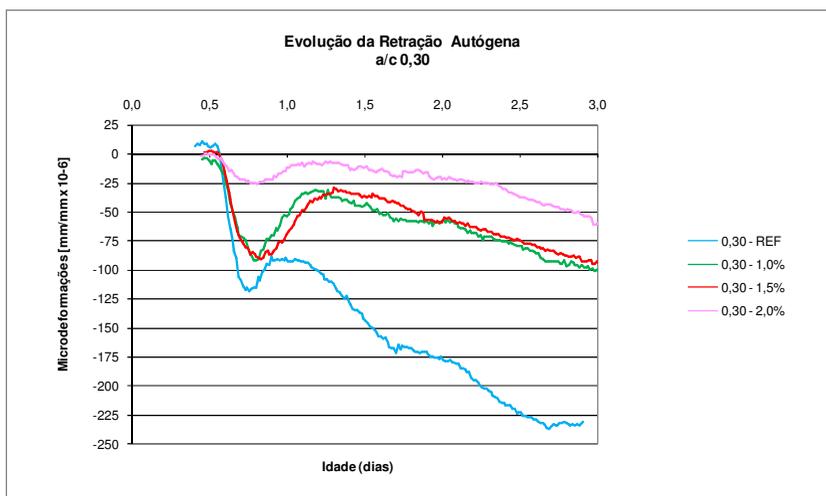


Figura 41 - Evolução da retração autógena - relação a/c 0,30. Medidas tomadas por transdutores de deslocamento.

A redução da retração causada pelo aditivo, em %, está exposta na Tabela 20, e variou entre 61,7% e 77,0% em relação à mistura referência.

Tabela 20 - Redução da retração aos 3 dias – relação a/c 0,30

Mistura	3 dias	%
0,30 - REF	-261,08	-
0,30 - 1%	-99,96	61,7%
0,30 - 1,5%	-93,12	64,3%
0,30 - 2%	-60,05	77,0%

### 5.2.2.2 Relação a/c 0,35

Para o grupo de relação água/cimento 0,35, apresentados na Figura 42, também a mistura de referência apresentou valores de retração autógena muito superiores às outras misturas, com teores de ARR. Na verdade, as misturas contendo quaisquer teores de ARR apresentaram leve expansão, ao final dos três dias de ensaio. Percebe-se que não houve para elas a forte retração inicial: muitas iniciaram na expansão, e somente após o primeiro dia de idade a retração começou a acontecer.

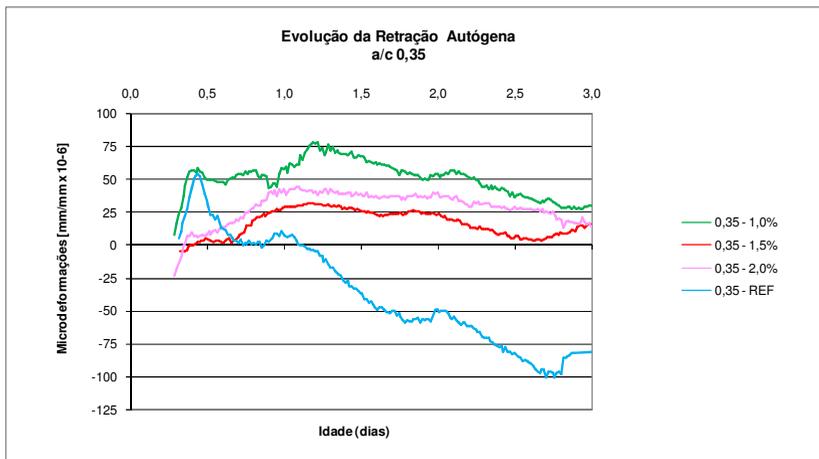


Figura 42 - Evolução da retração autógena - relação a/c 0,35. Medidas tomadas por transdutores de deslocamento.

Comparando a redução do ARR entre as quatro misturas, percebe-se na Tabela 21 que a diferença entre a mistura referência e as misturas com quaisquer teores de ARR variou entre 118,1% e 126,3%, quando tomando como valor inicial aquele definido pelo “zero”.

Tabela 21 - Redução da retração aos 3 dias – relação a/c 0,35

Mistura	3 dias	%
0,35 - REF	-81,21	-
0,35 - 1%	14,66	118,1%
0,35 - 1,5%	38,23	147,1%
0,35 - 2%	21,34	126,3%

### 5.2.2.3 Relação a/c 0,40

Os resultados para o grupo de relação água/cimento 0,40 estão expressos na Figura 43, onde se observa que os valores de retração para todas as misturas contendo algum teor de ARR foram muito semelhantes. Os valores de retração da mistura referência foi muito superior às outras misturas, o que indica a forte eficiência do ARR, conforme esperado.

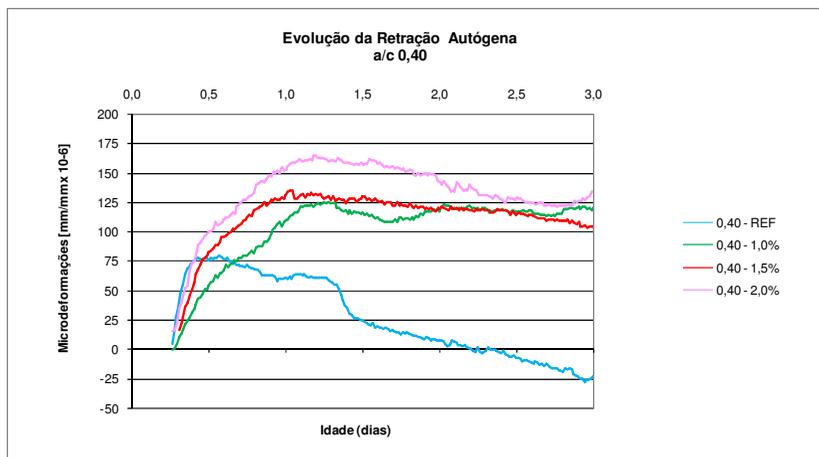


Figura 43 - Evolução da retração autóloga - relação a/c 0,40. Medidas tomadas por transdutores de deslocamento.

A redução da retração chegou a 682%, quando tomando como valor inicial aquele definido pelo “tempo zero”, exibidos na Tabela 22.

Tabela 22 - Redução da retração aos 3 dias – relação a/c 0,40

Mistura	3 dias	%
0,40 - REF	-22,99	-
0,40 - 1%	121,51	628,6%
0,40 - 1,5%	104,22	553,4%
0,40 - 2%	133,77	682,0%

#### 5.2.2.4 Comparativos entre relações a/c

A redução da retração autógena foi crescente conforme o aumento da relação água/cimento. Os valores de redução da retração para a relação água/cimento 0,40 foram muito superiores às outras. Por este motivo, todos os ensaios deste grupo foram repetidos e os valores foram confirmados, excluindo a possibilidade de haver erros de ensaio ou problemas no equipamento. Alguns ensaios chegaram a apresentar valores de expansão ao final dos 3 dias de idade. A explicação seria a formação de etringita, que causaria a expansão da argamassa e inibiria a ocorrência da retração. Todavia, a formação de etringita ocorre para todas as argamassas, independente da relação água/cimento, e o que diferenciou a relação água/cimento 0,40 das demais foi a ausência da forte retração inicial.

Para elucidar a questão, fica a sugestão de expandir os estudos para ensaios de microestrutura comparando as formações de etringita e retração entre as relações a/c estudadas.

A Figura 44 apresenta os valores de redução de retração obtidos ao final dos 3 dias de idade, onde observa-se a disparidade da eficiência no combate da retração da relação a/c 0,40.

No intuito de verificar a redução da retração sem a interferência da expansão pela formação da etringita, os valores foram recalculados considerando os resultados apenas a partir de 1 dia de idade, e tomando-se o comprimento de referência (inicial) a partir desta idade. Neste caso, as reduções de retração estão expressas na Figura 45, onde se visualiza que a relação a/c 0,40 apresentou os melhores resultados na eficiência do combate à retração para todos os teores de ARR, seguida da relação a/c 0,35, exceto com o teor de 2%, no qual a relação a/c 0,30 obteve melhores resultados.

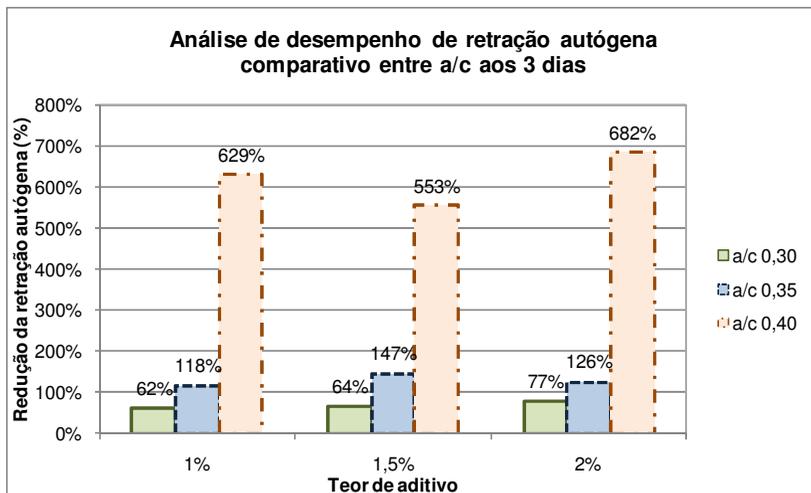


Figura 44 - Comparativo de desempenho (%) do ARR entre as relações a/c pelo ensaio do transdutor de deslocamento na bancada de retração.

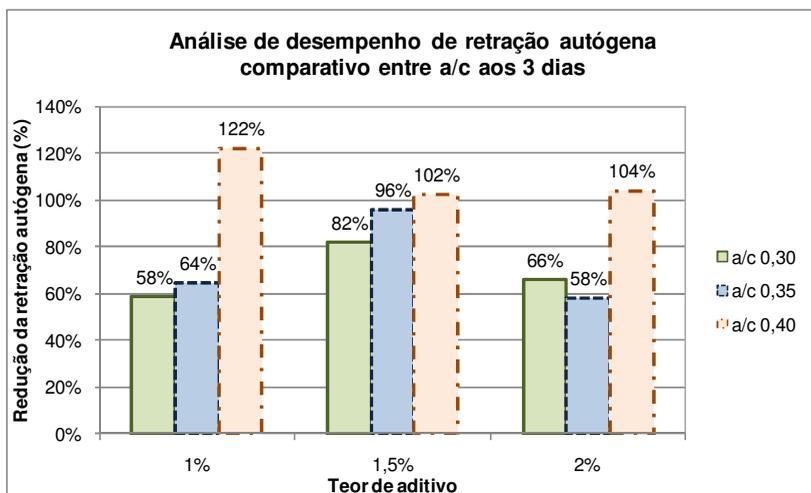


Figura 45 - Comparativo de desempenho (%) do ARR entre as relações a/c pelo ensaio do transdutor de deslocamento na bancada de retração - Medidas tomando-se como o comprimento de referência (inicial) a idade de 1 dia.

## **5.3 Propriedades no estado endurecido**

### **5.3.1 Resistência à compressão**

Os dados individuais de resistência à compressão do concreto estão apresentados no ANEXO E. Os resultados apresentados mostram a média das resistências, obtidas a partir de 3 corpos de prova para as idades de 3 e 7 dias, e 4 corpos de prova para os 28 dias. As misturas com teores de ARR apresentaram queda de resistência, diretamente proporcionais ao teor utilizado, ou seja, quanto maior o teor, maior a queda de resistência, comprovando os estudos de Folliard e Berke (1997), que atribuem esta perda aos efeitos do ARR na hidratação do cimento.

Em pesquisa realizada por Melo Neto et al (2007), os resultados de resistência à compressão mostraram que o efeito do aditivo foi mais intenso nas primeiras idades, sendo a resistência à compressão reduzida em até 54,5% com 1 dia de idade, sendo amenizada com o passar do tempo e chegando a 11,6% aos 28 dias. No presente estudo as perdas de resistência foram também mais intensas nas primeiras idades, mas não nesta magnitude.

#### **5.3.3.1 Relação a/c 0,30**

Os resultados para o grupo de relação água/cimento 0,30 estão representados na Figura 46 e as quedas de resistências na Tabela 23. Nas primeiras idades, as quedas de resistência foram mais acentuadas, e foram diminuindo gradativamente com o passar dos dias. De acordo com o fabricante, a redução da resistência à compressão aos 28 dias varia entre 1% e 15% dependendo das características dos concretos. Neste caso, a queda da resistência aos 28 dias foi mais acentuada quanto maior o teor de ARR utilizado, chegando a 12,4% para o teor de 2%.

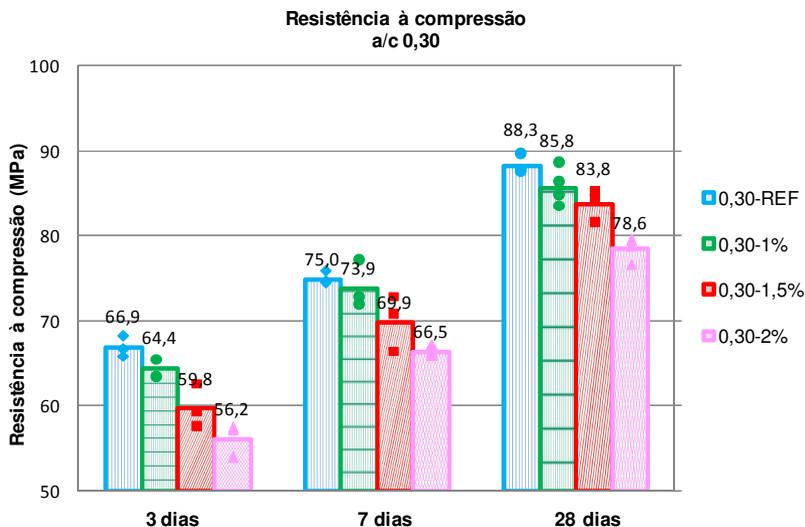


Figura 46 - Resistência à compressão – relação a/c 0,30.

Tabela 23 - Queda resistência à compressão em relação à mistura de referência – relação a/c 0,30

Mistura	3 dias	queda de resistência (%)	7 dias	queda de resistência (%)	28 dias	queda de resistência (%)
0,30 - REF	66,9	-	75,0	-	88,3	-
0,30 - 1%	64,4	-3,8%	73,9	-1,4%	85,8	-3,0%
0,30 - 1,5%	59,8	-11,9%	69,9	-7,2%	83,8	-5,5%
0,30 - 2%	56,2	-19,1%	66,5	-12,7%	78,6	-12,4%

### 5.3.1.2 Relação a/c 0,35

A Figura 47 apresenta os resultados para o grupo de relação água/cimento 0,35 e a Tabela 24 apresenta as perdas de resistências. As perdas foram mais acentuadas nas primeiras idades, e chegou a 18% para o maior teor de ARR. Também foram proporcionais à quantidade de ARR utilizado.

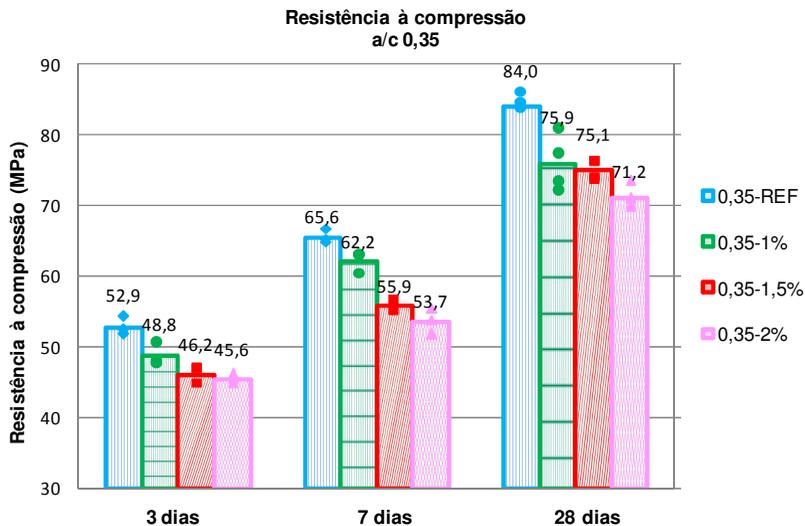


Figura 47 - Resistência à compressão – relação a/c 0,35.

Tabela 24 - Queda resistência à compressão em relação à mistura de referência – relação a/c 0,35

Mistura	3 dias	queda de resistência (%)	7 dias	queda de resistência (%)	28 dias	queda de resistência (%)
0,35 - REF	52,9	-	65,6	-	84,0	-
0,35 - 1%	48,8	-8,5%	62,2	-5,5%	75,9	-10,7%
0,35 - 1,5%	46,2	-14,5%	55,9	-17,5%	75,1	-11,9%
0,35 - 2%	45,6	-16,1%	53,7	-22,1%	71,2	-18,0%

### 5.3.1.3 Relação a/c 0,40

A Figura 48 e a Tabela 25 mostram os resultados para o grupo de relação a/c 0,40. As perdas foram diretamente proporcionais com o aumento do teor de ARR, chegando a 18,6 aos 28 dias. Não houve perda acentuada nas primeiras idades.

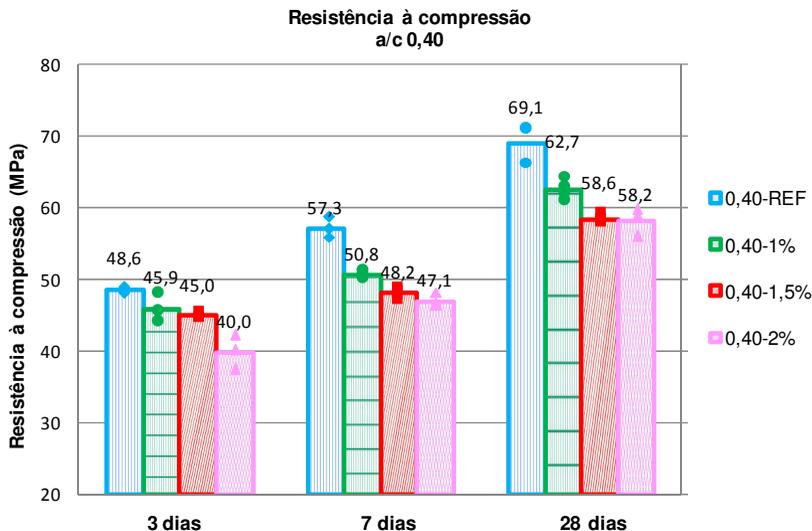


Figura 48 - Resistência à compressão – relação a/c 0,40.

Tabela 25 - Queda resistência à compressão em relação à mistura de referência – relação a/c 0,40

Mistura	3 dias	queda de resistência (%)	7 dias	queda de resistência (%)	28 dias	queda de resistência (%)
0,40 - REF	48,6	-	57,3	-	69,1	-
0,40 - 1%	45,9	-5,8%	50,8	-12,8%	62,7	-10,3%
0,40 - 1,5%	45,0	-7,9%	48,2	-18,7%	58,6	-18,0%
0,40 - 2%	40,0	-21,5%	47,1	-21,6%	58,2	-18,6%

### 5.3.2 Módulo de elasticidade

Os ensaios realizados aos 28 dias confirmaram o fato de que o uso do ARR leva à diminuição do valor do módulo de elasticidade. Foram ensaiados 4 corpos de prova por mistura aos 28 dias de idade, e o valor considerado foi a média dos resultados, com 95% de confiabilidade, sendo desconsiderados os valores espúrios e as médias analisadas estatisticamente pelo método de Duncan.

### 5.3.2.1 Relação a/c 0,30

Os resultados do ensaio do módulo de elasticidade do grupo de relação água/cimento 0,30 estão ilustrados na Figura 49. Quanto maior o teor de ARR utilizado, maior a queda do módulo se comparado à mistura referência, conforme representado na Tabela 26. A redução significativa do módulo não ocorreu para a mistura 0,30-1%, ocorreu apenas a partir de 1,5% de teor de ARR, e chegou a 12,05% para o maior teor de ARR utilizado.

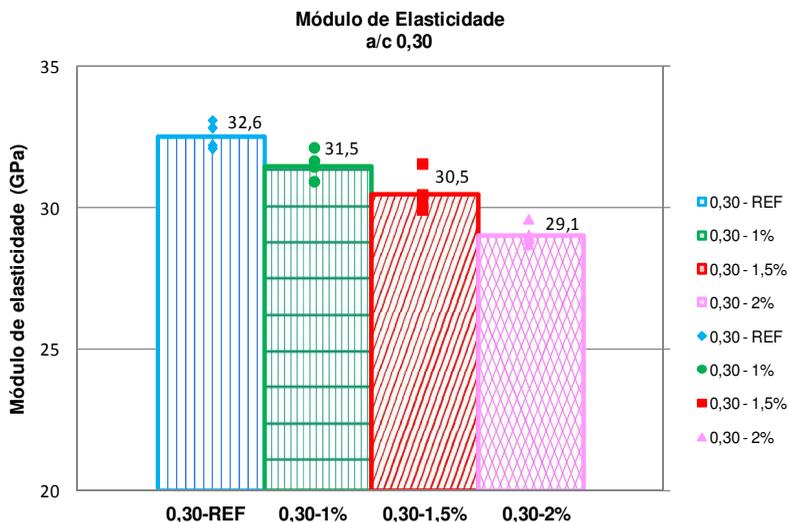


Figura 49 - Módulo de Elasticidade – relação a/c 0,30.

Tabela 26 - Queda do módulo de elasticidade em relação à mistura de referência – relação a/c 0,30

Resultados do ensaio de módulo de elasticidade das argamassas

Mistura	28 dias					Média Módulo de Elasticidade (GPa)	Variação em relação à mistura referência	Desvio padrão
	Módulo de Elasticidade (GPa)							
0,30 – REF	32,2	32,1	33,1	32,8		32,6	-	0,5
0,30 – 1%	32,1	30,9	33,4	31,6		31,5	-3,33%	0,5
0,30 – 1,5%	30,5	29,9	31,5	30,1		30,5	-6,72%	0,7
0,30 – 2%	29,6	28,7	28,9	29,0		29,1	-12,05%	0,4

\* valores negativos indicam queda do módulo de elasticidade, em relação à mistura referência.

### 5.3.2.2 Relação a/c 0,35

Para o grupo de relação água/cimento 0,35, houve queda significativa do módulo de elasticidade já no menor teor de ARR ensaiado (1%), e chegou a 14,22% para a mistura com o maior teor. Os resultados estão ilustrados na Figura 50 e expressos na Tabela 27. Entre os valores das misturas com adição de ARR, não houve diferença significativa, de acordo com o teste de Duncan.

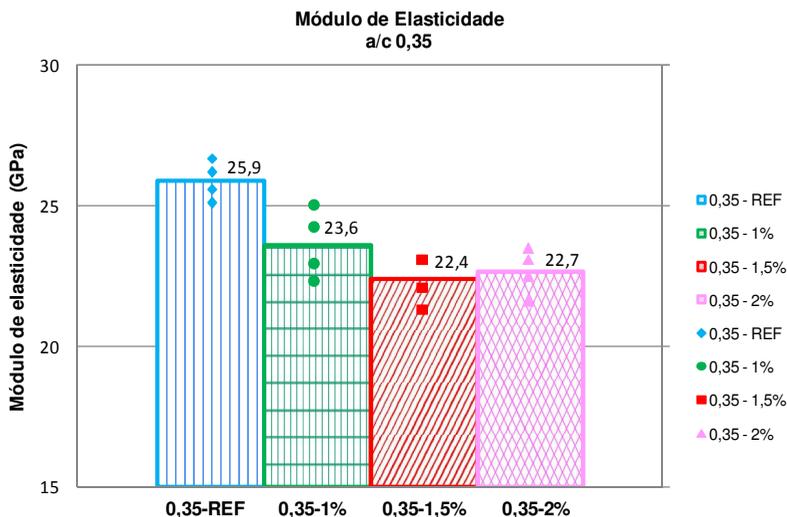


Figura 50 - Módulo de Elasticidade – relação a/c 0,35.

Tabela 27 - Queda do módulo de elasticidade em relação à mistura de referência – relação a/c 0,35

Resultados do ensaio de módulo de elasticidade das argamassas

Mistura	28 dias				Média Módulo de Elasticidade (GPa)	Variação em relação à mistura referência	Desvio padrão
	Módulo de Elasticidade (GPa)						
0,35 – REF	26,2	25,6	26,7	25,1	25,9	-	0,7
0,35 – 1%	22,2	24,2	22,9	25,0	23,6	-9,75%	1,2
0,35 – 1,5%	23,1	21,3	23,1	22,1	22,4	-15,61%	0,9
0,35 – 2%	21,6	23,5	23,1	22,5	22,7	-14,22%	0,8

\* valores negativos indicam queda do módulo de elasticidade, em relação à mistura referência.

### 5.3.2.3 Relação a/c 0,40

Analogamente ao grupo de relação água/cimento 0,35, a redução do módulo de elasticidade para o grupo de relação água/cimento 0,40 foi proporcional ao teor de ARR adicionado e atingiu 14,9% para a mistura 0,40-2%. A Figura 51 exibe os valores e a Tabela 28 suas variações em relação à mistura referência.

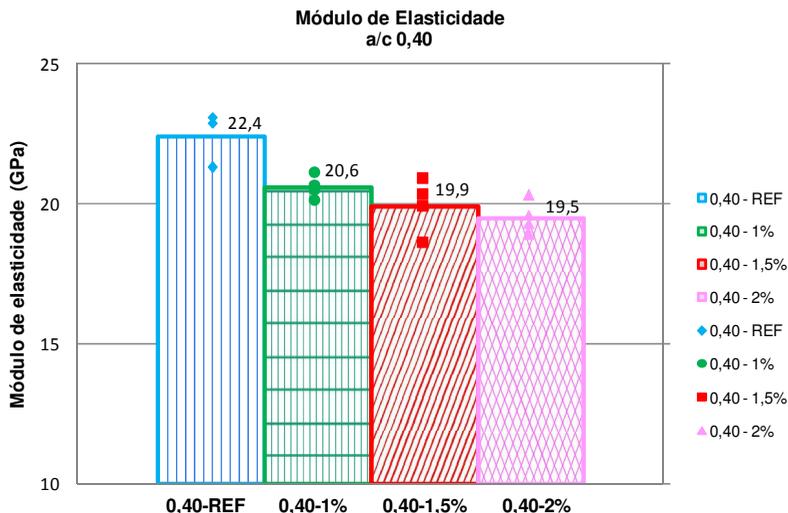


Figura 51 - Módulo de Elasticidade – relação a/c 0,40.

Tabela 28 - Queda do módulo de elasticidade em relação à mistura de referência – relação a/c 0,40

Resultados do ensaio de módulo de elasticidade das argamassas

Mistura	28 dias						
	Módulo de Elasticidade (GPa)				Média Módulo de Elasticidade (GPa)	Varição em relação à mistura referência	Desvio padrão
0,40 – REF	21,3	23,1	22,9	espúrio	22,4	-	1,0
0,40 – 1%	20,7	21,1	20,5	20,1	20,6	-8,90%	0,4
0,40 – 1,5%	20,3	20,9	19,9	18,6	19,9	-12,59%	1,0
0,40 – 2%	20,3	19,6	18,9	19,3	19,5	-14,90%	0,6

\* valores negativos indicam queda do módulo de elasticidade, em relação à mistura referência.

### 5.3.3 Comentários

O uso do aditivo redutor de retração apresentou diminuição dos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, confirmando os estudos realizados por diversos autores estudados.

Quanto maior o teor de ARR utilizado, maior a perda de resistência.

A Tabela 29 mostra os valores de queda de resistência x eficiência no combate à retração, em %, para todas as relações a/c, comparadas às misturas referências, dentro de cada grupo de relação a/c. Os valores de retração são referentes aos ensaios realizados pelo relógio comparador aos 28 dias de idade. Os valores de resistência são referentes aos ensaios realizados aos 28 dias de idade.

Tabela 29 - Redução de resistência e módulo de elasticidade x Redução da retração

Mistura		Redução de resistência (%)	Redução do módulo de elasticidade (%)	Redução da retração (%)
0,30	REF	-	-	-
	1%	3,0	3,3	33,3
	1,5%	5,5	6,7	40,9
	2%	12,4	12,0	47,3
0,35	REF	-	-	-
	1%	10,7	9,8	26,7
	1,5%	11,9%	15,6	31,5
	2%	18,0	14,2	43,7
0,40	REF	-	-	-
	1%	10,3	8,9	29,0
	1,5%	18,0	12,6	46,2
	2%	18,6	14,9	61,1

## **6 – CONCLUSÕES**

### **6.1 Propriedades no estado fresco**

As misturas estudadas apresentaram bom aspecto em relação à coesão, não tiveram indícios de segregação ou exsudação. Porém, o controle dos parâmetros reológicos é importante na produção e qualidade das argamassas, pois no estado fresco a argamassa é um material fluido e seu comportamento reológico influencia o seu processamento. Nos últimos anos, os reômetros passaram a ser mais utilizados na caracterização dos materiais cimentícios com a vantagem de se realizar medições da viscosidade e tensão de escoamento simultaneamente para uma ampla faixa de deformação. Na ausência deste equipamento para a realização deste ensaio, adaptou-se do que se utiliza em ensaios práticos para concretos, os diâmetros de espalhamento através de mesa de abatimento e o tempo de escoamento através do funil “V”.

Quanto ao tempo de aplicação das argamassas, recomenda-se no máximo 1 hora para as misturas de relação água/cimento 0,35 e 0,40, e no máximo 30 minutos para as misturas de relação água/cimento 0,30. Após estes períodos, as misturas perderiam suas características iniciais (comportamento de argamassas auto-adensáveis) e exigiriam adensamento.

### **6.2 Acompanhamento da retração linear**

#### **6.2.1 Relógio comparador**

O método proposto para determinação da retração autógena mostrou-se eficiente, permitindo a realização de leituras a partir de 1 dia de idade e, principalmente, sem perda significativa de massa do corpo de prova.

Na prática, sabe-se que os aditivos redutores não eliminam, mas reduzem a retração final na ordem de 25% a 50%, apesar do fabricante apresentar números da ordem de 80%.

A eficiência do aditivo redutor de retração foi comprovada em todas as relações de água/cimento. No entanto, a redução da retração

autógena não foi proporcional à relação água/cimento, e o pior desempenho do ARR foi para a relação a/c 0,35.

O teor de aditivo utilizado seguiu uma tendência lógica, pois quanto maior a dosagem, maior o combate à retração.

Percebe-se que a maior diferença estaria entre as misturas de referência e as misturas contendo quaisquer teores de aditivo, o que levaria a utilizar sempre 1% de ARR. Porém, dependendo da aplicação da argamassa, valeria a pena aumentar esta dosagem.

## **6.2.2 Transdutores de deslocamento**

Os ensaios de retração autógena realizados pelos transdutores de deslocamento mostraram, além da retração, a expansão causada provavelmente pela formação dos cristais de etringita. Esta expansão não seguiu nenhuma tendência, e foi mais pronunciada nos ensaios com as argamassas de relação a/c 0,40.

Não foi questionada a eficiência do aditivo em nenhum dos casos, pois a retração foi reduzida para todas as misturas, e foi proporcional aos teores utilizados. A maior diferença foi entre as misturas de referência e as misturas contendo teor de aditivo e por este motivo o teor de 1% seria a princípio mais adequado.

## **6.3 Propriedades no estado endurecido**

### **6.3.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade**

A eficiência do aditivo redutor de retração no combate à retração foi conformada em todos os teores utilizados, de forma significativa. Contudo, seu efeito benéfico tem seu preço: a redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade.

Sendo assim, há limitação para a utilização do ARR, uma vez que a variação na dosagem, estudada nesta pesquisa, implicou em prejuízo às propriedades da argamassa no estado endurecido, principalmente em relação à resistência à compressão e módulo de elasticidade.

O teor de 2% de ARR apresentou o melhor desempenho em relação ao combate à retração, porém ao se utilizar o teor máximo recomendado pelo fabricante, tem-se uma perda de resistência de 12,4 a 18,6%, a maior perda quando comparada aos outros teores de aditivo empregados.

O teor de 1% apresentou, nesta pesquisa, ótimo desempenho do aditivo redutor de retração, em torno de 29,7%, e a queda de resistência chegou a apenas 10,7%.

O efeito benéfico na redução da retração foi muito mais evidente entre as argamassas de referência e as argamassas com o teor de 1%. Além disso, quanto maior a dosagem do aditivo, maior a perda de resistência e módulo de elasticidade, o que implicaria em prejuízos às suas propriedades e durabilidade. Dentre os teores pesquisados neste trabalho, seria recomendada a utilização do teor de 1%, pois apresentou queda significativa na retração autógena quando comparada às misturas de referência, e queda moderada de resistência à compressão e módulo de elasticidade, quando comparados aos outros teores utilizados, de 1,5% e 2%.

Todavia, recomenda-se a pesquisa com teores de ARR inferiores a 1%, para analisar se a queda dos valores de retração, de resistência à compressão e módulo de elasticidade poderiam justificar seu uso.

#### **6.4 Sugestões para trabalhos futuros**

- Avaliação nas argamassas auto-adensáveis da retração autógena, resistência à compressão e módulo de elasticidade com a utilização do ARR em teores inferiores a 1%;
- Avaliação da influência do uso de ARR e nas propriedades reológicas das argamassas;
- Avaliação da mecânica de fissuração das argamassas submetidas à adição de ARR;
- Avaliação do desempenho do ARR na retração por secagem das argamassas;
- Avaliação microscópica das amostras submetidas à adição de ARR de modo a identificar as alterações na microestrutura da pasta de cimento hidratado;
- Aplicação conjunta de aditivos redutores e compensadores de retração, como meio de mitigar a retração.
- Aplicação conjunta de aditivos redutores e estabilizadores de hidratação para prolongar o tempo de aplicação das argamassas auto-adensáveis.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733 - **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 5p

\_\_\_\_\_. NBR 5738 - **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6p

\_\_\_\_\_. NBR 13276 - **Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência Padrão**. Rio de Janeiro: ABNT, (1995). 3p

\_\_\_\_\_. NBR 8522 - **Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 7680 - **Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 12p

\_\_\_\_\_. NBR NM 9 - **Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração**. Rio de Janeiro: ABNT (2003) 6p

\_\_\_\_\_. Committee 224. ACI 224.1R-93: **Causes, evaluation and repair of cracks in concrete structures**. Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute. Detroit, MI, 1998.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 1ª ed. 667p, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 157: Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete**. USA (2003), 5p.

BANFILL, P.F.G. **Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials.** Construction and Building Materials, 1994, 8, 43-50.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. **Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete.** Cement and Concrete Research, v. 36, nº 7, July 2006, pp. 1263-1267.

BASTOS, P.K.X. **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimentos.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

BENTUR, A.; IGARASHI, S.; KOVLER, K. **Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates.** Cement and Concrete Research, v. 31, nº 11, November 2001, pp. 1587-1591.

BENTZ, D.P.; GEIKER, M.R.; HANSEN, K.K. **Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars.** Cement and Concrete Research, v. 31, nº 7, April 2001, pp. 1075-1085.

BROOKS, J.J.; MEGAT JOHARI, M.A.; MAZLOOM, M. **Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete.** Cement and Concrete Composites, v.22, nº 4, 2000, pp. 293-301.

CUSSON, D.; HOOGEVEEN, T. **An experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high-performance concrete structures under restrained shrinkage.** Cement and Concrete Research, v. 37, nº 2, February 2007, pp. 200-209.

COLLERPARDI, M.; BORSOI, A.; COLLEPARDI, S.; OLAGOT, J.J.O.; TROLI, R. **Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating under non-wet curing conditions.** Cement and Concrete Composites, v. 27, nº 6, July 2005, pp. 704-708.

CUSSON, D.; HOOGEVEEN, T. **An experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high-performance concrete structures under restrained shrinkage.** Cement and Concrete Research, v. 37, nº 2, February 2007, pp. 200-209.

FERRARIS, C. F.; WITTMANN, F. H. **Shrinkage mechanisms of hardened cement paste**. Cement and Concrete Research, Volume 17, Issue 3, May 1987, Pages 453-464.

FOLLIARD, K. J.; BERKE N. S. **Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture**. Cement and Concrete Research, v. 27, nº 9, September 1997, pp. 1357-1364.

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.

HOLSCHEMACHER, K. **Hardened materials properties of self-compacting concrete**. Journal of Civil Engineering and Management. v. X, nº 4, 2004, p.261-266.

HUA, C.; EHRLACHER, A.; ACKER, P. **Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste I: Modelling at macroscopic scale**. Cement and Concrete Research, v. 25, nº 7. October 1995, pp 1457-1468.

JENSEN, O. M. **Monitoring water loss from fresh concrete**. In: RILEM Proceedings PRO 46: Concrete durability and service life planning (ConcreteLife '06). Ed. Kovler, K., RILEM Publications S.A.R.L., Bagnaux, France (2006), pp. 197-202.

JENSEN, O.M; HANSEN, P.F. **Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 29, nº 4, April 1999, pp.567-575.

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

KUMM, T. C. **Influência do emprego de polímeros subabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Orientador: Wellington Longuini Repette, 2009, 105 p.

LEE, K.M; LEE, H.K; LEE, S.H; KIM, G.Y. **Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag.** Cement and Concrete Research, v. 36, nº 7, July 2006, pp. 1279-1285.

LURA, P.; JENSEN, O.M.; BREUGEL, K.V. **Autogenous shrinkage in high performance cement paste: An evaluation on basics mechanisms.** Cement and Concrete Research, v. 33, nº 2, February 2003, pp. 223-232.

Concrete admixtures handbook”. Noyes Publications, USA, 1984, pp. 480-497.

MALTESE, C.; PISTOLESI, C.; LOLLI, A.; BRAVO, A.; CERULLI; T. SALVIONI, D. **Combined effect of expansive and shrinkagen reducing admixtures to obtain stable and durable mortars.** Cement and Concrete Research, v. 35, nº 12, November 2005, pp. 2244-2251.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1.ed. São Paulo: PINI, 1994, pg.573.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada.** São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 215p.

NAWA, T.; HORITA, T. **Autogenous shrinkage of high-performance concrete.** In: Otto Graf Journal. “Annual Journal on Research and Testing of Materials”, v. 16, 2005, University of Stuttgart, pp.193-202.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: PINI, 1997, 2ª ed. 828p.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-Compacting Concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 1, p. 5-15, Apr, 2003.

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

REPETTE, W. L. **Cimentos Especiais de Base Mineral.** In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Concreto – Materiais de Construção Civil e

Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007, v. 1, p. 795-832.

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

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. **Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete**. Cement and Concrete Research, v. 25, n° 8, December 1995a, pp. 1633-1638.

\_\_\_\_\_. **Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 25, n° 2, February 1995b, pp. 281-287.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S; KASAI, T. **Chemical Shrinkage and Autogenous Shrinkage of hydrating cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 25, n° 2, February 1995, pp. 288-292.

TERMKHAJORNKITA, P.; NAWAA, T.; NAKAIB, M.; SAITOC, T. **Effect of fly ash on autogenous shrinkage**. Cement and Concrete Research, v. 35, n° 3, March 2005, pp. 473-482.

TURCRY, P; LOUKILI, A. **Evaluation of Plastic Shrinkage Cracking of Self-Consolidating Concrete**, ACI Materials Journal, Jul-Aug, 2006. pp. 272-279.

TVIKSTA, L. **SCC: Guideline, Task 9 end Product**. Brite EuRam Construct No BRPR-CT96-0366, 2000-07-13, pp 48.

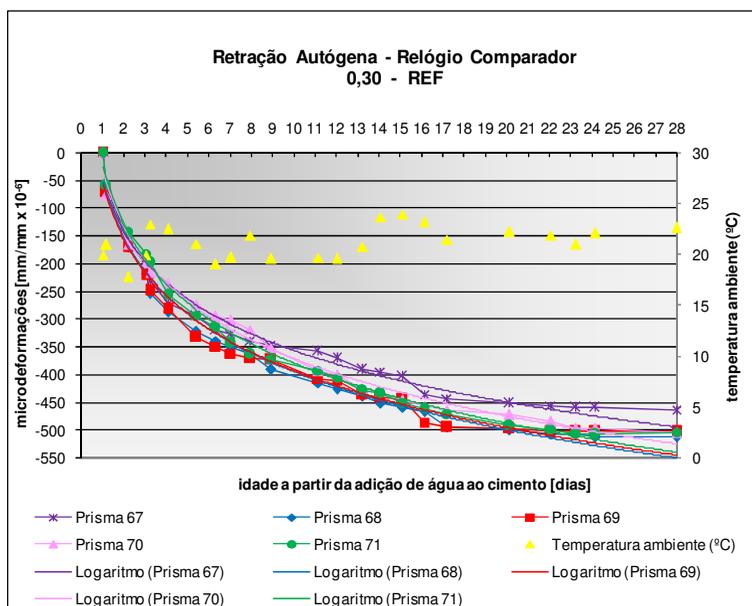
ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; LEOW M. P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. Cement and Concrete Research, v. 33, n° 10, October 2003, pp. 1687-1694.

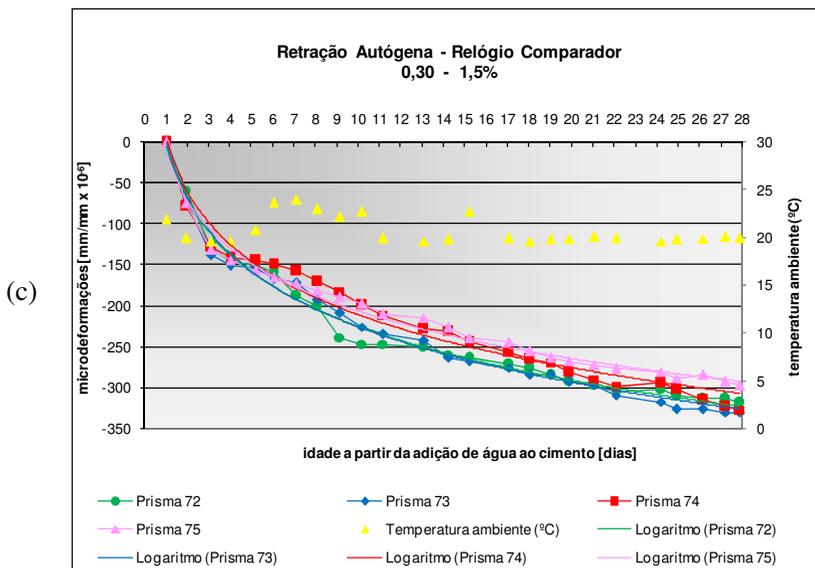
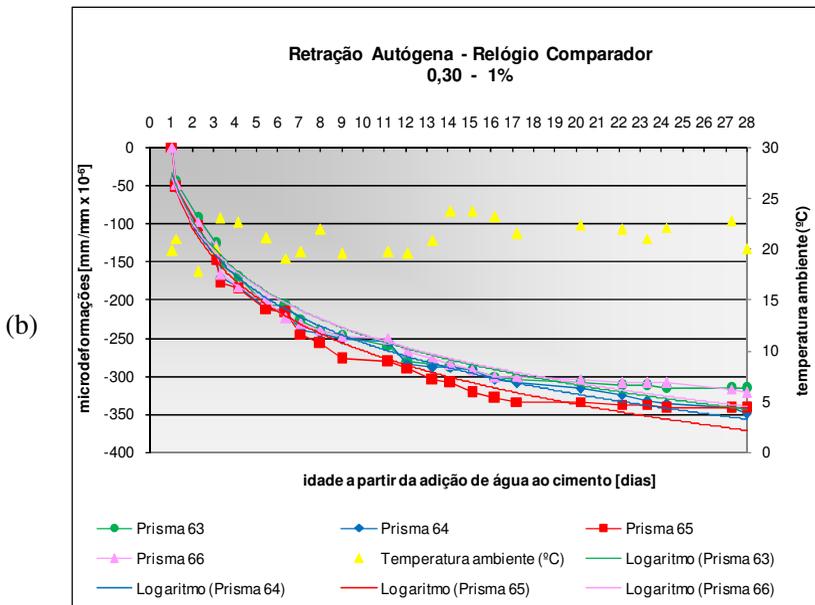


## ANEXO A

Na Figura 52 são visualizados os resultados da retração autógena para a relação água/cimento 0,30. Foram medidos de 4 a 5 prismas em cada uma das misturas.

(a)





(d)

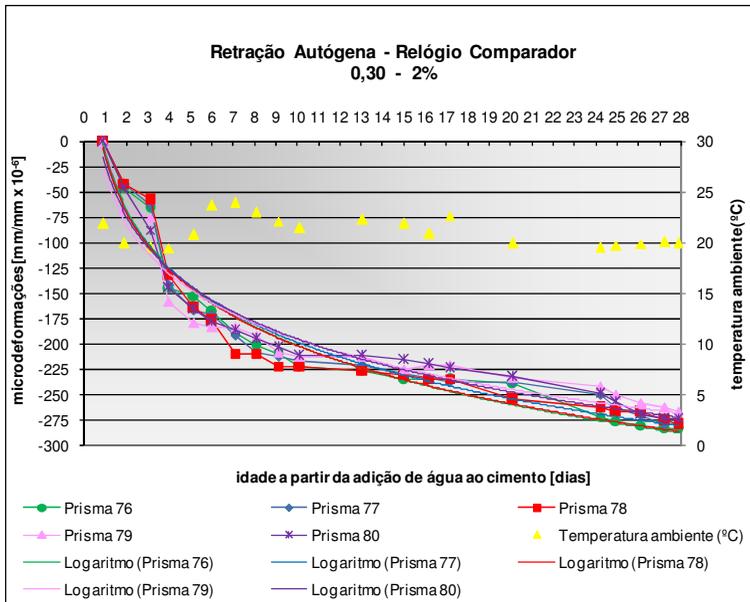


Figura 52 - Retração autóloga – relação a/c 0,30. Em (a) 0,30-REF. (b) 0,30-1% (c) 0,30-1,5% (d) 0,30-2%.

Para cada prisma, foi adicionada uma linha de tendência com função logarítmica para a determinação da retração autóloga nas idades de 3, 7 e 28 dias. O tratamento estatístico dos resultados, ilustrados abaixo (Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32), foi realizado com ajuda do programa Microsoft Office Excel 2007.

Tabela 30 - Relação a/c 0,30 - Retração média medida com relógio comparador aos 3 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	3 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-193,7	-131,8	-110,1	-99,8
2	-212,1	-139,1	-108,3	-100,8
3	-212,7	-144,4	-98,8	-101,6
4	-190,2	-135,4	-105,6	-108,7
5	-191,1			-103,3
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-200,0</b>	<b>-137,7</b>	<b>-105,7</b>	<b>-102,8</b>
<b>DESvio</b>	<b>11,4</b>	<b>5,4</b>	<b>5,0</b>	<b>3,5</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>				<b>-138,20</b>

1- **desvio padrão combinado = raiz de  $MQR = \frac{\sum(n-1) \cdot desvio^2}{\sum n-k}$**   

$$MQR = \frac{521,73}{14} + \frac{87,19}{14} + \frac{73,79}{14} + \frac{49,21}{14} = 52,28$$

desvio padrão combinado = 7,23

2- **desvio padrão das médias = desvio padrão combinado / raiz (nh)**  

$$nh = \frac{7,23}{4} = 4,44$$
  
 desvio padrão das médias = 3,43

3- **grau de liberdade**

n-k	rk2	rk3	rk4
14	3,03	3,70	4,11
Rk	10,39	12,69	14,10

#### 4- Comparativos

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,30-2%	-102,8	2,9	10,39	NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND
2	0,30-1,5%	-105,7			
2	0,30-1,5%	-105,7	32,0	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,30-1%	-137,7			
3	0,30-1%	-137,7	62,3	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,30-REF	-200,0			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,30-2%	-102,8			
3	0,30-1%	-137,7	34,8	12,69	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,30-1,5%	-105,7			
4	0,30-REF	-200,0	94,2	12,69	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,30-2%	-102,83			
4	0,30-REF	-199,96	97,1	14,10	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS

#### ANÁLISE GERAL - 3 dias

	0,30-REF	0,30-1%	0,30-1,5%	0,30-2%
0,30-REF	X			
0,30-1%	DS	X		
0,30-1,5%	DS	DS	X	
0,30-2%	DS	DS	ND	X

Tabela 31 - Relação a/c 0,30 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	7 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-306,4	-212,1	-190,8	-170,9
2	-339,1	-221,2	-191,1	-169,0
3	-337,3	-230,0	-178,0	-171,4
4	-316,5	-213,0	-176,2	-168,8
5	-323,3			-167,6
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-324,5</b>	<b>-219,1</b>	<b>-184,1</b>	<b>-169,5</b>
<b>DESVIO</b>	<b>13,9</b>	<b>8,3</b>	<b>8,0</b>	<b>1,6</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-226,83</b>			

$$1- \text{desvio padrão combinado} = \text{raiz de MQR} = \frac{\Sigma(n-1) \cdot \text{desvio}^2}{\Sigma n-k}$$

$$\text{MQR} = \frac{772,73}{14} + \frac{208,96}{14} + \frac{193,85}{14} + \frac{9,91}{14} = 84,67$$

$$\text{desvio padrão combinado} = \sqrt{84,67} = 9,20$$

$$2- \text{desvio padrão das médias} = \frac{\text{desvio padrão combinado}}{\text{raiz}(nh)}$$

$$nh = \frac{9,20}{\sqrt{4}} = 4,60$$

$$\text{desvio padrão das médias} = \frac{9,20}{4} = 2,30$$

#### 3- grau de liberdade

n-k	rk2	rk3	rk4
14	3,03	3,70	4,11
Rk	10,39	12,69	14,10

#### 4- Comparativos

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,30-2%	-169,5	14,5	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,30-1,5%	-184,1			
2	0,30-1,5%	-184,1	35,0	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,30-1%	-219,1			
3	0,30-1%	-219,1	105,4	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,30-REF	-324,5			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,30-2%	-169,5	49,5	12,69	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,30-1%	-219,1			
2	0,30-1,5%	-184,1	140,5	12,69	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,30-REF	-324,5			

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,30-2%	-169,55	155,0	14,10	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,30-REF	-324,52			

#### ANÁLISE GERAL - 7 dias

	0,30-REF	0,30-1%	0,30-1,5%	0,30-2%
0,30-REF	X			
0,30-1%	DS	X		
0,30-1,5%	DS	DS	X	
0,30-2%	DS	DS	DS	X

Tabela 32 - Relação a/c 0,30 - Retração média medida com relógio comparador aos 28 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	28 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-490,8	-343,5	-323,0	-287,2
2	-547,1	-355,6	-326,6	-280,6
3	-541,1	-370,0	-307,7	-285,6
4	-523,0	-340,0	-291,7	-267,3
5	-539,6			-272,8
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-528,3</b>	<b>-352,3</b>	<b>-312,2</b>	<b>-278,7</b>
<b>DESVIO</b>	<b>22,8</b>	<b>13,6</b>	<b>16,0</b>	<b>8,5</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-371,83</b>			

1- desvio padrão combinado = raiz de  $MQR = \frac{\sum(n-1) \cdot \text{desvio}^2}{\sum n-k}$

$$MQR = \frac{2081,36}{5} + \frac{552,44}{4} + \frac{763,43}{4} + \frac{289,60}{5} = 263,34$$

$$\text{desvio padrão combinado} = \sqrt{14} = 16,23$$

2- desvio padrão das médias = desvio padrão combinado / raiz (nh)

$$nh = \frac{16,23}{\sqrt{4}} = 4,44$$

$$\text{desvio padrão das médias} = \frac{0,2000}{4} + \frac{0,2500}{4} + \frac{0,2500}{4} + \frac{0,2000}{4} = 7,70$$

3- grau de liberdade

n-k	rk2	rk3	rk4
14	3,03	3,70	4,11
Rk	10,39	12,69	14,10

#### 4- Comparativos

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,30-2%	-278,7	33,5	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,30-1,5%	-312,2			
2	0,30-1,5%	-312,2	40,1	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,30-1%	-352,3			
3	0,30-1%	-352,3	176,0	10,39	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,30-REF	-528,3			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,30-2%	-278,7	73,6	12,69	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,30-1%	-352,3			
2	0,30-1,5%	-312,2	216,1	12,69	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,30-REF	-528,3			

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,30-2%	-278,70	249,6	14,10	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,30-REF	-528,30			

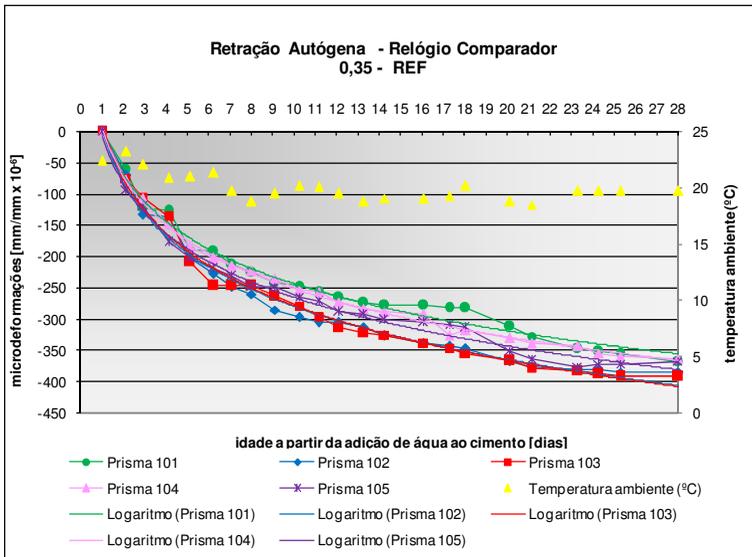
#### ANÁLISE GERAL - 28 dias

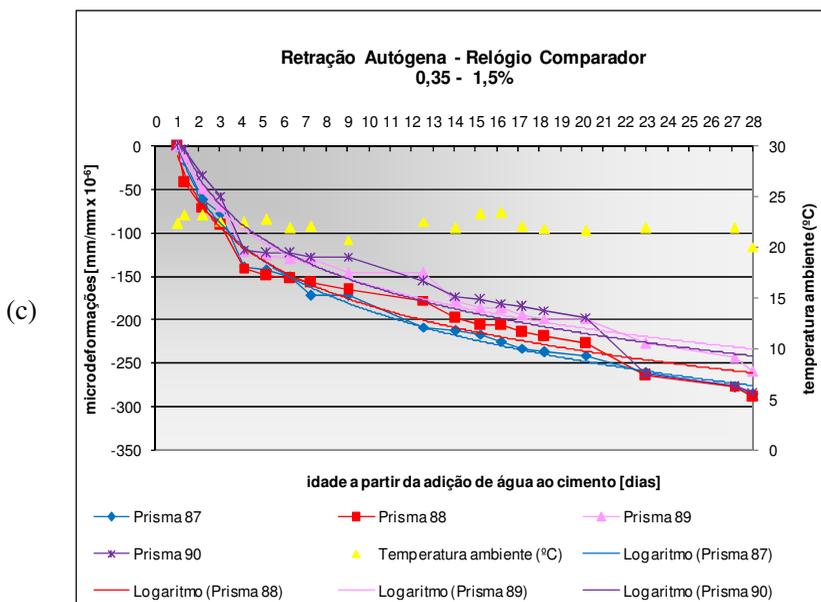
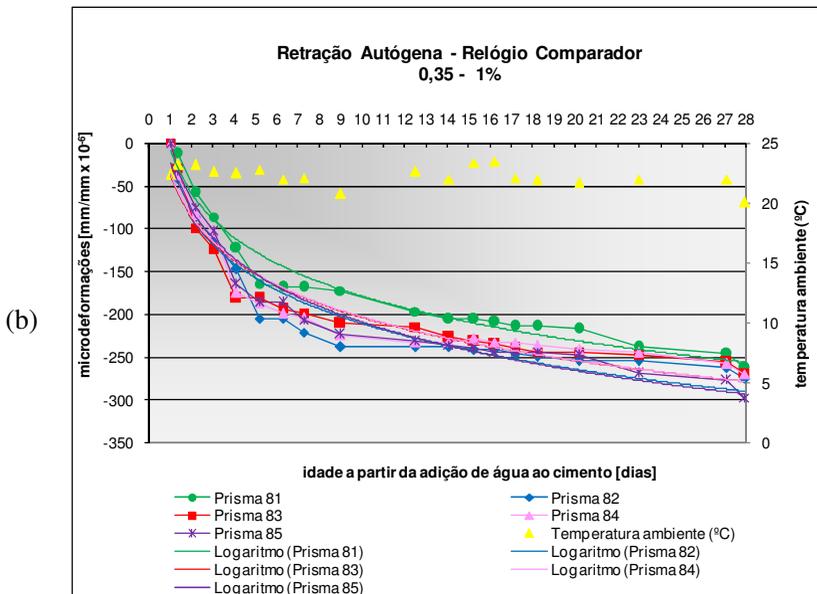
	0,30-REF	0,30-1%	0,30-1,5%	0,30-2%
0,30-REF	X			
0,30-1%	DS	X		
0,30-1,5%	DS	DS	X	
0,30-2%	DS	DS	DS	X

## ANEXO B

Para a relação água/cimento 0,35, foram medidos 5 prismas para cada mistura e para cada um deles foi obtida uma linha de tendência com função logarítmica, conforme observado na Figura 53:

(a)





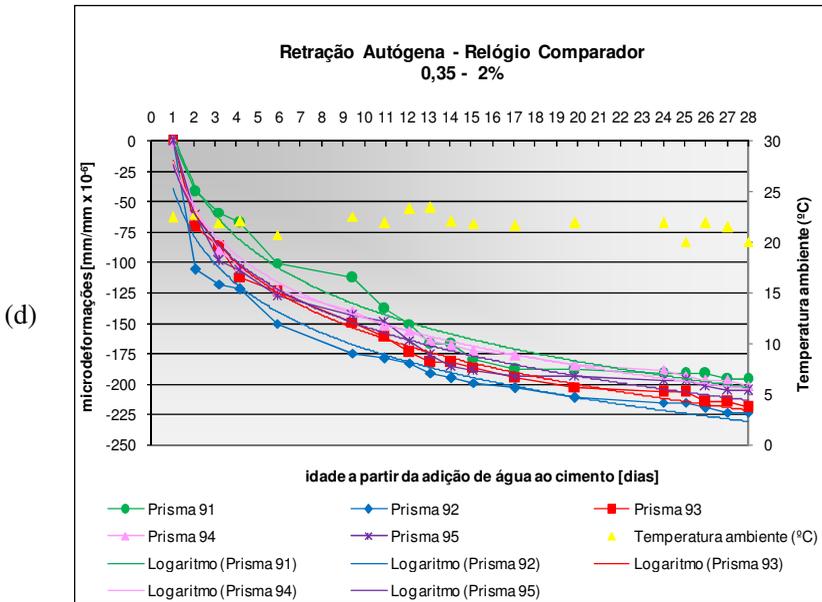


Figura 53 - Retração autóloga – relação a/c 0,35. Em (a) 0,35-REF. (b) 0,35-1% (c) 0,35-1,5% (d) 0,35-2%.

O tratamento estatístico dos resultados, ilustrados abaixo (Tabela 33, Tabela 34 e Tabela 35) foi realizado com ajuda do programa Microsoft Office Excel 2007.

Tabela 33 - Relação a/c 0,35 - Retração média medida com relógio comparador aos 3 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	3 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-112,6	espúrio	-139,9	-59,8
2	-131,1	-118,0	-88,9	-100,6
3	-126,5	-115,5	-92,5	-81,8
4	-116,9	-113,9	-73,4	-76,6
5	-130,0	-110,3	-65,7	-81,2
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-123,4</b>	<b>-114,4</b>	<b>-92,1</b>	<b>-80,0</b>
<b>DESVIO</b>	<b>8,3</b>	<b>3,2</b>	<b>28,9</b>	<b>14,6</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-101,85</b>			

1- **desvio padrão combinado = raiz de  $MQR = \frac{\sum(n-1) \cdot \text{desvio}^2}{\sum n-k}$**   

$$MQR = \frac{272,25}{15} + \frac{30,96}{15} + \frac{3334,97}{15} + \frac{850,83}{15} = 299,27$$

desvio padrão combinado = **17,30**

2- **desvio padrão das médias = desvio padrão combinado / raiz (nh)**  

$$nh = \frac{17,30}{4} = 4,71$$

desvio padrão das médias = **7,97**

3- **grau de liberdade**

n-k	rk2	rk3	rk4
15	3,01	3,67	4,08
Rk	24,00	29,27	32,54

#### 4- Comparativos

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,35-2%	-80,0	12,1	24,00	NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND
2	0,35-1,5%	-92,1			NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND
3	0,35-1%	-114,4	22,3	24,00	NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND
4	0,35-REF	-123,4	9,0	24,00	NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,35-2%	-80,0	34,4	29,27	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,35-1%	-114,4			DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,35-1,5%	-92,1	31,3	29,27	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,35-REF	-123,4			DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,35-2%	-80,00	43,4	32,54	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,35-REF	-123,41			DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS

#### ANÁLISE GERAL - 3 dias

	0,35-REF	0,35-1%	0,35-1,5%	0,35-2%
0,35-REF	X			
0,35-1%	ND	X		
0,35-1,5%	DS	ND	X	
0,35-2%	DS	DS	ND	X

Tabela 34 - Relação a/c 0,35 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	7 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-204,1	espúrio	-196,4	-113,9
2	-234,5	-182,9	-159,6	-149,7
3	-232,4	-176,8	-156,6	-134,6
4	-210,9	-176,3	-134,0	-124,8
5	-224,0	-179,3	-132,2	-130,9
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-221,2</b>	<b>-178,8</b>	<b>-155,8</b>	<b>-130,8</b>
<b>DESVIO</b>	<b>13,3</b>	<b>3,0</b>	<b>25,9</b>	<b>13,2</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-171,26</b>			

$$1- \text{ desvio padrão combinado} = \text{raiz de MQR} = \frac{\Sigma(n-1) \cdot \text{desvio}^2}{\Sigma n-k}$$

$$\text{MQR} = \frac{708,84}{15} + \frac{26,98}{4} + \frac{2690,64}{5} + \frac{693,02}{5} = 274,63$$

$$\text{desvio padrão combinado} = \sqrt{16,57}$$

$$2- \text{ desvio padrão das médias} = \frac{\text{desvio padrão combinado}}{\text{raiz (nh)}}$$

$$\text{nh} = \frac{0,2000}{4} + \frac{0,2500}{4} + \frac{0,2000}{5} + \frac{0,2000}{5} = 4,71$$

$$\text{desvio padrão das médias} = \frac{16,57}{4,71} = 7,64$$

### 3- grau de liberdade

n-k	rk2	rk3	rk4
15	3,01	3,67	4,08
Rk	24,00	29,27	32,54

### 4- Comparativos

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,35-2%	-130,8	25,0	24,00	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,35-1,5%	-155,8	23,1	24,00	NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND
3	0,35-1%	-178,8	42,4	24,00	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,35-REF	-221,2			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,35-2%	-130,8	48,0	29,27	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,35-1%	-178,8	65,4	29,27	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,35-1,5%	-155,8			
4	0,35-REF	-221,2			

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,35-2%	-130,77	90,4	32,54	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,35-REF	-221,18			

### ANÁLISE GERAL - 7 dias

	0,35-REF	0,35-1%	0,35-1,5%	0,35-2%
0,35-REF	X			
0,35-1%	DS	X		
0,35-1,5%	DS	ND	X	
0,35-2%	DS	DS	DS	X

Tabela 35 - Relação a/c 0,35 - Retração média medida com relógio comparador aos 28 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	28 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-353,8	-255,2	-288,8	-202,5
2	-403,6	-289,0	-275,4	-230,0
3	-405,7	-277,2	-261,4	-221,0
4	-364,8	-278,3	-233,1	-203,5
5	-377,9	-292,3	-241,1	-212,3
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-381,2</b>	<b>-278,4</b>	<b>-260,0</b>	<b>-213,8</b>
<b>DESvio</b>	<b>23,1</b>	<b>14,5</b>	<b>23,2</b>	<b>11,7</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-283,35</b>			

1- desvio padrão combinado = raiz de  $MQR = \frac{\sum(n-1) \cdot \text{desvio}^2}{\sum n-k}$

$$MQR = \frac{2132,86}{16} + \frac{846,75}{16} + \frac{2150,05}{16} + \frac{548,79}{16} = 354,90$$

$$\text{desvio padrão combinado} = \sqrt{354,90} = 18,84$$

2- desvio padrão das médias = desvio padrão combinado / raiz (nh)

$$nh = \frac{18,84}{\sqrt{4}} = 9,42$$

$$\text{desvio padrão das médias} = \frac{0,2000}{9,42} = 0,0212$$

3- grau de liberdade

n-k	rk2	rk3	rk4
16	3,00	3,65	4,05
Rk	23,92	29,11	32,30

#### 4- Comparativos

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,35-2%	-213,8	46,1	23,92	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,35-1,5%	-260,0			
2	0,35-1,5%	-260,0	18,4	23,92	NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND
3	0,35-1%	-278,4			
3	0,35-1%	-278,4	102,8	23,92	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,35-REF	-381,2			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,35-2%	-213,8	64,6	29,11	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,35-1%	-278,4			
2	0,35-1,5%	-260,0	121,2	29,11	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,35-REF	-381,2			

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,35-2%	-213,84	167,3	32,30	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,35-REF	-381,16			

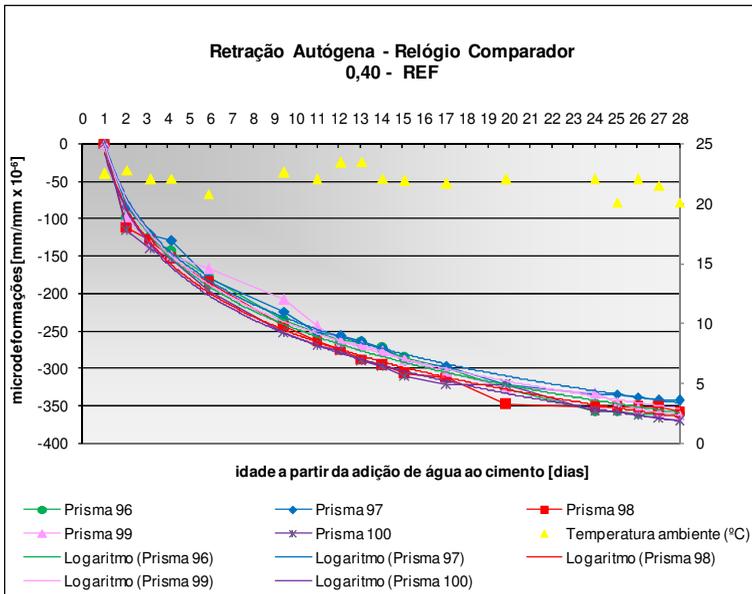
#### ANÁLISE GERAL - 28 dias

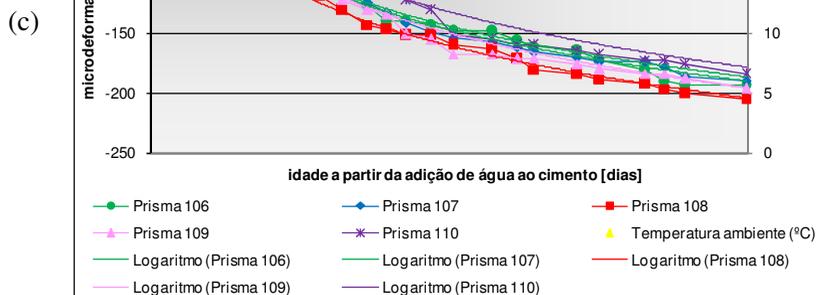
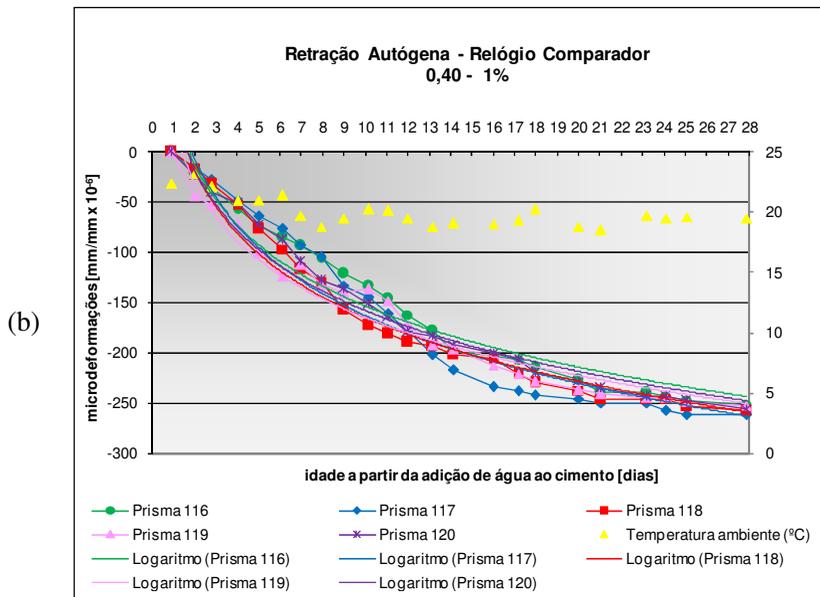
	0,35-REF	0,35-1%	0,35-1,5%	0,35-2%
0,35-REF	X			
0,35-1%	DS	X		
0,35-1,5%	DS	DS	X	
0,35-2%	DS	DS	DS	X

## ANEXO C

Os gráficos ilustrados na Figura 54 são referentes às retrações autógenas medidas pelo relógio comparador para o grupo de relação água/cimento 0,40.

(a)





(d)

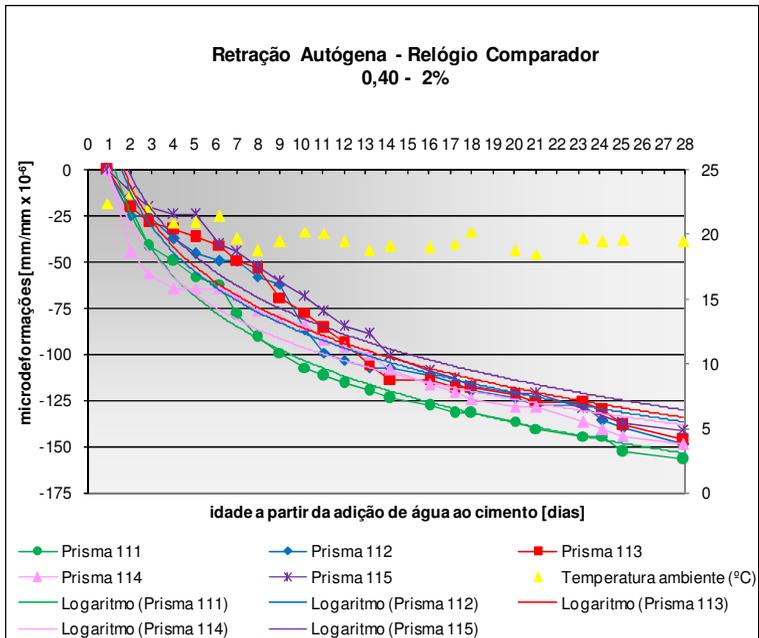


Figura 54 - Retração autóloga – relação a/c 0,40. Em (a) 0,40-REF. (b) 0,40-1% (c) 0,40-1,5% (d) 0,40-2%.

O tratamento estatístico dos resultados está ilustrado a seguir (Tabela 36, Tabela 37 e Tabela 38).

Tabela 36 - Relação a/c 0,40 - Retração média medida com relógio comparador aos 3 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	3 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-116,5	-47,7	-51,8	-42,8
2	-111,3	-45,7	-50,0	-30,8
3	-125,1	-55,4	-63,3	-27,9
4	-115,3	-64,8	-48,4	-45,9
5	-129,2	-52,9	-29,7	-21,4
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-119,5</b>	<b>-53,3</b>	<b>-48,7</b>	<b>-33,8</b>
<b>DESVIO</b>	<b>7,4</b>	<b>7,5</b>	<b>12,1</b>	<b>10,3</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-63,81</b>			

1- **desvio padrão combinado = raiz de  $MQR = \frac{\sum(n-1) \cdot \text{desvio}^2}{\sum n-k}$**

$$MQR = \frac{218,67 \quad 226,33 \quad 584,53 \quad 425,75}{16} = 90,96$$

desvio padrão combinado = **9,54**

2- **desvio padrão das médias = desvio padrão combinado / raiz (nh)**

$$nh = \frac{0,2000 \quad 0,2000 \quad 0,2000 \quad 0,2000}{4} = 5,00$$

desvio padrão das médias = **4,27**

3- **grau de liberdade**

n-k	rk2	rk3	rk4
16	3,00	3,65	4,05
Rk	12,80	15,57	17,27

4- **Comparativos**

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,40-2%	-33,8	14,9	12,80	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,40-1,5%	-48,7	4,7	12,80	NÃO DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - ND
3	0,40-1%	-53,3	66,2	12,80	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-119,5			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,40-2%	-33,8	19,6	15,57	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,40-1%	-53,3	70,8	15,57	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,40-1,5%	-48,7			
4	0,40-REF	-119,5			

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,40-2%	-33,76	85,7	17,27	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-119,48			

**ANÁLISE GERAL - 3 dias**

	0,40-REF	0,40-1%	0,40-1,5%	0,40-2%
0,40-REF	X			
0,40-1%	DS	X		
0,40-1,5%	DS	ND	X	
0,40-2%	DS	DS	DS	X

Tabela 37 - Relação a/c 0,40 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	7 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-208,1	-121,9	-104,5	-84,9
2	-199,4	-128,3	-101,8	-70,9
3	-214,9	-132,5	-116,5	-68,2
4	-205,1	-135,2	-104,7	-81,0
5	-219,8	-127,0	-86,4	-62,6
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-209,5</b>	<b>-129,0</b>	<b>-102,8</b>	<b>-73,5</b>
<b>DESVIO</b>	<b>8,0</b>	<b>5,1</b>	<b>10,8</b>	<b>9,2</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-128,68</b>			

1- **desvio padrão combinado = raiz de MQR =  $\sqrt{\Sigma(n-1) \cdot \text{desvio}^2 / \Sigma n-k}$**   

$$\text{MQR} = \frac{259,13 \quad 105,15 \quad 464,09 \quad 341,62}{16} = 73,12$$

desvio padrão combinado = **8,55**

2- **desvio padrão das médias = desvio padrão combinado / raiz (nh)**  

$$\text{nh} = \frac{0,2000 \quad 0,2000 \quad 0,2000 \quad 0,2000}{4} = 5,00$$

desvio padrão das médias = **3,82**

3- **grau de liberdade**

n-k	rk2	rk3	rk4
16	3,00	3,65	4,05
Rk	12,80	15,57	17,27

4- **Comparativos**

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,40-2%	-73,5	29,3	12,80	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,40-1,5%	-102,8			
2	0,40-1,5%	-102,8	26,2	12,80	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,40-1%	-129,0			
3	0,40-1%	-129,0	80,5	12,80	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-209,5			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,40-2%	-73,5	55,5	15,57	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,40-1%	-129,0			
2	0,40-1,5%	-102,8	106,7	15,57	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-209,5			

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,40-2%	-73,50	136,0	17,27	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-209,47			

**ANÁLISE GERAL - 7 dias**

	0,40-REF	0,40-1%	0,40-1,5%	0,40-2%
0,40-REF	X			
0,40-1%	DS	X		
0,40-1,5%	DS	DS	X	
0,40-2%	DS	DS	DS	X

Tabela 38 - Relação a/c 0,40 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística pelo método de Duncan

	28 dias			
	REF	1%	1,5%	2%
1	-357,8	-243,3	-190,7	espúrio
2	-343,6	-263,5	-186,5	-136,4
3	-361,9	-258,7	-203,6	-134,0
4	-352,0	-250,2	-196,7	-138,4
5	-368,2	-248,2	-179,2	-129,9
<b>N</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>-356,7</b>	<b>-252,8</b>	<b>-191,3</b>	<b>-134,7</b>
<b>DESvio</b>	<b>9,4</b>	<b>8,2</b>	<b>9,4</b>	<b>3,6</b>
<b>K</b>	<b>4,0</b>			
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	<b>-239,10</b>			

1- **desvio padrão combinado = raiz de MQR =  $\sqrt{\Sigma(n-1) \cdot \text{desvio}^2 / \Sigma n-k}$**   
MQR =  $\frac{352,58 \quad 267,05 \quad 351,23 \quad 39,78}{15} = 67,38$

desvio padrão combinado = **8,21**

2- **desvio padrão das médias = desvio padrão combinado / raiz (nh)**  
nh =  $\frac{8,21}{4} = 4,71$

desvio padrão das médias = **3,78**

3- **grau de liberdade**

n-k	rk2	rk3	rk4
15	3,01	3,67	4,08
Rk	12,84	15,65	17,40

4- **Comparativos**

Comparativo 2 a 2 - comparar com RK2

1	0,40-2%	-134,7	56,6	12,84	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
2	0,40-1,5%	-191,3			
2	0,40-1,5%	-191,3	61,5	12,84	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,40-1%	-252,8			
3	0,40-1%	-252,8	103,9	12,84	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-356,7			

Comparativo 3 a 3 - comparar com RK3

1	0,40-2%	-134,7	118,1	15,65	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
3	0,40-1%	-252,8			
2	0,40-1,5%	-191,3	165,4	15,65	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-356,7			

Comparativo 4 a 4 - comparar com RK4

1	0,40-2%	-134,69	222,0	17,40	DIFEREM SIGNIFICATIVAMENTE - DS
4	0,40-REF	-356,69			

**ANÁLISE GERAL - 28 dias**

	0,40-REF	0,40-1%	0,40-1,5%	0,40-2%
0,40-REF	X			
0,40-1%	DS	X		
0,40-1,5%	DS	DS	X	
0,40-2%	DS	DS	DS	X

## **ANEXO D**

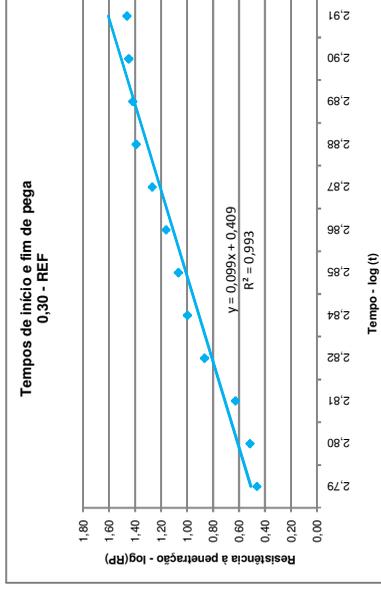
Os gráficos ilustrados a seguir são referentes aos resultados dos tempos de início e fim de pega das AAA.

MISTURA: 0,30 - REF

CPI										CPI									
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)				
19:21	10:35	635,00	2,80	129,1	372	2,9	0,460	19:18	10:07	607,00	2,78	129,1	376	2,9	0,464				
19:31	10:45	645,00	2,81	129,1	450	3,5	0,542	19:31	10:20	620,00	2,79	129,1	398	3,1	0,489				
19:49	11:03	663,00	2,82	129,1	583	4,5	0,655	19:50	10:39	639,00	2,81	129,1	515	4,0	0,601				
20:07	11:21	681,00	2,83	32,2	233	7,2	0,860	20:06	10:55	655,00	2,82	32,2	240	7,5	0,872				
20:26	11:40	700,00	2,85	32,2	315	9,8	0,990	20:25	11:14	674,00	2,83	32,2	325	10,1	1,004				
20:42	11:56	716,00	2,85	21,5	256	11,9	1,076	20:43	11:32	692,00	2,84	21,5	246	11,4	1,058				
21:01	12:15	735,00	2,87	16,1	243	15,1	1,179	21:02	11:51	711,00	2,85	32,2	450	14,0	1,145				
21:11	12:25	745,00	2,87	16,1	302	18,8	1,273	21:12	12:01	721,00	2,86	16,1	295	18,3	1,263				
21:30	12:44	764,00	2,88	16,1	400	24,8	1,395	21:29	12:18	738,00	2,87	16,1	395	24,5	1,390				
21:52	13:06	786,00	2,90	16,1	425	26,4	1,422	21:58	12:47	767,00	2,88	16,1	420	26,1	1,416				
22:13	13:27	807,00	2,91	16,1	440	27,3	1,437	22:14	13:03	783,00	2,89	16,1	466	28,9	1,462				
22:32	13:46	826,00	2,92	16,1	460	28,6	1,456	22:32	13:21	801,00	2,90	16,1	476	29,6	1,471				

Média

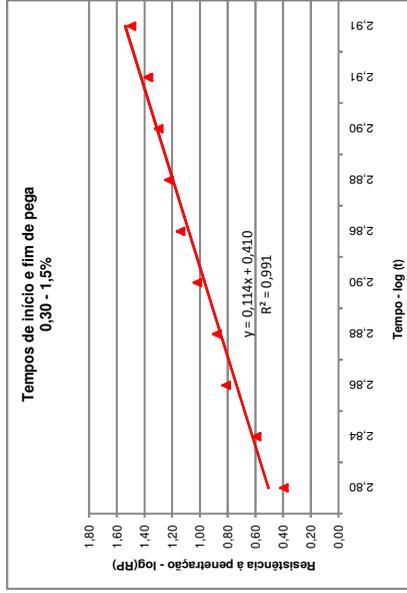
Log (t)	Log (RP)
2,79	0,462
2,80	0,516
2,81	0,628
2,82	0,866
2,84	0,997
2,85	1,067
2,86	1,162
2,87	1,268
2,88	1,393
2,89	1,419
2,90	1,449
2,91	1,463





**MISTURA: 0,30 - 1,5%**

CPI						CPI									
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
20:27	10:43	643,00	2,81	129,1	315	2,4	0,387	20:29	10:33	633,00	2,80	129,1	326	2,5	0,402
21:15	11:31	691,00	2,84	129,1	511	4,0	0,597	21:16	11:20	680,00	2,83	129,1	496	3,8	0,585
22:02	12:18	738,00	2,87	32,2	217	6,7	0,829	22:02	12:06	726,00	2,86	32,2	201	6,2	0,795
22:27	12:43	763,00	2,88	32,2	254	7,9	0,897	22:29	12:33	753,00	2,88	32,2	233	7,2	0,860
22:59	13:15	795,00	2,90	32,2	352	10,9	1,039	23:01	13:05	785,00	2,89	32,2	321	10,0	0,999
21:57	12:13	733,00	2,87	16,1	215	13,4	1,126	22:00	12:04	724,00	2,86	16,1	230	14,3	1,155
22:27	12:43	763,00	2,88	16,1	272	16,9	1,228	22:29	12:33	753,00	2,88	16,1	267	16,6	1,220
22:59	13:15	795,00	2,90	16,1	326	20,2	1,306	23:02	13:06	786,00	2,90	16,1	313	19,4	1,289
23:15	13:31	811,00	2,91	16,1	398	24,7	1,393	23:16	13:20	800,00	2,90	16,1	362	22,5	1,352
23:31	13:47	827,00	2,92	16,1	544	33,8	1,529	23:32	13:36	816,00	2,91	16,1	465	28,9	1,461



Média

Log (t)	Log (RP)
2,80	0,395
2,84	0,591
2,86	0,812
2,88	0,878
2,90	1,019
2,86	1,140
2,88	1,224
2,90	1,298
2,91	1,372
2,91	1,495

Início de pega → resistência à penetração = 3,4 MPa

Fim de pega → resistência à penetração = 27,0 MPa

$$\log (RP) = 0,114 \times \log (t) + 0,410$$

$$a0 = 0,410$$

$$a1 = 0,114$$

$$\log (t) \text{ início} = 2,836$$

$$\log (t) \text{ fim} = 2,906$$

$$\text{tempo de início de pega} = 11:25$$

$$\text{tempo de fim de pega} = 13:53$$

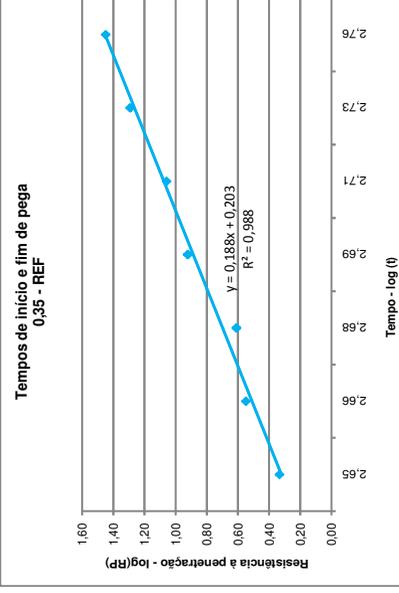


MISTURA: 0,35 - REF

CPI1						CPI2									
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm²)	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm²)	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
18:02	7:31	451,00	2,65	129,1	308	2,4	0,378	18:03	7:23	443,00	2,65	129,1	251	1,9	0,289
18:15	7:44	484,00	2,67	129,1	471	3,6	0,582	18:16	7:36	456,00	2,66	129,1	444	3,4	0,536
18:34	8:03	483,00	2,68	129,1	562	4,4	0,639	18:35	7:55	475,00	2,68	129,1	492	3,8	0,581
18:50	8:19	499,00	2,70	32,2	276	8,6	0,933	18:51	8:11	491,00	2,69	32,2	263	8,2	0,912
19:03	8:32	512,00	2,71	11,7	376	11,7	1,087	19:03	8:23	503,00	2,70	32,2	362	11,2	1,051
19:32	9:01	541,00	2,73	16,1	320	19,9	1,298	19:33	8:53	533,00	2,73	16,1	311	19,3	1,286
20:08	9:37	577,00	2,76	16,1	440	27,3	1,437	20:10	9:30	570,00	2,76	16,1	466	28,9	1,462
20:31	10:00	600,00	2,78	16,1	592	36,8	1,585	20:32	9:52	592,00	2,77	16,1	550	34,2	1,534

Média

Log (t)	Log (RP)
2,65	0,333
2,66	0,549
2,68	0,610
2,69	0,923
2,71	1,059
2,73	1,292
2,76	1,449



Início de pega → resistência à penetração = 3,4 MPa  
Fim de pega → resistência à penetração = 27,0 MPa

$$\log (RP) = 0,188 \times \log (t) + 0,203$$

$$a0 = 0,203$$

$$a1 = 0,188$$

$$\log (t) \text{ início} = 2,663$$

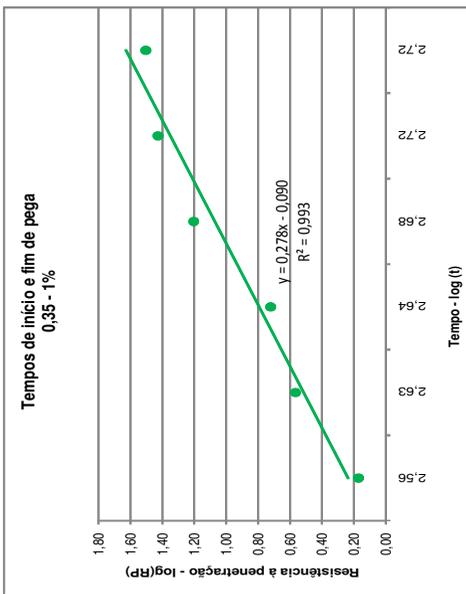
$$\log (t) \text{ fim} = 2,759$$

$$\text{tempo de início de pega} = 7:40$$

$$\text{tempo de fim de pega} = 9:33$$

MISTURA: 0,35 - 1%															
CP1					CP1										
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
16:59	6:07	367,00	2,56	214,6	315	1,5	0,167	17:02	5:57	357,00	2,55	214,6	322	1,5	0,176
18:04	7:12	432,00	2,64	129,1	495	3,8	0,584	18:06	7:01	421,00	2,62	129,1	456	3,5	0,548
18:17	7:25	445,00	2,65	129,1	658	5,1	0,707	18:18	7:13	433,00	2,64	129,1	703	5,4	0,736
18:55	8:03	483,00	2,68	32,2	520	16,1	1,208	19:00	7:55	475,00	2,68	32,2	510	15,8	1,200
19:40	8:48	528,00	2,72	16,1	442	27,5	1,439	19:43	8:38	518,00	2,71	16,1	421	26,1	1,417
19:42	8:50	530,00	2,72	16,1	530	32,9	1,517	19:44	8:39	519,00	2,72	16,1	500	31,1	1,492

Média  
 Log (t) 2,56  
 Log (RP) 0,171  
 2,63 0,566  
 2,64 0,722  
 2,68 1,204  
 2,72 1,428  
 2,72 1,505



Início de pega → resistência à penetração = 3,4 MPa  
 Fim de pega → resistência à penetração = 27,0 MPa

$$\log (RP) = 0,278 \times \log (t) + 0,090$$

$$a0 = 0,090$$

$$a1 = 0,278$$

$$\log (t) \text{ início} = 2,630$$

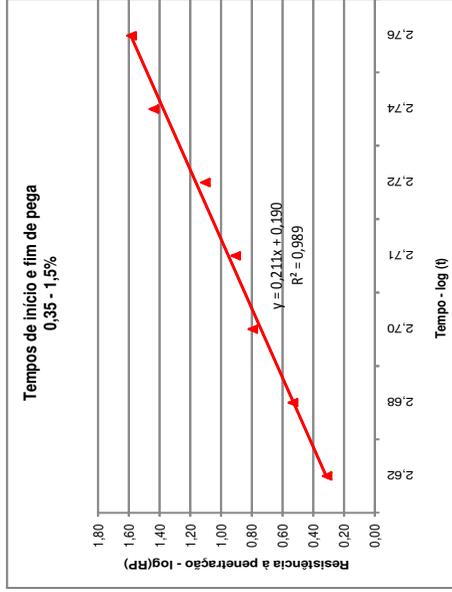
$$\log (t) \text{ fim} = 2,718$$

$$\text{tempo de início de pega} = 7,06$$

$$\text{tempo de fim de pega} = 8,43$$

MISTURA: 0,35 - 1,5%

CPI1						CPI2									
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
18:19	6:57	417,00	2,62	129,1	268	2,1	0,317	18:21	6:50	410,00	2,61	129,1	260	2,0	0,304
18:45	7:23	443,00	2,65	129,1	450	3,5	0,542	20:13	8:42	522,00	2,72	129,1	432	3,3	0,525
19:17	7:55	475,00	2,68	32,2	195	6,1	0,782	20:13	8:42	522,00	2,72	32,2	206	6,4	0,806
19:41	8:19	499,00	2,70	32,2	251	7,8	0,892	20:13	8:42	522,00	2,72	32,2	266	8,3	0,917
20:11	8:49	529,00	2,72	21,5	269	12,5	1,097	20:13	8:42	522,00	2,72	21,5	275	12,8	1,107
20:35	9:13	553,00	2,74	16,1	440	27,3	1,437	20:36	9:05	545,00	2,74	16,1	441	27,4	1,438
21:02	9:40	580,00	2,76	16,1	610	37,9	1,579	21:04	9:33	573,00	2,76	16,1	623	38,7	1,588



Média

Log (t)	Log (RP)
2,62	0,311
2,68	0,533
2,70	0,794
2,71	0,904
2,72	1,102
2,74	1,437
2,76	1,583

Início de pega → resistência à penetração = 3,4 MPa

Fim de pega → resistência à penetração = 27,0 MPa

$$\log (RP) = 0,211 \times \log (t) + 0,190$$

$$a0 = 0,190$$

$$a1 = 0,211$$

$$\log (t) \text{ início} = 2,682$$

$$\log (t) \text{ fim} = 2,740$$

$$\text{tempo de início de pega} = 8,02$$

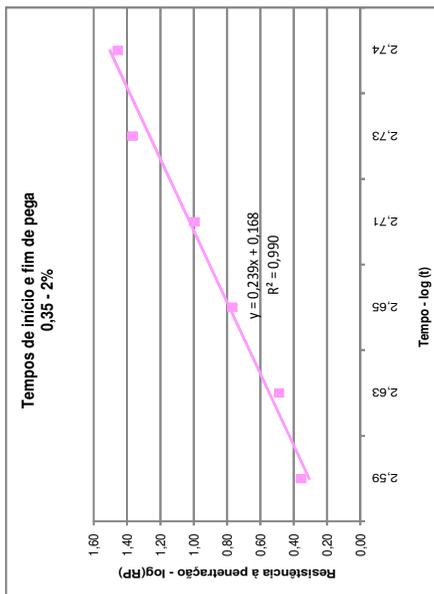
$$\text{tempo de fim de pega} = 9,09$$

MISTURA: 0,35 - 2%															
CPI						CPI									
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
18:08	6:35	395,00	2,60	129,1	301	2,3	0,368	18:09	6:28	388,00	2,59	129,1	285	2,2	0,344
18:44	7:11	431,00	2,63	129,1	385	3,0	0,475	18:45	7:04	424,00	2,63	129,1	409	3,2	0,501
19:05	7:32	452,00	2,66	32,2	192	6,0	0,775	19:06	7:25	445,00	2,65	32,2	185	5,7	0,759
20:13	8:40	520,00	2,72	16,1	150	9,3	0,989	20:14	8:33	513,00	2,71	16,1	169	10,5	1,021
20:36	9:03	543,00	2,73	16,1	385	23,9	1,379	20:36	8:55	535,00	2,73	16,1	364	22,6	1,354
20:42	9:09	549,00	2,74	16,1	450	28,0	1,446	20:44	9:03	543,00	2,73	16,1	471	29,3	1,466

Média

Log (t)	Log (RP)
2,59	0,356
2,63	0,488
2,65	0,767
2,71	0,995
2,73	1,386
2,74	1,456

**Tempos de início e fim de pega  
0,35 - 2%**



Início de pega → resistência à penetração = 3,4 MPa  
 Fim de pega → resistência à penetração = 27,0 MPa

$$\log (RP) = 0,239 \times \log (t) + 0,168$$

$$a0 = 0,168$$

$$a1 = 0,239$$

$$\log (t) \text{ início} = 2,631$$

$$\log (t) \text{ fim} = 2,734$$

$$\text{tempo de início de pega} = 7,07$$

$$\text{tempo de fim de pega} = 9,06$$

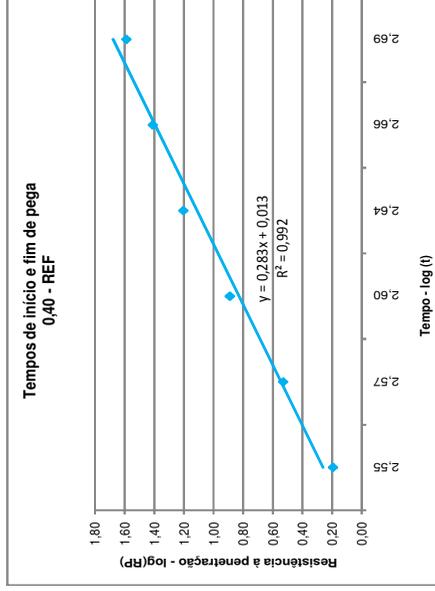
MISTURA: 0,40 - REF

CPI1										CPI2					
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área aquilha (mm²)	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área aquilha (mm²)	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
17:07	5:22	322,00	2,51	214,6	350	1,6	0,212	18:16	6:26	386,00	2,59	214,6	323	1,5	0,178
17:32	5:47	347,00	2,54	129,1	441	3,4	0,534	18:35	6:45	405,00	2,61	129,1	436	3,4	0,529
18:09	6:24	384,00	2,58	32,2	260	8,1	0,907	18:35	6:45	405,00	2,61	32,2	241	7,5	0,874
19:09	7:24	444,00	2,65	16,1	253	15,7	1,196	18:51	7:01	421,00	2,62	16,1	282	16,3	1,211
19:38	7:53	473,00	2,67	16,1	418	26,0	1,414	19:03	7:13	433,00	2,64	16,1	411	25,5	1,407
20:18	8:33	513,00	2,71	16,1	685	42,5	1,629	19:33	7:43	463,00	2,67	16,1	569	35,3	1,548

Média

Log (t)	Log (RP)
2,55	0,195
2,57	0,531
2,60	0,891
2,64	1,204
2,66	1,411
2,69	1,589

Tempos de início e fim de pega  
0,40 - REF



Início de pega → resistência à penetração = 3,4 MPa

Fim de pega → resistência à penetração = 27,0 MPa

$$\log (RP) = 0,283 \times \log (t) + 0,013$$

$$a0 = 0,013$$

$$a1 = 0,283$$

$$\log (t) \text{ início} = 2,574$$

$$\log (t) \text{ fim} = 2,656$$

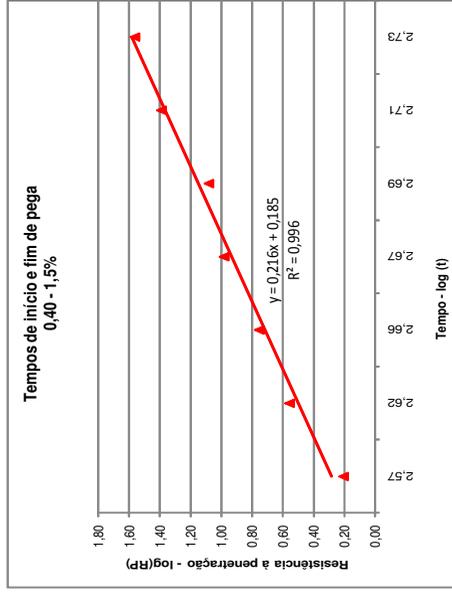
$$\text{tempo de início de pega} = 6:16$$

$$\text{tempo de fim de pega} = 7:33$$



MISTURA: 0,40 - 1,5%

CPI1						CPI2									
hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)	hora	tempo (h)	tempo (min)	Log (t)	Área agulha (mm <sup>2</sup> )	Giro	Resist. Pen.	Log (RP)
18:38	6:27	387,00	2,59	129,1	210	1,6	0,211	18:21	6:04	364,00	2,56	129,1	205	1,6	0,201
19:06	6:55	415,00	2,62	129,1	494	3,8	0,583	19:07	6:50	410,00	2,61	129,1	439	3,4	0,532
19:46	7:35	455,00	2,66	32,2	185	5,7	0,759	19:47	7:30	450,00	2,65	32,2	180	5,6	0,747
20:01	7:50	470,00	2,67	16,1	158	9,8	0,992	20:02	7:45	465,00	2,67	16,1	151	9,4	0,972
20:22	8:11	491,00	2,69	16,1	192	11,9	1,076	20:23	8:06	486,00	2,69	16,1	196	12,2	1,085
21:04	8:53	533,00	2,73	16,1	396	24,6	1,391	20:36	8:19	499,00	2,70	16,1	394	24,5	1,389
21:31	9:20	560,00	2,75	16,1	590	36,6	1,564	21:04	8:47	527,00	2,72	16,1	586	36,4	1,561



Média

Log (t)	Log (RP)
2,57	0,206
2,62	0,557
2,66	0,753
2,67	0,982
2,69	1,081
2,71	1,390
2,73	1,563

Início de pega → resistência à penetração = 3,4 MPa

Fim de pega → resistência à penetração = 27,0 MPa

$$\log (RP) = 0,216 \times \log (t) + 0,185$$

$$a_0 = 0,185$$

$$a_1 = 0,216$$

$$\log (t) \text{ início} = 2,615$$

$$\log (t) \text{ fim} = 2,712$$

$$\text{tempo de início de pega} = 6:52$$

$$\text{tempo de fim de pega} = 8:36$$





## ANEXO E

A Tabela 39 apresenta os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova das argamassas estudadas.

**Tabela 39 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas**

<b>Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas</b>													
<b>Misturas</b>	<b>3 dias</b>				<b>7 dias</b>				<b>28 dias</b>				
	Resistência (MPa)		Resistência média (MPa)	Resistência (MPa)		Resistência média (MPa)	Resistência (MPa)		Resistência média (MPa)	Resistência (MPa)		Resistência média (MPa)	
<b>0,30 - REF</b>	66,6	68,2	65,8	66,9	74,6	75,9	74,5	75,0	89,6	87,9	87,5	85,6	87,7
<b>0,30 - 1%</b>	espúrio	65,5	63,3	64,4	71,9	72,8	77,0	73,9	84,7	83,6	88,5	86,2	85,8
<b>0,30 - 1,5%</b>	57,5	62,5	59,2	59,8	70,8	66,3	72,7	69,9	espúrio	84,5	85,2	81,6	83,8
<b>0,30 - 2%</b>	53,9	57,4	57,2	56,2	67,3	65,9	66,3	66,5	76,6	79,5	79,5	78,8	78,6
<b>0,35 - REF</b>	52,5	54,4	51,9	52,9	64,9	66,7	65,3	65,6	83,8	84,7	86,2	81,4	84,0
<b>0,35 - 1%</b>	47,9	50,6	47,8	48,8	60,5	62,9	63,2	62,2	77,3	80,9	73,3	72,1	75,9
<b>0,35 - 1,5%</b>	44,8	46,8	47,0	46,2	espúrio	55,1	56,6	55,9	76,3	74,1	76,2	73,6	75,1
<b>0,35 - 2%</b>	46,2	45,6	44,9	45,6	55,5	51,9	53,8	53,7	73,6	69,9	70,3	71,0	71,2
<b>0,40 - REF</b>	49,0	48,6	48,2	48,6	55,9	58,8	57,1	57,3	66,4	71,1	espúrio	69,8	69,1
<b>0,40 - 1%</b>	44,1	45,6	48,1	45,9	50,9	50,2	51,3	50,8	64,5	62,2	62,9	61,0	62,7
<b>0,40 - 1,5%</b>	44,7	45,7	44,8	45,0	48,9	47,2	48,6	48,2	58,6	58,0	58,1	59,5	58,6
<b>0,40 - 2%</b>	37,5	40,2	42,3	40,0	48,2	46,5	46,6	47,1	59,0	59,7	espúrio	56,0	58,2