

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM
MICROCONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE
POLÍMEROS SUPERABSORVENTES E ADITIVO REDUTOR DE
RETRAÇÃO**

SIRLEY TATIANA LÓPEZ ORDÓÑEZ

ORIENTADOR: ELTON BAUER

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2013

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM
MICROCONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE
POLÍMEROS SUPERABSORVENTES E ADITIVO REDUTOR DE
RETRAÇÃO**

SIRLEY TATIANA LÓPEZ ORDÓÑEZ

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

Prof. Elton Bauer, D.Sc (UnB)

(Orientador)

Prof^a. Eugênia Fonseca da Silva, D.Sc (UnB)

(Examinadora Interna)

**Eng. Anne Neiry de Mendonça Lopes, D.Sc (Furnas Centrais Elétricas
S.A.)**

(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 11 DE ABRIL DE 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

ORDÓÑEZ, SIRLEY TATIANA LÓPEZ	
Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de Retração. [Distrito Federal] 2013.	
xviii, 160 p. 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2013).	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Retração autógena	2. Concreto de alta resistência
3. Polímero superabsorvente PSA	4. Aditivo redutor de retração ARR
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORDÓÑEZ, S.T.L (2013). Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de Retração. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-002A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Sirley Tatiana López Ordóñez.

TÍTULO: Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de Retração.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Sirley Tatiana López Ordóñez

SQN 409 Bloco H Apartamento 304 Asa Norte.

CEP: 70857-080 Brasília/DF, Brasil.

Email: talo1004@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela saúde e perseverança concedida para que eu pudesse culminar esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Fatima Emma e Mauricio, pelo amor e suporte incondicionais, por acreditarem em mim e por se sacrificarem em prol dos investimentos em minha educação. Aos meus irmãos, Carolina e Santiago, que de alguma forma se fizeram presentes diminuindo a saudade provocada pela distância, obrigada por tanto amor e pelo apoio.

Ao professor Elton Bauer pelo apoio e ensinamentos transmitidos nesses dois anos.

À professora Eugênia Fonseca, minha profunda gratidão e agradecimento pelo apoio, tempo, conselhos, ensinamentos, dedicação e confiança concedida que proporcionaram o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília. Em especial, aos meus amigos Yina, Manuel Alejandro, Rudi, Marília, Maria Cláudia, Nazaré, Ramon, Maria del Pilar e Paola: obrigada pela amizade, ensinamentos e tempo dedicados a mim sempre que precisei. Aos meus amigos presentes e responsáveis por tantos momentos felizes: Andrés Felipe, Erwin, Miguel Eduardo, Camilo, Diana Jimena e Harry, pela amizade e pela colaboração.

Ao Guilherme e Lucas, pela disponibilidade e dedicação na realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais pela disponibilidade de equipamentos e instalações para realização dos ensaios. Aos técnicos do laboratório: Severo, Washington, Saimon e Cristiano pela grande ajuda na execução dos ensaios. Ao senhor Valderi, que tanto contribuiu na montagem do equipamento para ensaio da retração autógena. Muito obrigada pelas horas dedicadas a este projeto.

Ao corpo técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., pela disponibilização da estrutura e dos equipamentos necessários para a realização de alguns ensaios.

À Concrecon, que cedeu os materiais utilizados na pesquisa para realização dos diferentes ensaios.

Agradeço ao CNPq, que contribuiu com uma bolsa de estudos durante os dois anos de mestrado

*Aos meus pais Fatima Emma e Mauricio, pelo amor e apoio incondicional,
e por serem um porto seguro para onde posso regressar.*

*Aos meus irmãos Carolina e Santiago,
que acreditaram em mim e me animaram a continuar.*

*“Cuando hayas alcanzado
algunas cumbres no vuelvas a descender,
extiende tus alas y vuela más alto”*

Richard Back

MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM MICROCONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES E ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO

Autora: Sirley Tatiana López Ordóñez

Orientador: Elton Bauer

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, abril de 2013

O concreto de alta resistência apresenta inúmeras vantagens devido à relação água/materiais cimentícios baixa e, associado a um consumo elevado de material cimentício, apresenta refinamento da rede porosa. Com isso, há um aumento das forças capilares e, por consequência, elevação da retração autógena, que constitui um aspecto desfavorável ao uso desse concreto como material estrutural e que particularmente é mais intensa nestes concretos que nos de resistência normal. Diante o exposto, esta pesquisa investigou a eficácia de duas soluções mitigadoras da retração autógena: o polímero superabsorvente – PSA e o aditivo redutor de retração – ARR. Foi investigado também o comportamento mecânico e a durabilidade, em microconcretos com resistência à compressão, aos 28 dias, da ordem de 120 MPa. As misturas com três teores de PSA (0,3%; 0,4% e 0,6% em relação à massa de cimento), dois teores de ARR (1% e 2% em relação à água de cimento) e uma relação de a/c maior ao da mistura de referência (a/c=0,5) foram realizadas em laboratório e comparadas ao traço de referência. A metodologia usada para determinação da retração autógena foi a prescrita pelo JCI - Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete, em corpos de prova prismáticos. O tempo de início da determinação experimental da retração autógena foi obtido usando a técnica da velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados indicam que as duas estratégias mitigadoras são eficazes na redução da retração autógena, sem alterar de forma relevante as propriedades mecânicas e a durabilidade. Mas especificamente, o PSA é bastante promissor, pois no teor de 0,6% em relação à massa de cimento, na idade de três dias, a redução na retração autógena foi de 80% com pequena redução nas propriedades mecânicas (até 15%) em relação à mistura de referência. Com relação ao ARR, o teor de 2% é eficaz na redução da retração (até 42% aos 3 dias) com pequena redução nas propriedades mecânicas (até 10%) em relação à mistura de referência.

Palavras chaves: concreto de alta resistência, retração autógena, polímero superabsorvente, aditivo redutor de retração.

MITIGATION OF AUTOGENOUS SHRINKAGE IN HIGH STRENGTH MICROCONCRETE WITH ADDITION OF SUPERABSORBENT POLYMER AND SHRINKAGE REDUCING ADMIXTURE

Author: Sirley Tatiana López Ordóñez

Orientador: Elton Bauer

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, April of 2013

High strength concrete has many advantages due to its low water/cement (w/c) relationship, and its high usage of cementitious materials causes refinement of the porous media. However, there is an increase in capillary forces and, therefore, an increase in autogenous shrinkage which is an unfavorable aspect to the use of such concrete as a structural material. The increase is more intense when using high strength concretes instead of normal strength ones. This study investigated the efficiency of two solutions as mitigation strategies to autogenous shrinkage: the Superabsorbent Polymer - SAP and Shrinkage Reducing Admixtures – SRA. The mechanical properties and durability in microconcretes with compressive strength at 28 day, of about 120 MPa, were also studied. Mixtures having three levels of SAP (0.3%, 0.4% and 0.6% relative to mass of cement), two levels of SRA (1% to 2% relative to mass of cement), and a ratio w/c higher than the reference mixture (w/c=0.5), were performed in the lab and compared to the reference mixture. The methodology used to determine autogenous shrinkage was prescribed by JCI - Technical Committee on autogenous Shrinkage of Concrete, in prismatic specimens. The time of initiation of experimental determination of autogenous shrinkage was obtained using the technique of ultrasonic pulse velocity. The results indicated that the two mitigation strategies are effective in reducing autogenous shrinkage without changing the mechanical properties and durability of the material. More specifically, the SAP is very promising, because the content of 0.6% relative to the weight of cement, at the age of three days, reduced 81% the autogenous shrinkage with little reduction in mechanical properties (up to 15%) compared to the reference mixture. With respect to the SRA, the content of 2% is effective at reducing shrinkage (up to 42% at 3 days) with little reduction in mechanical properties (up to 10%) compared to the reference mixture.

Keywords: high strength concrete, autogenous shrinkage, superabsorbent polymer, shrinkage-reducing admixtures.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2 – OBJETIVOS.....	5
1.2.1 - Objetivo geral.....	5
1.2.1 - Objetivos específicos.....	5
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 - CONCEITOS DE PEGA E ENDURECIMENTO	7
2.2 -TEMPO ZERO (T₀)/PATAMAR DE PERCOLAÇÃO.....	11
2.3 - VARIAÇÕES DIMENSIONAIS NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO..	15
2.3.1 – Classificação e terminologia da retração utilizada nesta pesquisa	15
2.3.2 - Contração Le Chatelier.....	21
2.3.3 - Retração por secagem.....	23
2.3.4 - Retração autógena	24
2.3.4.1 – Métodos de Medição da Retração Autógena.....	29
2.4 – DESENVOLVIMENTO DA MICROESTRUTURA	34
2.4.1 - Aplicação do modelo de Powers a amostras submetidas à cura interna	37
2.5 - ESTRATÉGIAS MITIGADORAS DA RETRAÇÃO AUTÓGENA	41
2.6 - O polímero superabsorvente PSA	41
2.6.1 - Efeitos do polímero superabsorvente PSA na redução da retração autógena ..	45
2.6.2 - Resistência à compressão	49
2.6.3 - Porosidade	51
2.6.4 - Trabalhabilidade.....	52
2.7 – Aditivo redutor de retração – ARR.....	53
3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	55
3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	55
3.2 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS	58

3.3	MATERIAIS CONSTITUINTES E ENSAIOS	59
3.3.1	– Cimento	59
3.3.2	– Silica ativa	62
3.3.3	–Agregado miúdo	63
3.3.4	– Aditivos	64
3.3.5	– Polímero Superabsorvente.....	65
3.4	– Composição dos microconcretos e procedimentos de mistura	66
3.5	- METODOLOGIA DOS ENSAIOS	69
3.5.1	- Determinação do espalhamento pelo método do tronco de cone	69
3.5.2	- Determinação do tempo zero pelo método do pulso ultrassônico.....	70
3.5.3	- Ensaio de densidade no estado fresco	71
3.5.4	- Retração autógena medida com extensômetro	72
3.5.5	- Resistência à Compressão dos cilindros.....	75
3.5.6	- Resistência à Compressão dos cubos	76
3.5.7	- Resistência à tração na flexão	76
3.5.8	- Determinação da absorção de água por capilaridade	77
3.5.9	- Determinação da absorção de água por imersão	78
4 -	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	79
4.1	- PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	79
4.1.1	- Ensaio de espalhamento – diâmetro de espalhamento	79
4.1.2	– Tempo zero (t_0).....	82
4.1.3	– Densidade	86
4.2	– PROPRIEDADES NO ESTADO SÓLIDO	86
4.2.1	– Retração autógena.....	86
4.2.1.1	– Perda de massa	86
4.2.1.2	– Resultados individuais.....	87
4.2.1.3	– Resultados médios	92

4.2.1.4	– Comparação com outros pesquisadores.....	97
4.2.2	– Resistência à compressão	99
4.2.2.1	- Resistencia à compressão dos cubos	99
4.2.2.2	- Resistência à compressão dos cilindros	103
4.2.3	– Resistência à tração na flexão.....	106
4.2.4	– Absorção por capilaridade	108
4.2.5	– Absorção de agua por imersão.	111
5	- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
5.1	– CONCLUSÕES.....	113
5.2	– SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
	APÊNDICES	124
	APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO AUTÓGENA MEDIDA COM EXTENSOMETROS	125
	APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS E CILINDROS E DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	133
	APÊNDICE C – TESTE DE NORMALIDADE DE ANDERSON- DARLING	147
	APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE E ABSORÇÃO POR IMERSÃO	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação dos estágios desde a mistura do cimento e a mistura com água, passando pelos tempos de pega e endurecimento.....	7
Figura 2.2 - Gráfico representativo da evolução da taxa de calor de uma pasta de cimento, durante processo de hidratação (SILVA, 2007)	10
Figura 2.3 - Esquema representativo das noções da teoria da percolação Segundo Acker (1988), adaptado por Silva (2007).....	11
Figura 2.4 - Vista do dispositivo FreshCon para determinação da pega usando pulso ultrassônico (Beilie, 2005).....	12
Figura 2.5 Curva velocidade do pulso ultrassônico versus idade da argamassa (REINHARDT e GROSSE , 2003)	13
Figura 2.6 - a) Velocidade de propagação da onda pela idade do corpo-de-prova para três tentativas e b) Representação esquemática da evolução do ensaio de ultrassom (ZHANG et al. 2009, modificado).....	14
Figura 2.7 - Representação gráfica da terminologia empregada por Jensen e Hansen (2001b)	17
Figura 2.8 - Tipos de sistema (SILVA, 2007)	18
Figura 2.9 - Resumo esquemático da possibilidade de ocorrência das deformações autógena e não autógena nos tipos de sistemas (SILVA, 2007).....	19
Figura 2.10 - Organograma com a classificação proposto por Silva (2007) para as deformações autógenas e não autógenas	20
Figura 2.11- Desenho esquemático da variação volumétrica causada pela pressão atmosférica numa suspensão (adaptado de SILVA, 2007).....	21
Figura 2.12 - Autodessecação pela contração de Le Chatelier (adaptado Hua et al, 1995)	22
Figura 2.13 - Relação entre retração química e retração autógena (adaptado Nawa e Horita, 2005).....	26
Figura 2.14 – Esquema do desenvolvimento de menisco e movimentação de um líquido em um tubo capilar (adaptado MORTIMER, 2008).	28
Figura 2.15 - À esquerda, dispositivo de medida unidirecional e horizontal, desenvolvido por Jensen e Hansen (2001b). À direita, detalhe do tubo corrugado com o qual é possível realizar medições diretamente após a moldagem da amostra.....	31
Figura 2.16 – Dilatômetro. Aparato utilizado na medida linear da retração autógena, em tubos corrugados (LURA et al., 2006)	31

Figura 2.17 - Esquema para determinação da retração autógena (modificado SILVA, 2007).	34
Figura 2.18 - Distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento, em função do grau de hidratação (α), aplica-se para um sistema fechado, ou seja, sem troca de água com o meio ambiente. Em: a) Para uma relação $a/c=0,60$: devido à elevada relação $a/c (>0,42)$, a completa hidratação do cimento $\alpha=1$ pode ser teoricamente obtida, b) Para uma relação $a/c = 0,3$: devido à baixa relação $a/c (<0,42)$, a completa hidratação do cimento $\alpha=1$ não é possível, estando limitada a um grau máximo de hidratação (JENSEN e HANSEN, 2001a, modificado).....	37
Figura 2.19 – Distribuição volumétrica de fases da pasta de cimento em função do grau de hidratação (α), num sistema fechado e para uma relação a/c de $0,30+0,05$. O diagrama pode ser aplicável para a hidratação com suprimento externo, cura externa num sistema aberto, ou externo, cura interna com água incorporada (adaptado, JENSEN e HANSEN, 2001).....	40
Figura 2.20 – Com base nas (Eq. 8) e (Eq. 9), o gráfico expressa o mínimo necessário de água para cura interna, para obter α_{maxe} , assim, prevenir a autosecagem. (Apadaptado: JENSEN e HANSEN, 2001a).....	40
Figura 2.21 - Morfologia das partículas de PSA por microscópio óptico (YAO et al. 2011)..	42
Figura 2.22 - Amostras de polímeros superabsorventes, secos e saturados, acima e abaixo respectivamente (TRAMFLOC, 2012).....	43
Figura 2.23 – Estrutura da poliacrilamida e do poliacrilato de Sódio, onde “H”, “C”, “O”, “N” e “Na” representam, átomos de Hidrogênio, Carbono, Oxigênio, Nitrogênio e Sódio, respectivamente (MARCONATO e FRANCHETTI, 2002)	43
Figura 2.24 – Representação de uma partícula de PSA , a base de ácido policríamida, seca e inchada, após absorção de água (FRIEDRICH, 2012)	45
Figura 2.25 - Retração Autógena em misturas contendo diferentes teores de PSA e $a/c=0,22$ (modificado MECHTCHERINE et al, 2009)	46
Figura 2.26 – Influencia do PSA na retração autógena (PIÉRARD et al. 2006).....	47
Figura 2.27 – Retração autógena da pasta de concreto para misturas com diferentes quantidades de PSA (0%, 0,35% e 0,70%) (adaptado de IGARASHI E WATANABE, 2006).....	48
Figura 2.28 – Retração autógena em concretos para misturas PSA (0%, 0,35% e 0,70%) (adaptado de IGARASHI E WATANABE, 2006).....	48
Figura 2.29 - Resistência à compressão das argamassas de referência e argamassas modificados com PSA e água para cura interna (modificado SCHRÖFL, et al., 2012)	50

Figura 2.30 - Desenvolvimento da porosidade em função da composição do concreto de alta resistência e da idade. (MECHTCHERINE et al.,2009).....	52
Figura 2.31 - Slump teste de argamassas com 0,3% e PSA ajustada a relação a/c como uma medida para compensar a perda da trabalhabilidade devido à capacidade de absorção de água dos polímeros (Espalhamento medido a partir do cone Hägermann, desvio ± 1 cm) (SCHRÖFL, et al., 2012).....	53
Figura 3.1 - Organograma dos microconcretos	56
Figura 3.2 - Visão geral do programa experimental.....	57
Figura 3.3 – Granulometria do cimento usando granulômetro a laser	60
Figura 3.4 – Granulometria da sílica ativa usando granulômetro a laser	62
Figura 3.5 – Distribuição granulométrica da areia natural de rio.....	64
Figura 3.6 – Distribuição do polímero superabsorvente – PSA	65
Figura 3.7– Polímero superabsorvente (a) Seco, (b) molhado (com aumento de 40x).....	66
Figura 3.8 - (a) Moldagem, (b) Retirada do tronco de cone, (c) Determinação do espalhamento	69
Figura 3.9 - Esquema do ensaio para determinação do tempo zero através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (modificado Rodrigues, 2009)	70
Figura 3.10- (a) Calibração dos transdutores, (b) Vista dos transdutores acoplados ao corpo-de-prova, (c) realização das leituras.....	71
Figura 3.11 – Pesagem do recipiente de volume conhecido para a determinação da densidade dos microconcretos	72
Figura 3.12 - (a) Posicionamento do pino nas faces da forma. (b) Pino Metálico e Folha de poliestireno (c) Medição para determinação da distancia G.....	72
Figura 3.13 - Esquema da metodologia utilizada neste trabalho para a determinação da retração autógena (modificado SILVA, 2007)	73
Figura 3.14 - (a) Preenchimento das formas metálicas (b) Adensamento na mesa vibratória (c) Formas prontas para envolvimento com filme plástico	73
Figura 3.15 - (a) Posicionamento do extensômetro (b) Detalhe da ligação entre extensômetros e pinos metálicos	74
Figura 3.16 - Ensaio retração autógena	74
Figura 3.17 – Ensaio de resistência à compressão: a) ensaio, b) ruptura e c) corpo-de-prova depois da ruptura	75
Figura 3.18– Ensaio de resistência à compressão dos cubos: a) ensaio e b) corpos-de-prova depois da ruptura	76

Figura 3.19 – Ensaio de resistência à tração na flexão: a) ensaio e b) ruptura.....	77
Figura 3.20 - (a) Secagem na estufa dos corpos-de-prova (b) Corpos-de-prova com a lâmina de água de aprox. 5 mm (c) Pesagens dos corpos-de-prova.....	78
Figura 3.21 - (a) Corpos de provas imerso em 1/3 de seu volume (b) Corpos de prova imerso totalmente (c) Pesagens dos corpos-de-prova.....	78
Figura 4.1– Diâmetro médio de espalhamento dos microconcretos.....	79
Figura 4.2 – Aspecto dos microconcretos depois da mistura: (a) microconcreto PSA_0,3, (b) espalhamento do microconcreto PSA_0,3, (c) microconcreto REF_0,5 e (d) espalhamento do microconcreto REF_0,5.....	81
Figura 4.3- Velocidade de propagação x tempo dos traços REF 1, PSA_0,3, PSA_0,4 e PSA_0,6 (Claro e Saraiva, 2013)	83
Figura 4.4 – Velocidade de propagação x tempo dos traços REF 1, ARR_1 e ARR_2 (Claro e Saraiva, 2013).....	84
Figura 4.5 – REF 1 e REF 2 (Claro e Saraiva, 2013).....	84
Figura 4.6 – Resultados individuais de retração autógena determinada desde o tempo t ₀ (usando a técnica do ultrassom) até a idade de 28 dias: (a) REF 1, (b) PSA _0,3 , (c) PSA _0,4 e (d) PSA _0,6	88
Figura 4.7 – Resultados individuais de retração autógena determinada desde o tempo t ₀ (usando a técnica do ultrassom) até a idade de 28 dias: (a) REF 1, (b) ARR_1, (c) ARR _2 e (d) REF 2	89
Figura 4.8 – Resultados médios da evolução da retração autógena dos microconcretos a partir tempo zero (t ₀) até a idade de 28 dias, em corpos-de-prova prismáticos de 75mm x 75mm x 285mm, selado	92
Figura 4.9 – Variação da retração autógena das misturas em relação à de referência em diversas idades: (a) traços com PSA, (b) traços com ARR e (c) traço com relação a/c =0,5 (REF 2).....	96
Figura 4.10 - Efeito do teor de PSA e ARR na resistência à compressão dos cubos	100
Figura 4.11 - Efeito do teor de PSA e ARR na resistência à compressão dos cilindros	104
Figura 4.12 – Efeito do teor de PSA e ARR na resistência à tração na flexão.....	107
Figura 4.13 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo dos microconcretos.....	109
Figura 4.14 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo dos microconcretos de referência.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Tipos de retração (adaptado de Batas, 2001).	16
Tabela 2.2 - Resistência à compressão do concreto de referencia contendo diferentes teores de PSA. (adaptado PIÉRARD et al. 2006)	50
Tabela 2.3 - Resistência à compressão do concreto de referencia contendo diferentes teores de PSA. (modificado CRAEYE E DE SCHUTTER, 2006).....	50
Tabela 3.1- – Nomenclatura dos microconcretos	55
Tabela 3.2- Caracterização física e mecânica do cimento realizada nos Laboratórios da Universidade de Brasília (LEM)	60
Tabela 3.3 – Caracterização química do cimento realizada nos Laboratórios de FURNAS	61
Tabela 3.4 – Propriedades físicas da sílica ativa	62
Tabela 3.5 – Características químicas da sílica ativa realizadas nos Laboratórios de FURNAS	63
Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.....	64
Tabela 3.7 – Caracterização dos aditivos	65
Tabela 3.8 – Composição do microconcreto de referência	66
Tabela 3.9 - Roteiro para mistura do microconcreto	67
Tabela 3.10 – Relação a/c e $(a/c)_i$ dos microconcretos com PSA	68
Tabela 4.1 – Resultados do tempo obtido para estabelecimento do patamar de percolação.	83
Tabela 4.2– Massa específica dos microconcretos testados	86
Tabela 4.3 – Perda de massa dos microconcretos antes e depois do ensaio.....	87
Tabela 4.4 – Resultados médios de deformação autógena dos microconcretos e redução da retração autógena em relação ao traço de referência, em diversas idades.....	93
Tabela 4.5 – Resistência à compressão e respectivo coeficiente de variação e porcentagem da redução devido ao PSA e ARR.....	100
Tabela 4.6- Resistência à compressão nos cilindros e respectivo coeficiente de variação e porcentagem da redução	103
Tabela 4.7 – Resistência à tração na flexão e respectivo coeficiente de variação e porcentagem da redução devido ao PSA e ARR	106
Tabela 4.8 – Resultados médios do coeficiente de absorção por capilaridade dos microconcretos.....	108
Tabela 4.9– Resultados médios de absorção por imersão dos microconcretos.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARR	Aditivo Redutor de Retração
CAR	Concreto de Alta Resistência
CP	Corpo-de-prova
CP V - ARI	Cimento Portland DE Alta Resistência Inicial
CV	Coeficiente de Variação
JCI	Instituto Japonês do Concreto
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais
NBR	Norma Brasileira Registrada no INMETRO
PSA	Polímero Superabsorvente
PTM	Saturated Lightweight Aggregate
SAP	Super Absorbent Polymer
SRA	Shrinkage Reducing Admixture
UnB	Universidade de Brasília
UR	Umidade Relativa

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔL	deformação relativa de comprimento
α	grau de hidratação do cimento (kg de cimento hidratado/kg de cimento anidro)
α_{max}	grau máximo de hidratação
ε	deformação
a/c	relação água/cimento
(a/c) _c	água incorporada
(a/c) _i	Relação de água/cimento para cura interna
F _f	carga aplicada verticalmente no centro do prisma
G	comprimento inicial entre as extremidades internas dos pinos metálicos
L	comprimento do corpo-de-prova no instante da medida
L ₀	comprimento inicial do molde
kg	quilograma
m	metros
MPa	mega pascal
p	porosidade inicial
R _f	resistência à tração na flexão
t ₀	tempo zero
V _{cs}	volume de retração química (m ³)
V _{cw}	volume de água capilar (m ³)
V _{ew,0}	volume de água incorporada
V _{gw}	volume de água de gel [m ³]
V _{gs}	volume de sólidos de gel (m ³)
V _{uc}	volume de cimento anidro (m ³)
X _{0a} , X _{0b}	leituras iniciais nos extensômetros
X _{ia} , X _{ib}	leituras iniciais nos extensômetros horizontais no tempo i

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - IMPORTÂNCIA DO TEMA

Concretos com valores de resistência acima dos usuais em um dado local e época são comumente chamados Concretos de Alta Resistência (CAR) (AMARAL FILHO, 1992). No Brasil, a norma ABNT NBR 8953/2009 classifica os concretos estruturais em dois grupos de resistência: Grupo I (resistência característica à compressão de 20 MPa – 50 MPa) e Grupo II (resistência característica à compressão de 60 MPa a 100 MPa).

O CAR talvez seja uma representação da evolução da tecnologia do concreto e, na atualidade, vem sendo cada vez mais utilizado, devido às diversas qualidades que possui. Dentro das qualidades mais importantes desse concreto pode-se citar: altas resistências mecânicas à baixas idades, baixa segregação, ausência de exsudação, baixa permeabilidade, alta resistência aos ataques de cloretos e de sulfatos, alta resistência à abrasão, excelente aderência à outra superfície de concreto e quase o dobro da aderência concreto-aço em relação ao concreto de resistência usual (AMARAL FILHO, 1992).

Para obter tais vantagens, são utilizadas adições minerais usualmente a sílica ativa, altos consumos de cimento, aditivos químicos superplastificantes e baixas relações água/cimento, o que confere uma microestrutura mais delgada e fina (refinamento dos poros), comparada aos concretos de resistência usuais.

Entretanto, o CAR pode sofrer elevada retração autógena, que é definida como uma deformação que ocorre num sistema fechado, isotérmico e mesmo sem ação de forças externas (KOVLER e JENSEN, 2007). A retração autógena é inerente ao processo de hidratação do cimento e pode conduzir a uma diminuição considerável de volume, podendo causar fissuração no material.

A retração autógena tem sido registrada e descrita durante um século, mas a partir da década 90, tem tido uma maior atenção devido à importância dentro do concreto de alta resistência. Diversas pesquisas relacionadas ao tema levaram a um melhor entendimento da dinâmica da retração, no que concerne aos fenômenos que a regem.

Várias são as medidas adotadas para a redução do fenômeno da retração autógena. Os métodos convencionais na cura do concreto não contribuem significativamente para combatê-la, mesmo se for aplicada uma molhagem intensiva. As microestruturas do concreto de alta resistência são, em idade precoces, muito densas o que não permitem um transporte suficiente e rápido da água de cura para o interior dos elementos de concreto (MECHTCHERINE, DUDZIAK *et al.*, 2009). Se não há água disponível para preencher os poros capilares, pode resultar em retração autógena expressiva. Tem sido proposta a utilização de cura interna, com a adição de materiais com alta capacidade de armazenamento de água à mistura para fornecer água ao sistema à medida que a umidade interna do material diminui. Desde os anos 90, várias estratégias para mitigar a retração autógena no concreto de alta resistência foram feitas, como a adição de agregados saturados leves, uso de cimentos expansivos, adição de fibras, uso de aditivos químicos redutores de retração e a utilização de polímeros superabsorventes (JENSEN e HANSEN, 2002; KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006; KOVLER e JENSEN 2007; SILVA, 2007; CUSSON E HOOGEVEEN, 2008).

A proposta de utilização de polímeros superabsorventes (Super Absorbent Polymer - SAP) é a mais recente e parece ser a mais apropriada como aditivo de água-regulador. Segundo Mechtcherine, Dudziak *et al.* (2009), estes polímeros consistem em cadeias de ligação cruzada que têm grupos funcionais iônicos que facilitam a absorção de grandes quantidades de água e com capacidade de fornecer água aos capilares com o avanço da hidratação, com o intuito de reduzir a retração autógena. Após o trabalho pioneiro de Jensen e Hansen (2002), diversos pesquisadores testaram vários tipos de PSA e demonstraram que alguns possuíam uma capacidade muito pronunciada para mitigar a retração autógena do concreto de alta resistência dentre eles Mechtcherine *et al.* (2013), Claro e Saraiva (2013), Pereira e Matos (2012), Lura *et al.* (2006), Mechtcherine *et al.* (2006).

O uso de aditivo químico redutor de retração é outra alternativa para reduzir a retração autógena a níveis aceitáveis. O ARR embora já tenha sido introduzido no mercado de alguns países, recentemente, ainda não está disponível comercialmente no Brasil.

O ARR é um aditivo químico não-iônico capaz de reduzir a tensão superficial da água nos poros com diâmetro de aproximadamente de 5nm a 50nm (RIXOM e MAILVAGANAM,

2009). A redução da tensão superficial causa diminuição na intensidade da depressão capilar, causada pela formação de água nos menisco dos poros capilares, com consequente redução na deformação por retração. A primeira aplicação e a maneira mais convencional do uso do ARR foi para reduzir a retração por secagem (BENTZ e HANSEN, 2004). A redução da magnitude da retração por secagem é dependente da relação a/c do concreto. Geralmente, quanto menor esta relação, maior a porcentagem de redução obtida.

O mecanismo de retração por secagem é semelhante ao mecanismo da retração autógena, dentro dos domínios de umidade relativa correspondentes. O fenômeno físico que se desenvolve dentro do material cimentício é o mesmo: o surgimento de menisco dentro dos capilares, resultando em tensões de tração.

Diversos autores entre eles Gettu *et al.* (2001), Silva (2007) e Lopes (2011) estudaram o comportamento do concreto de alta resistência (CAR) com distintas classes de resistência à compressão, na presença do produto ARR para mitigar a retração autógena, inicialmente desenvolvido para reduzir retração por secagem. Os resultados experimentais mostraram que o ARR é um produto bastante promissor, pois reduziu com eficácia a retração autógena sem causar consequências adversas ao concreto quanto às propriedades reológicas, mecânicas, elásticas, térmicas e de durabilidade investigadas.

Diferentes pesquisas levam a crer que o problema de retração autógena pode ter um combate eficiente. As estratégias mitigadoras que existem até agora, apresentam diferentes métodos para reduzir a retração autógena. No entanto, com relação ao polímero superabsorvente - PSA, ainda faltam informações sobre a dosagem ótima dos polímeros no concreto, o teor de água para cura interna na presença de PSA e os efeitos nas propriedades mecânicas, elásticas, térmicas e na microestrutura desses materiais. Com relação ao ARR, embora esta estratégia tenha sido investigada mais profundamente na literatura técnica, é estudada nesta pesquisa para comparar com a técnica de cura interna usando PSA.

O presente trabalho está inserido na linha de pesquisa “Sistemas Construtivos e Desempenho de Materiais e Componentes”, do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC/UnB), abordando a influência do

polímero superabsorvente e do aditivo redutor de retração como agentes mitigadores de retração autógena em concretos de alta resistência.

Diversas têm sido as pesquisas realizadas sobre o concreto no Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília. Silva (1997) estudou as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho, com o intuito de conhecer melhor o comportamento desse concreto, usá-lo com mais segurança onde ele for mais apropriado, fornecendo informações que podem contribuir com as normas nacionais em vigor. Lopes (1999) também estudou as propriedades mecânicas em concretos de alto desempenho, fazendo uma avaliação comparativa desses concretos com a adição de sílica ativa.

Vasconcelos (1997), Teixeira (1998), Maia (2003), Silva (2005), Costa Filho (2005) e Santos (2006), ao analisarem a corrosão das armaduras no concreto e nas argamassas, estudaram uma grande variedade de materiais existentes para prevenir e deter o problema ocasionado por este fenômeno.

Oliveira (2001) estudou e analisou o comportamento de diversos materiais disponíveis no mercado para execução de juntas de reparo através de análises de parâmetros eletroquímicos, submetendo a interface entre o reparo e o substrato de concreto à penetração de cloreto. Ramos (2005) avaliou a influência das elevadas temperaturas em concretos empregados em revestimento de túneis, buscando no seu trabalho a influência do emprego de fibras de polipropileno juntamente com dois tipos de amadura (com tela e fibra metálica).

Rodolho (2007) e Santos (2008) pesquisaram a influência da areia britada no concreto, contribuindo a um entendimento do comportamento do concreto fresco, contendo dita areia em substituição à areia natural. Pereira (2008), visando contribuir para o controle tecnológico do concreto, estudou dados reais de resistências, discutindo parâmetros e critérios de estimação da resistência característica e os procedimentos de aceitação ou rejeição da mesma.

Rodrigues (2010) estudou o comportamento de concretos nas baixas idades, frente ao desenvolvimento de deformações devidas à retração e à fluência, contribuindo para um

melhor entendimento destes fenômenos e seus mecanismos de atuação. Leal (2012) estudou o módulo de elasticidade de concretos produzidos em Brasília.

Joffily (2010) e Palacios (2012) estudaram e avaliaram o emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos para a determinação da resistência à compressão do concreto, verificando dispersões que podem afetar os resultados dos ensaios.

Com base no exposto, percebe-se a importância dos estudos referentes ao concreto e a influência dos materiais que o compõem, visando melhoras na produção e desempenho das estruturas de concreto.

1.2 – OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

Analisar a eficácia de duas soluções mitigadoras na redução da retração autógena, em microconcretos de alta resistência, em relação à mistura de referência e também em relação a um microconcreto com resistência convencional.

1.2.1 - Objetivos específicos

- ✓ Implementar a metodologia para determinação da retração autógena no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB).
- ✓ Determinar o tempo zero (transição fluido – sólido) no aparelho de ultrassom para balizar o início da determinação da retração autógena.
- ✓ Investigar em microconcretos de alta resistência, em relação à mistura de referência:
 - O efeito do uso do polímero superabsorvente (PSA), que age por um mecanismo de cura interna, na mitigação da retração autógena.
 - O efeito do uso do aditivo redutor de retração (ARR), que age por um processo químico, na mitigação da retração autógena.

- A influência do polímero superabsorvente e do aditivo redutor de retração nas propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência a tração na flexão) e nas propriedades relacionadas à durabilidade (absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão).
- ✓ Comparar os resultados de retração autógena, propriedades mecânicas e de durabilidade dessa pesquisa com o determinado microconcreto com resistência convencional.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - CONCEITOS DE PEGA E ENDURECIMENTO

A passagem do concreto de estado fluido para um estado sólido pode ser considerado como pega ou enrijecimento da pasta. Segundo Metha e Monteiro (2008) esse enrijecimento é causado pela perda gradual da água livre devido às reações de hidratação, à adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade e à evaporação. O início de pega marca o tempo em que a pasta se torna não trabalhável. Conseqüentemente, o lançamento, a compactação e o acabamento do concreto, após este estágio, tornam-se difíceis. A pasta não se solidifica repentinamente, necessitando de um tempo razoável para se tornar totalmente rígida. O tempo necessário para solidificar completamente marca o tempo de fim de pega, e não deverá ser longo, para assim permitir, o quanto antes, a retomada das atividades construtivas, após o lançamento do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008) (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Representação dos estágios desde a mistura do cimento e a mistura com água, passando pelos tempos de pega e endurecimento

Existem diferentes metodologias para determinar a pega e o endurecimento do concreto, mas são determinações arbitrárias por não ter um procedimento e terminologia padrão (WEISS, 2002; SILVA *et al.* 2011). Dentre os métodos usados para estimar a pega dos materiais cimentícios, encontram-se: a penetração da agulha, medidas ultrassônicas, emissão acústica, variação da pressão hidráulica e evolução da taxa de temperatura. Para o estudo da retração autógena, que é de interesse neste trabalho, é necessária uma determinação precisa desta transição devido ao fato que antes deste tempo o que acontece é

uma contração e não uma retração, onde o concreto se comporta como um fluido. Essa contração é denominada contração Le Chatelier que será explicada mais adiante.

O termo pega, é o início da rigidez, que constitui o passo inicial para a transformação gradual de pasta de cimento ou do concreto de um estado fresco a um estado sólido. A pega é geralmente medida pela resistência à penetração utilizando o aparelho de Vicat, que mede a resistência de uma pasta de cimento à penetração de uma agulha, com massa padrão. O concreto não pode ser manuseado ou moldado no início da pega e, no final de pega, ele começa a desenvolver a sua resistência. Os níveis de penetração correspondentes ao início e fim de pega são totalmente arbitrários, pois os ensaios existentes, não fornecem conhecimentos fundamentais sobre os processos químicos e microestruturais relacionados (STRUBLE e LEI, 1995; WEISS, 2002; SILVA *et al.* 2011).

Porém, é de suma importância entender os processos químicos (hidratação) e físicos (microestrutura) que podem sofrer as argamassas e concretos e as mudanças que se encontram associadas à pega. Ainda não existe nenhuma evidência experimental indicando uma conexão entre a pega e as reações de hidratação, em parte porque o que é entendido por pega ainda é considerado um parâmetro empírico (STRUBLE e LEI, 1995).

O processo de endurecimento da pasta de cimento pode ser dividido em três períodos definidos conforme se segue:

a. *Ante-pega:* nessa fase o contato do cimento com a água ocasiona o fenômeno de floculação. Esse fenômeno acontece pois em meio líquido polar como a água as partículas do cimento que se encontram positiva e negativamente carregadas interagem em suas superfícies e tendem a formar flocos, flocular. Existem dois comportamentos que são gerados devido à formação de flocos estáveis na pasta de cimento, por um lado, o impedimento de uma dispersão uniforme das partículas dentro da mistura e, por outro lado, o aprisionamento de certa quantidade de água no interior dos flocos. É assim como nesta fase, o concreto se mostra como uma suspensão de grãos diversos (fase granular) num líquido visco-plástico (pasta de cimento) que vai evoluindo até formar um esqueleto rígido. É importante lembrar que a água que fica aprisionada nos flocos não está mais disponível para lubrificar a mistura, por tanto, para obter um concreto trabalhável é necessário

adicionar muito mais água do que aquela necessária para hidratar os grãos de cimento (SILVOSO, 2003).

Diferentes fenômenos se apresentam durante este período nas pastas e concretos, como a segregação e a exsudação. O primeiro pode ser definido como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, gerando assim uma distribuição não-uniforme destes constituintes em um dado volume. O segundo fenômeno é uma forma de segregação que é originada quando uma parte da água que se encontra na pasta de cimento é separada desta sob o efeito da sedimentação dos grãos de cimento e dos finos da fase granular (SILVOSO, 2003).

Durante a ante pega, ocorre o início de outro fenômeno chamado contração *Le Chatelier*, onde existe uma diminuição do volume absoluto total da mistura em relação ao volume dos constituintes. Desta forma, o volume de hidratos é inferior à soma dos volumes iniciais de cimentos anidros e de água. Após a pega, o esqueleto que se forma se opõe à contração por conta de sua crescente rigidez mecânica, resultando uma contração inferior àquela observada antes da pega.

b. *A pega*: para o cimento normal, o início da pega é geralmente atribuído à formação de etringita e de C-S-H (CHEN e ODLER, 1992), nesta fase, a camada nanocristalina de C-S-H recém-formada se rompe, dando lugar à precipitação de cal hidratada e a um C-S-H fibroso secundário; a camada de hidratos que se encontra crescendo na periferia dos grãos isolados rompe a conexão da fase líquida por aglomeração destes grãos até formar uma primeira rede de partículas conectadas (RODRIGUES, 2010). Acker (1998) *apud* Silva (2007) descreve o processo pela teoria da percolação (Figura 2.2) que será explicada mais adiante. Assim sendo, a pega de cimento representa uma etapa importante sob o ponto de vista mecânico pois, nesse momento, é gerada uma determinada rigidez no material conferindo propriedades mecânicas que até então não existiam à pasta de cimento ou ao concreto. Portanto, é nessa etapa onde os fenômenos de retração que dizem respeito a um esqueleto sólido, devem ser considerados devido à possibilidade do material fissurar.

Ainda, é importante ressaltar que a estrutura do esqueleto rígido (rede porosa) no momento da pega, e o tempo da pega da pasta de cimento são bastante influenciados por diversos

fatores como período da ante- pega, relação água/cimento, natureza e finura do cimento, temperatura e a presença de aditivos minerais e químicos (SILVOSO, 2003).

c. Pós-pega ou fase de endurecimento: neste período as reações de hidratação avançam de uma forma mais lenta, onde se apresentam uma evolução das propriedades mecânicas e se produzem outros fenômenos como a retração autógena e a retração de secagem que vão depender também da estrutura do meio poroso. Segundo Boivin (2001) *apud* Rodrigues (2010), sob o ponto de vista mecânico, o prosseguimento das reações de hidratação ao longo do período conhecido como pós-pega tem duas consequências principais: (i) o desenvolvimento da fase sólida, que se traduz pela redução da porosidade da pasta e (ii) a diminuição do teor de água, ocasionando a redução da fase líquida no espaço dos poros, gerando o fenômeno da autodessecação.

Na figura 2.2, apresenta-se a evolução do processo de endurecimento do concreto por médio da avaliação da liberação de calor à medida que o sistema se hidrata.

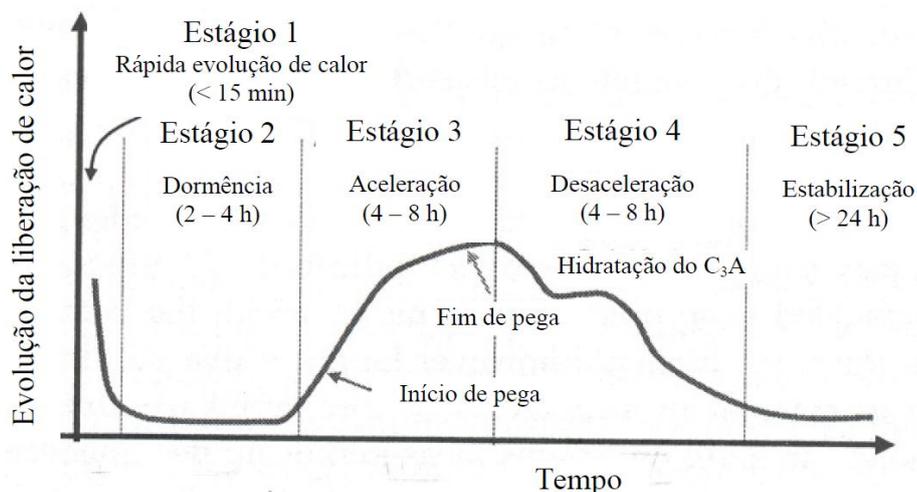


Figura 2.2 - Gráfico representativo da evolução da taxa de calor de uma pasta de cimento, durante processo de hidratação (MINDESS e YOUNG, 1981)

Para este estudo em especial, a teoria do patamar de percolação é adotada como o estabelecimento da pega do cimento e como ponto de início para a determinação da retração autógena.

2.2 -TEMPO ZERO (T_0)/PATAMAR DE PERCOLAÇÃO

Para Bentur (2002) apud Silva (2007), o tempo de transição de fluido para sólido, denominado neste trabalho tempo zero (t_0), acontece aproximadamente no tempo de pega. Segundo Silva (2007), o patamar de percolação ou tempo zero (t_0) é a duração desde o instante onde a água entra em contato com o cimento até o instante em que o concreto desenvolve uma estrutura que permita a transferência de tensões de tração através do concreto.

A hidratação do cimento e a descrição do fenômeno da pega está simulado pela teoria da percolação de Acker (1988) apud Silva (2007). No estado fresco, reações de hidratação formam sólidos que surgem quando os grãos sólidos de cimento começam a ter contato entre si de maneira aleatoriamente na suspensão. A continuação dessas reações geram novos sólidos que se ligam a outros formando amas (subconjuntos contínuos de grãos ligados mecanicamente). O patamar de percolação então, é o primeiro caminho contínuo de grãos que atravessa o conjunto (Figura 2.3).

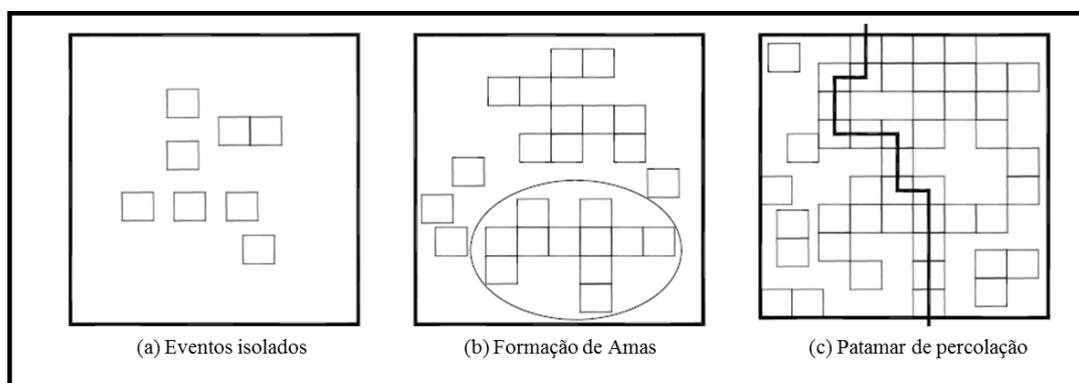


Figura 2.3 - Esquema representativo das noções da teoria da percolação Segundo Acker (1988), adaptado por Silva (2007)

Como já foi mencionado anteriormente, neste trabalho é muito importante determinar o tempo zero (t_0) dos microconcretos a ser analisados para obter assim leituras de retração dentro do tempo onde a retração autógena está acontecendo. Existem diferentes métodos os quais são utilizados para estimar a pega dos materiais cimentícios, como o método da penetração mecânica seguindo as especificações da NM 65 (ABNT, 2002) e pela ASTM C 403 (ASTM, 2008), o método da evolução da taxa de temperatura, métodos baseados em emissão acústica, métodos utilizando técnicas de determinação da condutividade e

resistividade elétrica e o método da velocidade de pulso ultrassônico. Portanto, dos diferentes métodos existentes atualmente, nesta pesquisa se escolheu o método de medidas ultrassônicas para a sua determinação, pois é um método que por meio de ondas poderia determinar o patamar de percolação e o caminho contínuo de grãos que atravessam o conjunto (Teoria da percolação segundo Acker 1998).

Reinhardt e Grosse (2003) investigaram o possível uso do ensaio de ultrassom para monitorar o início de pega e o endurecimento de um concreto projetado. O aparelho para a determinação da pega por pulso ultrassônico aplicado na sua pesquisa foi o FreshCon (Figura 2.4). Os autores determinaram a pega de argamassas monitorada por um sistema computadorizado por ondas ultrassônicas.

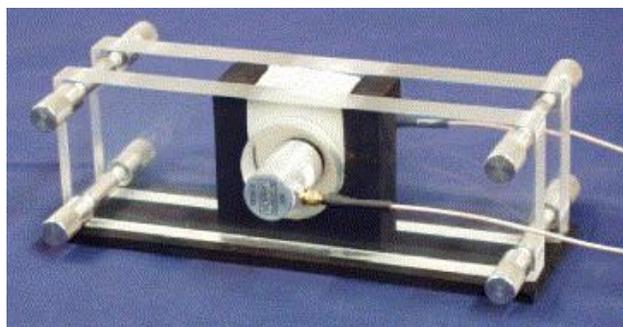


Figura 2.4 - Vista do dispositivo FreshCon para determinação da pega usando pulso ultrassônico (BEILIE, 2005)

A argamassa é colocada num molde de esponja de borracha, em formato de “U”, com um volume de aproximadamente 45 cm³. O receptor e o transmissor são inseridos nas paredes do molde, de tal modo que uma pequena quantidade de material permanece entre os transdutores e a argamassa. Uma vez que o molde é preenchido com argamassa e adensado numa mesa vibratória, os transdutores são ligados ao hardware que guarda automaticamente as medições de velocidade de onda, frequência e energia.

A Figura 2.5 mostra as curvas de velocidade do pulso ultrassônico versus idade, das três argamassas utilizadas na pesquisa, com relação de a/c diferentes (0,5, 0,55 e 0,60) utilizando o aparato FreshCon.

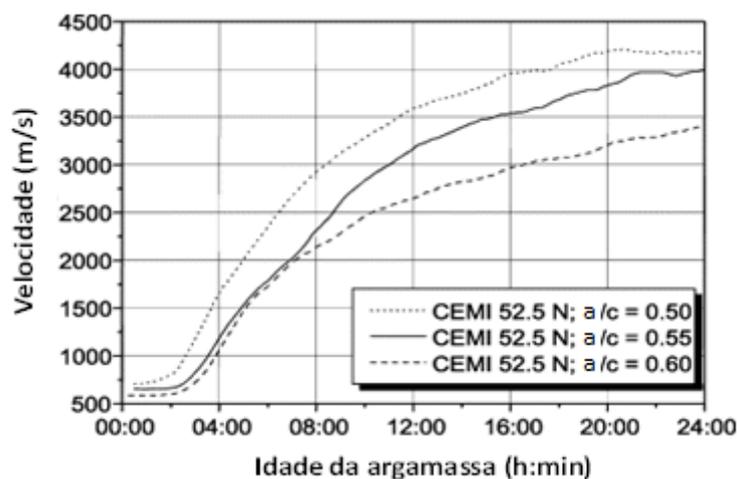


Figura 2.5 Curva velocidade do pulso ultrassônico versus idade da argamassa (REINHARDT e GROSSE, 2003)

Os autores consideram que o patamar de percolação (t_0) acontece no instante em que ocorre uma mudança brusca na velocidade de propagação de onda, este corresponde a aproximadamente 2h nas três argamassas. O método poderá ser ajustado para concretos assim como para outros materiais, gesso e cal, podendo também ser utilizado para controle de qualidade na produção de misturas e ligantes novos e no controle de início de pega da produção de concreto.

Segundo Trtnik *et al.* (2008), os diferentes métodos existentes para a determinação do endurecimento das pastas de cimento nas idades iniciais, como a agulha de Vicat e “Resistência a penetração” não permitiam uma medição contínua do processo, pois não eram baseados em parâmetros totalmente mecânicos do material. Na atualidade, diversos são os avanços na medição e na tecnologia para monitorar o processo de endurecimento da pasta de cimento, e alguns destes são totalmente não destrutivos, o que os torna mais vantajosos quando comparados aos métodos mais clássicos. Exemplos dessas novas tecnologias são os métodos de reflexão de ondas, métodos de emissão de frequência acústica, técnicas de adsorção de medição de condutividade e resistência do material a ser testado e o método de ultrassom.

Diferentes tentativas foram feitas para a determinação do patamar de percolação/tempo zero em materiais à base de cimento, Trtnik (2008) testou diferentes pastas de cimento para determinar o tempo de início de endurecimento, onde verificou que por meio de ensaios de

ultrassom, o tempo zero pode ser estimado de forma muito precisa no momento em que o ponto de inflexão aparece pela primeira vez na curva de ultrassom “velocidade X tempo”. Zhang *et al.* (2009) realizou ensaios para estudar o início da hidratação de materiais de cimento em argamassas de ultra-alto desempenho com misturas de diversos minerais. Os resultados mostram que três estágios podem ser identificados durante o processo de formação da microestrutura Figura 2.5.

Três misturas de cimento com as mesmas composições foram testadas utilizando o aparelho de ultrassom, gerando assim um gráfico de velocidade de propagação de onda ao longo do tempo explicando os três estágios em que pode identificar o tempo zero (t_0) e observar o ponto de inflexão que Trtnik faz referência (Figura 2.6).

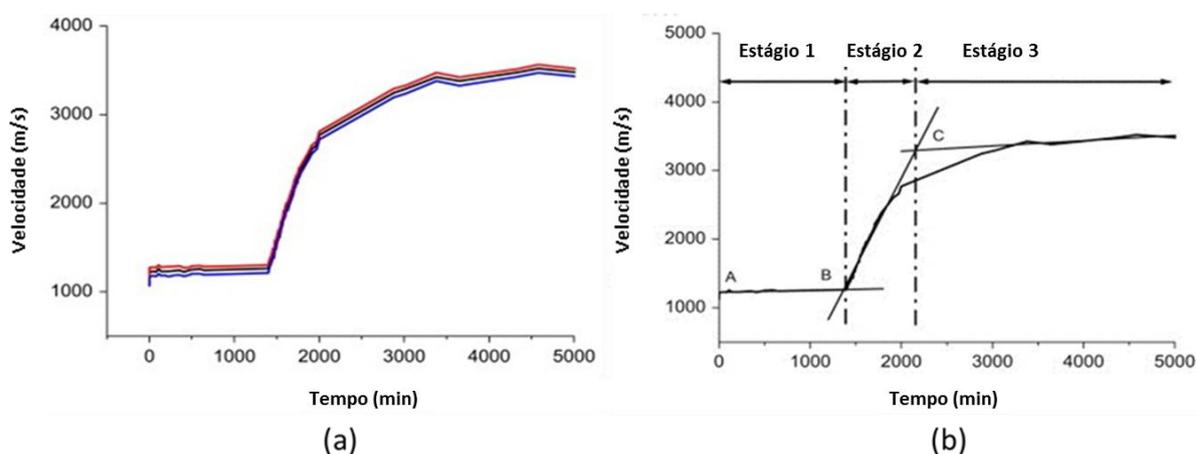


Figura 2.6 - a) Velocidade de propagação da onda pela idade do corpo-de-prova para três tentativas e b) Representação esquemática da evolução do ensaio de ultrassom (ZHANG *et al.*, 2009, modificado)

Zhang *et al.* (2009) explica que a Figura 2.6b. ilustra a curva típica do tempo vs velocidade de onda para os materiais de cimento, em que inicialmente, pode-se notar que a velocidade ultrassônica vai aumentando numa taxa muito lenta desde o ponto de partida (A) para um ponto de inflexão (B). O ponto B tem uma inclinação mais acentuada. Após o ponto B, a curva começa alterar a sua inclinação e sobe rapidamente para uma curva sobre o ponto C. Depois do ponto C, o aumento da taxa de velocidade das ondas ultrassônicas torna-se gradualmente mais lento, e a curva quase se estabiliza em idades posteriores.

2.3 - VARIAÇÕES DIMENSIONAIS NAS BAIXAS IDADES DO CONCRETO

As variações volumétricas que sofrem os concretos podem ser consequência das reações químicas de hidratação da pasta de cimento, as quais acontecem desde o início da sua preparação, ou seja, desde que o material é misturado até chegar ao seu endurecimento. Além dessa causa, tais variações dimensionais podem ser ocasionadas por diferentes razões, como a perda ou absorção de umidade com o ambiente externo, variação da temperatura ou como resultado da aplicação de carga.

O concreto, independentemente da sua composição, está submetido a variações dimensionais ao longo do tempo sofrendo reduções de volume, denominadas retrações, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Estas retrações estão associadas com a fissuração que sofrem os materiais cimentícios, pois sempre existe o risco dessas fissuras acontecerem, independentemente da intensidade da retração. Há diferentes tipos de retrações, as quais acontecem em tempo e magnitude particulares, dependendo de diversos fatores, portanto, é muito importante conhecer o tipo de retração para compreender a melhor forma de combatê-la de modo a prevenir o aparecimento de fissuras que sejam prejudiciais à estrutura.

2.3.1 – Classificação e terminologia da retração utilizada nesta pesquisa

O efeito físico da retração se deve principalmente pela perda de água devido à secagem ou à autodessecação, mas está associado também a uma contração volumétrica da pasta de cimento, decorrente de fenômenos de diferentes naturezas (RODRIGUEZ, 2010). A retração do concreto devido à perda de água para o ambiente (retração por secagem) é uma causa bem conhecida de fissuração tanto no estado plástico como no estado endurecido (MEJLHEDE, 2008).

Segundo Kumm (2009), independentemente das proporções de traço, tipo de cura empregado, tipo de cimento Portland utilizado, os concretos estão submetidos às variações volumétricas (retração) ao longo do tempo, seja por fenômenos físicos ou químicos. As variações volumétricas podem originar fissuras, dada a intensidade das tensões criadas internamente quando o concreto encontra-se restringido. Segundo Hasparyk *et al.* (2005),

quando se fala de retração, deseja-se fazer referência a deformações em pastas de cimento, argamassas e concretos que não estão sob nenhum tipo de carregamento. De maneira geral, a principal causa da retração é a perda de água da pasta de cimento.

Existem diferentes tipos de deformações que podem ocorrer num sistema cimentício, principalmente quando se trata das deformações nas primeiras idades. Além da não uniformidade em relação à terminologia, existe também uma divergência sobre a classificação dos diferentes componentes das deformações nas primeiras idades (BENTZ e JENSEN, 2004).

Bastos (2001) estudando argamassas de revestimento sugere uma classificação dos vários tipos de retração por grupos, identificando o fenômeno quanto:

- ao estado físico da mistura, fresco ou endurecido;
- à natureza;
- ao grau de restrição;
- à permanência

Um resumo das classificações da retração apresentadas pelo autor pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- 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 no estado fresco (Retração plástica)	Retração hidráulica Retração química Retração autógena Retração térmica	Retração livre	Retração reversível
Retração no estado endurecido	Retração por carbonatação	Retração restringida	Retração irreversível

Jensen e Hansen (2001b) também sugerem uma terminologia devido à falta de acordo na literatura sobre nomenclatura a ser utilizada para denominar as retrações. Essa sugestão dada pelos autores, baseia-se em definições físico-químicas, que esclarecem que para definir condições autógenas, os conceitos de físico-química deverão ser considerados, como um sistema isotérmico e fechado, onde não haverá qualquer troca entre o material

cimentício e o seus arredores. Assim sugerem uma terminologia representada na Figura 2.7.

Na classificação proposta por esses autores, podem ser acrescentadas, nos fenômenos não autógenos, as deformações por secagem, viscoelásticas, elásticas, plásticas e por fluência, além de outras deformações devido à reação de degradação por agentes externos: ação de microorganismos e etringita secundária.

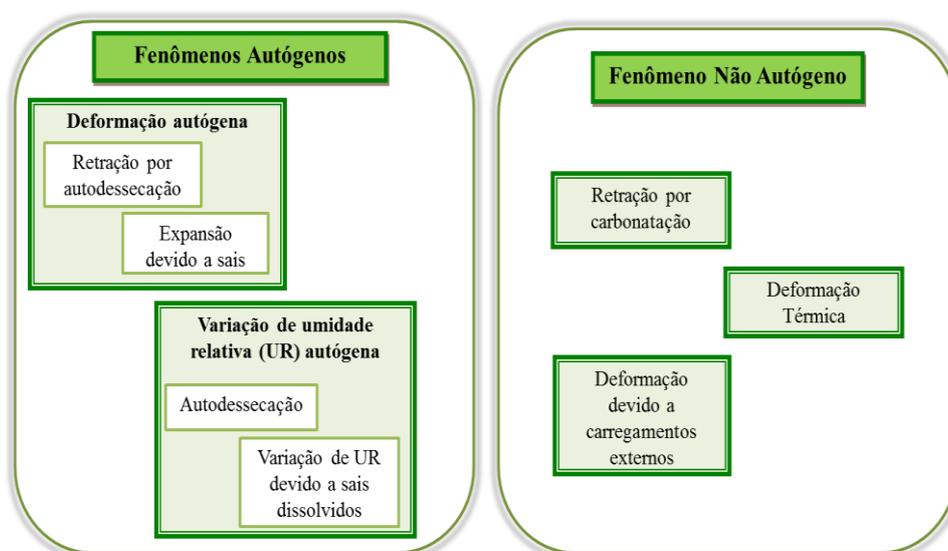


Figura 2.7 - Representação gráfica da terminologia empregada por Jensen e Hansen (2001b)

Existem outras propostas para obter uma classificação sobre a terminologia a ser adotada, percebendo assim a falta de consenso e explicações para cada um dos fenômenos que apresentam os materiais. Devido à ausência de concordância sobre a terminologia, Silva (2007), em sua tese de doutorado, propõe uma classificação considerando conceitos da termodinâmica. A classificação e nomenclatura adotada neste trabalho será a sugerida pela autora.

Segundo Silva (2007), o universo da termodinâmica está dividido em duas partes:

- ✓ Os sistema;
- ✓ Vizinhança do sistema

O *sistema* é a parte de maior importância a qual pode ser, por exemplo, um motor, uma célula eletro-mecânica ou uma câmara de reação. A *vizinhança* é a parte onde se realizam as observações e se tem interações fortes com o sistema. O sistema e sua vizinhança se encontram separados por uma *fronteira*, que é a superfície que os separa e que dependendo de suas características irá determinar o tipo de sistema. O sistema pode ser considerado como *aberto* quando a matéria e energia são trocadas (pela fronteira) entre sistema e vizinhança, e pode ser considerado como *fechado* quando existe troca de energia e conservação de massa. Quando não existe troca de energia nem de massa entre sistema e vizinhança o sistema é dito *isolado*. (Figura 2.8).

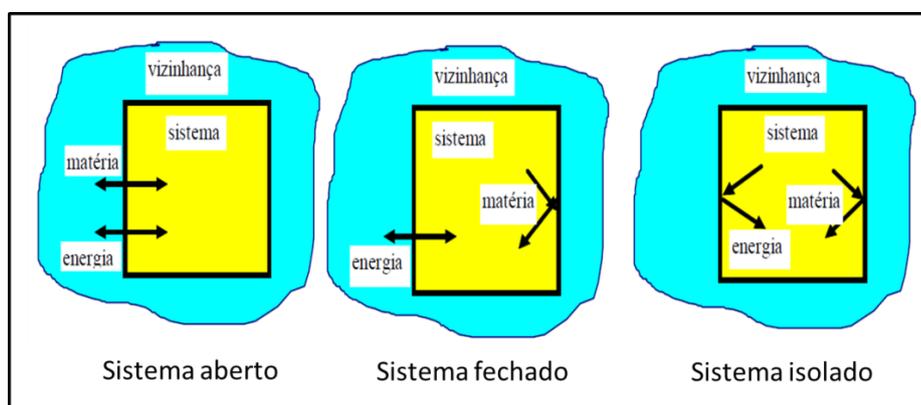


Figura 2.8 - Tipos de sistema (SILVA, 2007)

Num sistema isolado, a energia interna dele é constante, ou seja, há conservação de energia. Segundo Silva (2007), quando há conservação de energia, significa que não existe variação de trabalho e de calor (as duas são possibilidades de alterar a energia de um sistema). Portanto, a variação de energia interna será nula. Caso a energia interna do sistema seja constante, poderá existir transferência de energia, por exemplo, a potencial química (causa retração autógena) em energia térmica (causa deformação térmica). A variação de massa nula significa que não existirá troca de umidade ou qualquer outra substância com o meio exterior.

Segundo a classificação sugerida por Silva (2007), em sistemas isolados podem ocorrer apenas deformações autógenas e em sistemas abertos e fechados, podem ocorrer também deformações autógenas e não autógenas. (Figura 2.9).

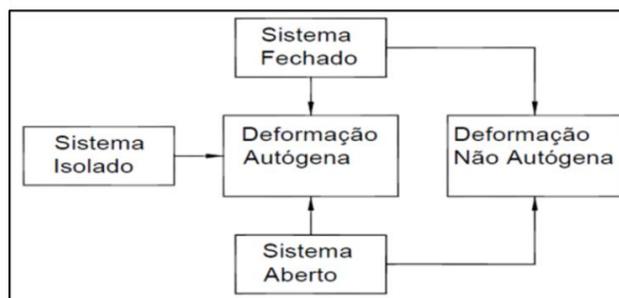


Figura 2.9 - Resumo esquemático da possibilidade de ocorrência das deformações autógena e não autógena nos tipos de sistemas (SILVA, 2007)

Segundo Silva (2007) as deformações autógenas estão divididas em três categorias: volumétricas químicas, térmicas e expansivas de degradação (Figura 2.10). As deformações químicas causadas pela reação de hidratação se classificam, de acordo com o estado do material, em: *suspensão*, onde pode ocorrer a Contração Le Chatelier; *sólida*, onde pode ocorrer a retração autógena e a expansão inicial.

As deformações não autógenas apresentam três tipos de variações: variação de massa, calor e de trabalho. Quando essas deformações são causadas pela variação de massa, podem ser do tipo contração e retração por secagem, as quais podem ser geradas por evaporação ou sucção de água ou podem ser expansivas de degradação. Quando as deformações não autógenas são geradas por uma variação de calor são chamadas de deformações térmicas; e quando são geradas por variação de trabalho, elas podem ser viscoplásticas (no estado de suspensão) e elásticas, plásticas e por fluência (no estado sólido) (SILVA, 2007).

De forma geral, a retração em qualquer de seus estágios, pode induzir uma tendência de fissuração. Trabalhos feitos por diferentes pesquisadores levam a conclusões de que o fenômeno da retração é a origem mais frequente da formação de fissuras, tendo como consequência diferentes manifestações patológicas as quais contribuem a uma deterioração da estrutura, reduzindo dessa forma a vida útil do material.

O aparecimento de variações volumétricas no material cimentício ocorre em magnitude e tempo particulares e a sua forma de mitigação vai depender do tipo de retração apresentada. Por isso é importante classificar as variações volumétricas para saber utilizar a melhor forma para combatê-las. O enfoque deste trabalho é o estudo da mitigação da retração autógena, principal categoria das deformações volumétricas químicas.

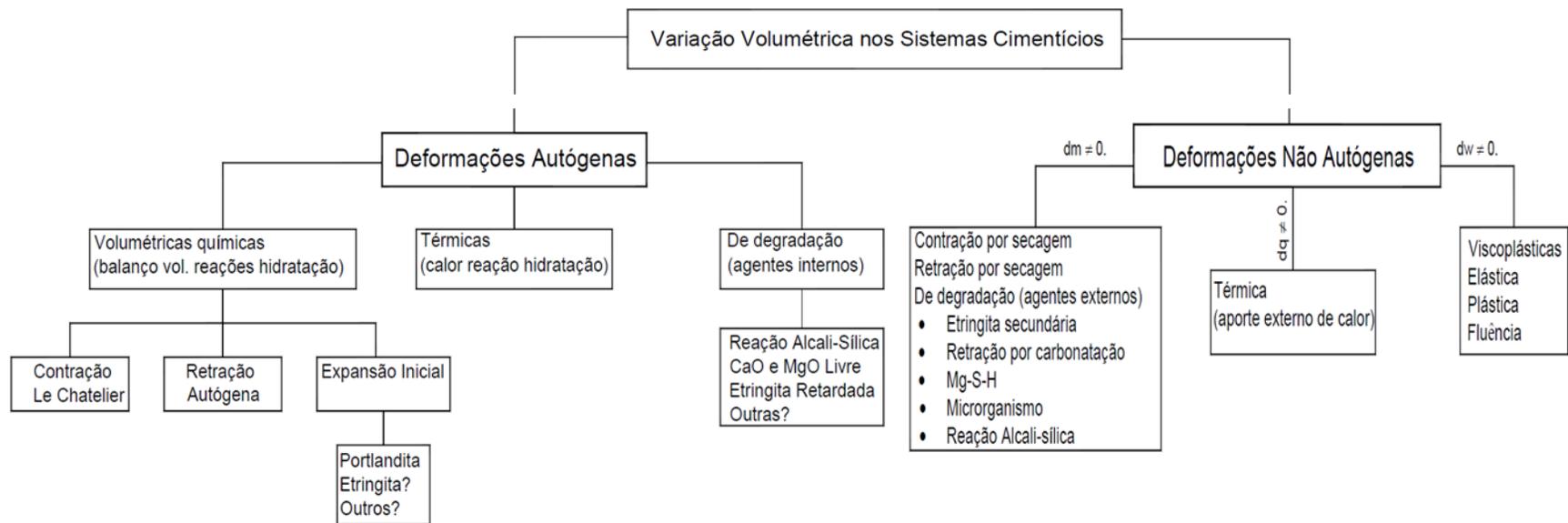


Figura 2.10 - Organograma com a classificação proposto por Silva (2007) para as deformações autógenas e não autógenas

2.3.2 - Contração Le Chatelier

Nas primeiras horas de hidratação é onde acontece a contração Le Chatelier, convertendo-se no primeiro estágio da deformação volumétrica química (BOUASKER *et al.*, 2006). O fenômeno da Contração Le Chatelier é um fenômeno físico-químico decorrente do balanço volumétrico das reações de hidratação, que ocorre quando a pasta está fluida e está submetida à ação da pressão atmosférica, ocasionando a contração dessa devido à hidratação do cimento. A contração acontece devido a uma diminuição dimensional, onde o volume molar de produtos hidratados é inferior ao volume molar inicial de água e dos componentes anidros ($V_1 > V_2$) (Figura 2.11) (SILVA, 2007).

Pode-se observar na Figura 2.11., que as deformações em x e y são nulas, existindo apenas deformação na direção z, devido à contração Le Chatelier. Por tanto esse fenômeno é anisotrópico, pois ocorre somente na direção vertical (z), provocado pela ação da gravidade.

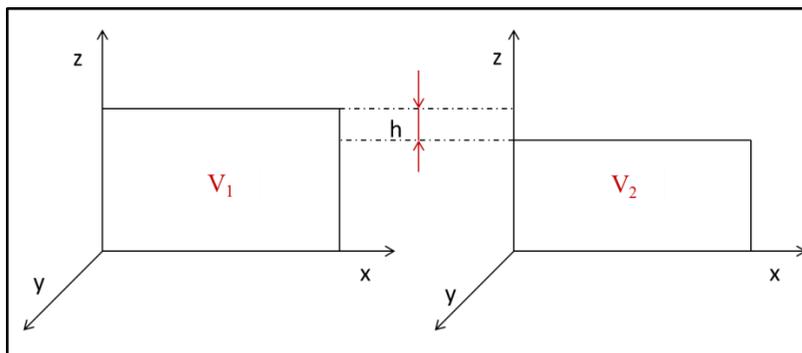


Figura 2.11- Desenho esquemático da variação volumétrica causada pela pressão atmosférica numa suspensão (adaptado de SILVA, 2007)

A redução de volume devido à hidratação dos compostos do cimento é tal que o volume V_h dos produtos de hidratação é sempre menor que a soma dos volumes de água consumida, V_{wh} , e do cimento hidratado, V_{ch} , sem ter absoluta certeza quanto à magnitude dessa redução. O fenômeno descoberto por Le Chatelier e denotado por ΔV , conforme a equação 1 (HUA *et al.*, 1995).

$$V_h = V_{wh} + V_{ch} - \Delta V$$

Eq. 1

Hua et al. (1995), apresentaram um esquema para descrever o fenômeno (Figura 2.12), considerando-se um elemento de pasta de cimento em processo de endurecimento, protegido por uma membrana à prova d'água (impermeabilizante). Como o elemento não tem comunicação com nenhuma fonte de água externa, a contração Le Chatelier inevitavelmente provoca o aparecimento de um volume gasoso nos poros inicialmente saturados de água quando o esqueleto é formado. Quanto mais a hidratação avança, mais espaços vazios são formados e mais diminui a pressão de equilíbrio do vapor d'água com a água, daí o termo conhecido como “auto-dessecação”.

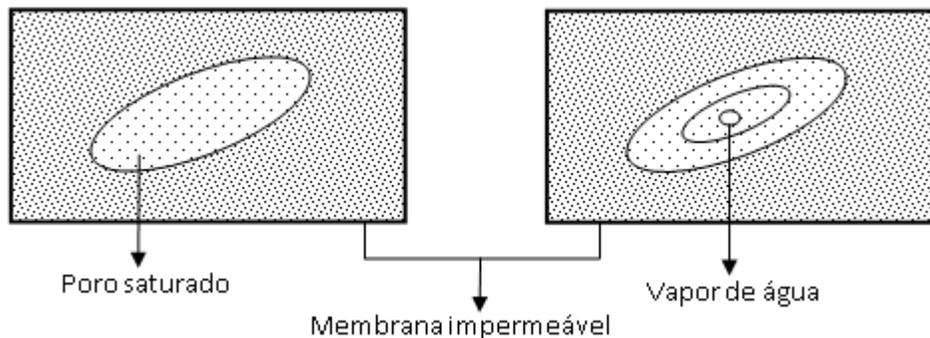


Figura 2.12 - Autodessecação pela contração de Le Chatelier (adaptado HUA *et al.*, 1995)

Quando se fala de contração, se faz referência às variações de volume do concreto no estado fresco (o concreto ainda apresenta um comportamento de fluido). O termo de retração, se refere ao concreto no estado endurecido, quando o material apresenta um esqueleto mineral, rígido o suficiente para se opor às variações de volume, podendo gerar fissuras (SILVA, 2007).

Antes de acontecer o patamar de percolação, o material se comporta como um fluido, não se opõe às variações de volume impostas pela hidratação, nem gera fissuração em razão desta contração (SILVA, 2007).

Na literatura em geral, a contração Le Chatelier é conhecido como *retração plástica*, mas segundo a nomenclatura utilizada neste trabalho, ainda não deve ser referenciado como retração, porque o material ao comportar-se como um fluido não retrairá, pois o líquido não retrai; o que ocorre é uma diminuição do volume do fluido, que puxa o líquido para se adaptar à forma do molde onde se encontra.

2.3.3 - Retração por secagem

Para Bissonette et al (1999), a retração por secagem pode ser considerado o principal responsável pela deterioração das estruturas do concreto. Esta retração geralmente leva à formação de fissuras, e mesmo não afetando a integridade estrutural, a durabilidade é comumente afetada.

Segundo Balthar (2004), a retração por secagem é um fenômeno inevitável em estruturas de concreto armado onde existe uma perda de água das estruturas de concreto para o ambiente no qual a umidade está abaixo da condição de saturação. Essa retração caracteriza-se por uma redução volumétrica do material que acontece pela perda de água de seu interior no estado endurecido, em que a evaporação causada por elevações bruscas da temperatura e/ou reduções significativas na umidade relativa ambiente (UR) onde a estrutura esta inserida são as principais causas desta perda de água.

A retração por secagem também pode ser definida como uma deformação que depende do tempo devido à perda de água em condições de temperatura e umidade relativa constante. Dessa forma, uma das diferenças entre retração por secagem e a retração autógena reside no fato de que, no primeiro fenômeno, a perda de água se processa pelo desenvolvimento de uma gradiente de umidade entre o volume interno e o ambiente onde se encontra inserido o concreto, e na retração autógena, a perda de água é devida à autodessecação (BISSCHOP, 2002).

Os mecanismos responsáveis pela retração autógena e pela retração por secagem são a autodessecação e a secagem, respectivamente. Nos dois mecanismos ocorre uma diminuição

da umidade relativa interna do material. Na secagem, devido à evaporação da água dos poros pela diferença que existe entre a umidade relativa do ambiente externo e a umidade relativa interna e na autodessecação, devido ao consumo de água evaporável pelas reações químicas de hidratação.

O estudo dos mecanismos de retração por secagem depende do estado de ligação da água-superfície sólida, dentro do material. A água ligada ao sólido pode ocasionar uma deformação desse sólido, mas a saída de água livre dos poros capilares não provoca variação dimensional. Segundo HUA *et al.* (1995), pode-se pensar que o mecanismo que gera a retração por secagem e o mesmo ao mecanismo de autodessecação, dentro dos domínios de umidade relativa correspondentes.

A água perdida quando se dá a retração por secagem é aquela presente no interior dos poros do concreto ou argamassa após o fim do período de pega. Uma maneira de prevenir a retração por secagem é a cura, que deve ser iniciada tão logo iniciem as reações de hidratação do cimento. Para realizar uma cura eficiente, deve-se impedir a perda de água da superfície do material, portanto, a utilização de membranas impermeáveis para proteção da superfície exposta deve ser eficaz no combate à retração por secagem. O procedimento de cura eficiente, no combate à retração por secagem, não precisa necessariamente contemplar o suprimento de água para ser absorvida pelo material, mas simplesmente deve impedir a perda de água da superfície do mesmo (KUMM, 2009).

2.3.4 - Retração autógena

O fenômeno da retração autógena foi descoberto a partir do início do século XX, mas suas implicações práticas só chamaram a atenção recentemente. Apesar do interesse que gera a retração autógena, ainda não se tem um consenso na comunidade científica sobre os métodos de teste padrão e na terminologia, mesmo feitas algumas tentativas neste sentido.

De acordo com Jensen e Hansen (2001), o pesquisador de materiais cimentícios, Le Chatelier, fez relevância na diferença existente entre volume absoluto e volume aparente, classificando a

retração química como 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).

Uma vez que o cimento entra em contato com a água, é iniciada a reação de hidratação, onde se forma uma microestrutura cada vez mais rígida. Independentemente da quantidade de grãos de cimento que existirem, a retração química vai acontecer até que toda a água livre nos capilares seja consumida. A água presente nos microporos é considerada “água imobilizada”, devido a ausência na auto-secagem. (HUA *et al.*, 195).

Segundo Nawa e Horita (2005), existe uma relação entre a retração autógena e a retração química na fase de hidratação da pasta de cimento. Quando a pasta de cimento está no estado líquido, há uma variação no volume aparente, originado pela retração autógena, que coincide com a diminuição do volume absoluto, causada pela retração química. À medida que 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 corresponde mais à retração química (Figura 2.13). Dessa maneira, o volume de ar nos poros capilares aumenta.

A retração autógena é relevante principalmente em concretos de alta resistência e ocorre sem saída de água para o ambiente, onde o sistema que está sobre condições autógenas, ou seja, não perde ou ganha massa, não está submetido a forças externas e não sofre variações térmicas. Porém, a retração autógena é devida ao fenômeno conhecido como auto-secagem, onde ocorre uma redução da água livre nos poros do material cimentício.

A retração autógena pode ser definida como a redução macroscópica dos materiais cimentícios após o início da pega, em condições de “isolamento” específicas, sem que ocorra mudança de volume devido à perda ou ao ingresso de substâncias, variação da temperatura ou aplicações de forças externas. (HASPARYK *et al.*, 2005).

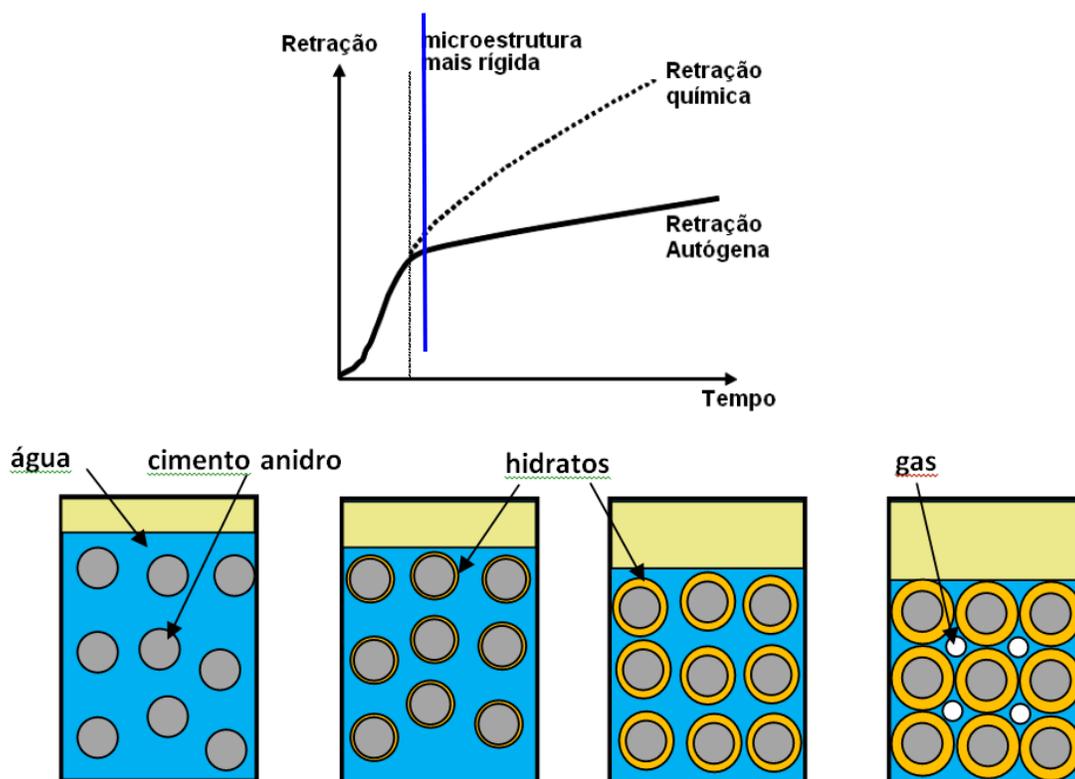


Figura 2.13 - Relação entre retração química e retração autógena (adaptado NAWA e HORITA, 2005)

Segundo Silva (2007), pode-se definir a retração autógena como a redução macroscópica de volume que se observa nos sistemas cimentícios após atingido o patamar de percolação (t_0), a qual é provocada pelo mecanismo da autodessecação, gerando tensões capilares nos poros de água. Os mecanismos que levam à retração autógena ainda são pouco entendidos. O mecanismo da autodessecação e o mecanismo da variação da depressão capilar ajudam a compreender as forças geradoras do fenômeno da retração autógena.

A autodessecação está ligada ao mecanismo da variação da depressão capilar, pois ela promove o contato entre superfícies de água e ar no interior dos poros. O gradiente de pressão chamado pressão capilar (ou depressão capilar) se estabelece na interface da superfície líquido-gás, a qual é função da tensão superficial líquido-gás, do seu raio de curvatura e do ângulo de molhamento (SANTOS *et al.*, 2007).

Este gradiente de pressão se baseia no fenômeno de capilaridade, onde existe a tendência de movimentação dos líquidos que estão presentes no interior de tubos capilares. Naquela interface da superfície líquido-gás, o líquido tende a reduzir sua área superficial para garantir o menor contato possível com a fase gasosa, gerando a formação de um menisco, conforme mostrado na Figura 2.14. Uma vez formado o menisco, o ângulo de contato já não é mais zero, ocorrendo a redução da atração entre o líquido e a parede do tubo (MORTIMER, 2008). Tal fenômeno pode ser explicado mediante as equações de Kelvin e Laplace da seguinte maneira:

- Lei de Laplace:

$$\Delta P = P_g - P_L = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta_E \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

ΔP = intensidade da depressão capilar (MPa);

P_g = pressão da fase gasosa (MPa);

P_L = pressão da fase líquida (MPa);

σ = tensão superficial na interface líquido/gás (N/m);

r = raio do maior poro cilíndrico onde existe menisco (m)

θ_E = ângulo de contato entre superfície sólida e fase líquida

- Lei de Kelvin:

$$P_L - P_g = \frac{P_L \cdot RT}{V_m} \cdot \ln(UR) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

R = constante dos gases perfeitos (8,314 J/mol.K);

T = temperatura (K);

P_L = massa específica do líquido (MPa);

V_m = volume molar do líquido (m^3/mol);

UR = umidade relativa (%)

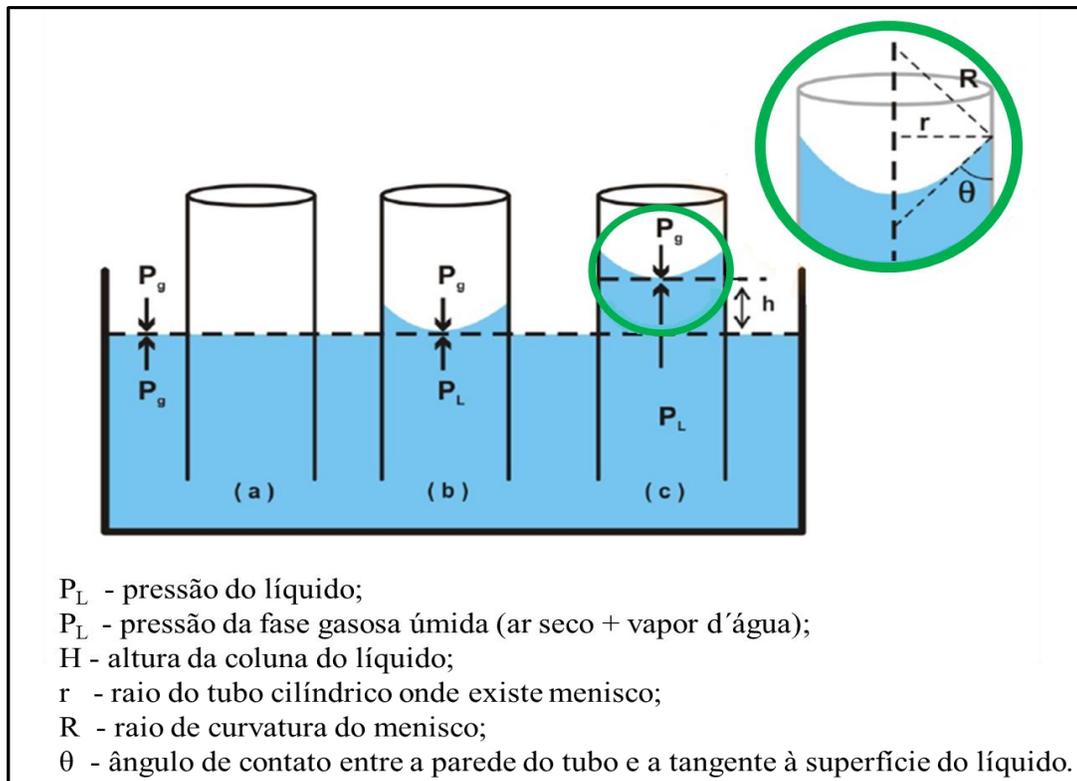


Figura 2.14 – Esquema do desenvolvimento de menisco e movimentação de um líquido em um tubo capilar (adaptado MORTIMER, 2008).

Com as leis de Laplace e Kelvin explicitadas através das Equações 2 e 3, se podem obter as seguintes observações:

- ✓ Quanto mais estreitos forem os poros em processo de autodessecação, maior a intensidade da depressão capilar.
- ✓ Quanto menor a umidade relativa, menor a dimensão do poro não saturado (onde pode existir menisco) (SILVA, 2007).

Portanto, a retração autógena, vista pelo mecanismo da depressão capilar acontece devido ao fato de que num capilar saturado completamente, a fase líquida é tracionada pela criação de

um menisco na interface líquido-gás, a qual introduz uma pressão negativa nas paredes dos capilares, tendendo a aproximá-las. Porém, a resposta a essa compressão é uma retração macroscópica observável, denominada retração autógena (SILVA, 2007).

Essa retração autógena que pode sofrer um concreto é um fenômeno que deve ser evitado devido aos problemas que ela pode causar como induzir microfissuras ou macro fissuras e, desta forma, prejudicar a qualidade do concreto (LURA *et al.*, 2002).

Existem diversos métodos convencionais para mitigar a retração autógena, segundo Schröfl, *et al.* (2012), os métodos convencionais de concreto de cura não podem contribuir substancialmente para mitigar a retração autógena de concretos com relações água/cimento baixas, mesmo se é aplicada cura molhada intensiva; a microestrutura típica de um concreto de alta resistência é muito densa, mesmo em suas idades iniciais, o que não permite um transporte rápido de água de cura para o interior do concreto, especialmente se eles são grossos (S. WEBER, *et al.*, 1997 apud SCHRÖFL *et al.*, 2012). Devido a isto, a utilização de cura interna, com adição de materiais com uma alta capacidade de armazenamento de água à mistura, tem sido proposta para diminuir a auto-secagem.

2.3.4.1 – Métodos de Medição da Retração Autógena

Atualmente não existem metodologias padrão para a determinação da retração autógena, existindo assim dificuldade para comparar resultados entre estas. Segundo Silva (2007), a discrepância encontrada entre medições de retração autógena ocasionada pela falta de padronização, é influenciada por dois fatores:

- a) Variação com relação ao tempo de início da determinação da retração autógena por um e outro método, e
- b) Variação com relação ao que está sendo determinado com o procedimento adotado, pois em muitos casos se está medindo a retração autógena junto com a contração Le Chatelier.

Diferentes pesquisas foram realizadas para determinar se a retração autógena de uma pasta de cimento é igual à retração autógena que sofre o concreto. Hammer *et al.* (2002), realizou medições de retração autógena onde os resultados mostram que o desenvolvimento da retração nas primeiras idades é completamente diferentes para o concreto e pasta. Portanto, existem diferentes metodologias adotadas para a realização da determinação autógena em pasta e em concreto.

Ao falar da determinação autógena em pasta, Jensen e Hansen (2001b) dizem que as medições destas deformações têm sido feitas de duas formas fundamentalmente diferentes: a medição da deformação linear e a medição da variação volumétrica. A determinação linear da deformação autógena é realizada geralmente colocando a pasta de cimento em um molde rígido de baixa fricção onde a mudança de comprimento é registrada por um transdutor de deslocamento no final da amostra. A medição volumétrica da deformação autógena é feita geralmente colocando-se a pasta de cimento em um balão apertado imerso na água, onde a mudança de volume da pasta de cimento é medida pela quantidade de água movida pela amostra imersa, fazendo-se, por exemplo, medições da variação de peso da amostra imersa. Os autores afirmam que o segundo método tem a desvantagem de não apresentar contato estável entre o balão e a pasta de cimento provocado pela formação de uma película de água ocasionada pela exsudação ou ar enclausurado na superfície da pasta de cimento. Igualmente os autores afirmam que o método linear tem a vantagem de ter pontos de medição firmemente ancorados à pasta de cimento em processo de endurecimento e também pode ser considerado numa desvantagem, do ponto de vista de que as determinações só podem ser realizadas após o instante considerado como o do início da formação do esqueleto rígido.

Jensen e Hansen (2001b) sugerem um sistema especial na forma de um tubo corrugado que combina as vantagens de medição linear e volumétrica, onde o tubo corrugado transforma a deformação volumétrica em uma deformação linear conseguindo fazer medidas lineares diretamente após a moldagem da amostra (Figura 2.15). Essa capacidade de transformação é possível devido à grande rigidez na direção radial em relação à direção do molde.

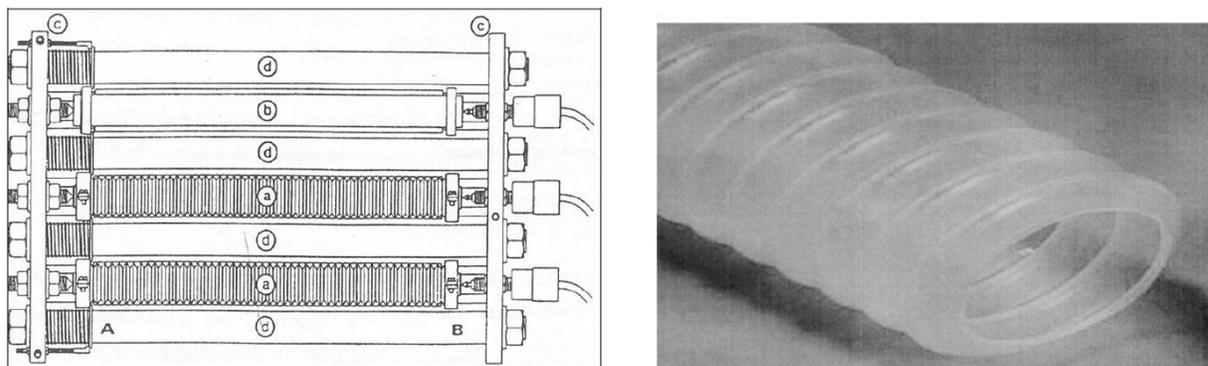


Figura 2.15 - À esquerda, dispositivo de medida unidirecional e horizontal, desenvolvido por Jensen e Hansen (2001b). À direita, detalhe do tubo corrugado com o qual é possível realizar medições diretamente após a moldagem da amostra.

O dilatômetro é o aparato utilizado para fazer medidas lineares da retração autógena com moldagem de tubos (rígidos e de baixo atrito), onde a medida da retração é feita e registrada por transdutores de deslocamentos (Figura 2.16). Por ser um método linear, tem a vantagem da possibilidade de iniciar as medidas imediatamente após a moldagem. Por tanto, há a possibilidade de restrição da pasta de cimento, ocasionada pelo atrito do tubo com a superfície de apoio.



Figura 2.16 – Dilatômetro. Aparato utilizado na medida linear da retração autógena, em tubos corrugados (LURA et al., 2006)

Sant et al. (2005) fizeram comparações de quatro métodos distintos de medida da retração autógena: imersão de amostras moldadas em membranas impermeáveis, medida linear com tubo corrugado, medida sem contato físico e o método proposto pela ASTM C157 (2004).

Os autores chegaram à conclusão com os dados obtidos pelo método ASTM C157, quando aplicado a misturas de baixa relação a/c, não apresentam um quadro preciso da retração nestes materiais, devido ao método não capturar com significância a retração nas primeiras horas após a moldagem, ao contrário do que acontece no teste com tubo corrugado. Ao comparar-se resultados obtidos pelos métodos de tubo corrugado e do imersão com os resultados da ASTM C157, os autores fizeram uma observação relevante: quando acontece uma mudança de volume antes do tempo de pega, esta ocorre no sentido vertical,

Ao falar da determinação autógena em concreto, Silva (2007) diz que o método volumétrico não pode ser usado para concreto, pois o agregado danificaria a membrana de borracha do equipamento desenvolvido para esse fim. Os estudos em concreto são feitos apenas pelo método unidirecional.

As medidas lineares das deformações autógenas consistem em registrar as variações dimensionais de um corpo-de-prova em uma direção. Os resultados são expressos sob a forma:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad \text{Eq. (4)}$$

ε = deformação

L = comprimento do corpo-de-prova no instante da determinação

L_0 = comprimento inicial

Tazawa e Miyazawa (1999) juntamente com o Instituto Japonês do Concreto – JCI – (1998), propõem uma metodologia para determinação da retração autógena e da expansão autógena, em pasta de cimento, argamassa e concreto.

A metodologia estabelece uma amostragem de no mínimo de 3 corpos-de-prova, para cada ensaio. Os corpos-de-prova são prismáticos, com largura e altura de pelo menos 3 vezes a dimensão máxima do agregado graúdo, no caso da determinação em concreto. O comprimento deve ser mais de 3,5 vezes a largura ou a altura.

A forma deve ser de aço e rígida, com um orifício de 3 a 5 mm de diâmetro no centro das duas placas laterais de menor dimensão para encaixar os pinos metálicos (um em cada extremidade através do orifício), de forma a possibilitar a leitura da distância inicial entre as extremidades dos pinos antes da moldagem e demais leituras após o tempo de pega, usando extensômetros com acurácia de 0,001 mm, ou seja, um milésimo de milímetro. Os corpos-de-prova são moldados em formas metálicas, previamente forradas com folha de politetrafluoretileno (no fundo) e de poliestireno (nas laterais), de modo a não restringir o movimento livre. Antes da desforma, as medidas são efetuadas horizontalmente, e podem começar a partir do tempo de início de pega, determinado, segundo JIS A 6204 (TAZAWA e MIYAZAWA, 1999), quando o material apresenta uma rigidez suficiente para suportar a introdução dos eixos dos extensômetros nos pinos metálicos, através dos orifícios das placas laterais extremas.

No centro dos corpos-de-prova, deve-se efetuar medida da temperatura a cada leitura para o cálculo da variação de comprimento (feita nos extensômetros) até a temperatura se estabilizar com a da sala de leitura. Esse procedimento é para determinar a deformação térmica e subtrair da retração total, assumindo um coeficiente de expansão igual a $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, para o concreto, segundo o JCI (1998).

A retração autógena e expansão autógena são expressas por:

$$\Delta L = \frac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{G} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

ΔL = deformação relativa de comprimento, antes da desforma, dado pela expressão:

X_{0a}, X_{0b} = leituras iniciais nos extensômetros

X_{ia}, X_{ib} = leituras nos extensômetros horizontais no tempo i

G = comprimento inicial entre as extremidades internas dos pinos metálicos

Neste trabalho será adotada a metodologia proposta pelo Instituto Japonês do Concreto – JCI – (1998), utilizando três corpos de prova prismáticos. Todas as medidas de retração autógena

foram determinadas por meio de extensômetros, semelhante ao realizado por Silva (2007) e Rodrigues (2009), conforme descrito no item 3.5.4. (Ver figura 2.17).

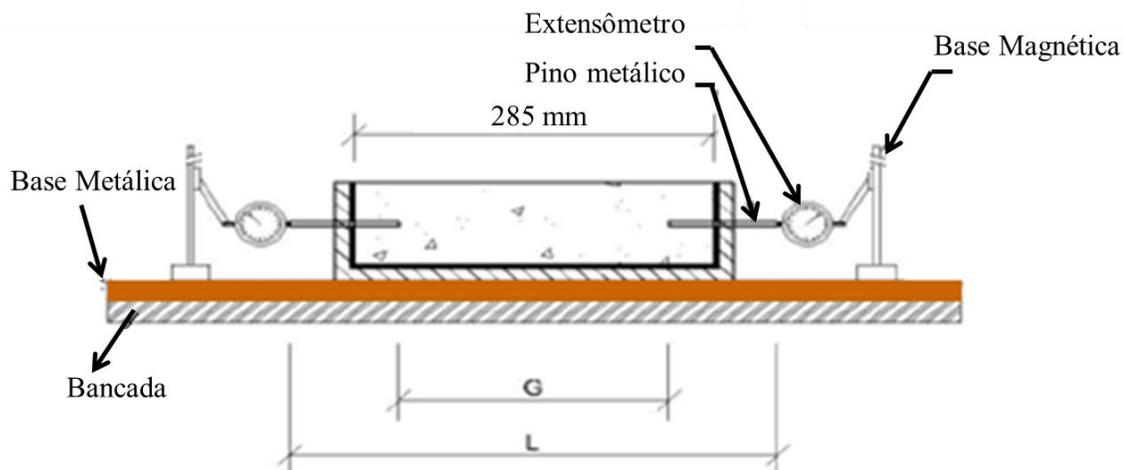


Figura 2.17 - Esquema para determinação da retração autóloga (modificado SILVA, 2007)

2.4 – DESENVOLVIMENTO DA MICROESTRUTURA

“O momento em que cessa a cura com água, a relação água/aglomerante, e a quantidade e tipo de agregados vão determinar em grande parte a retração final do concreto” (AÏTICIN, 1998). Para entender melhor a afirmação anterior, baseada em fundamentos da hidratação do cimento, é importante compreender o processo de hidratação do cimento e as propriedades físicas da pasta endurecida, portanto, faz-se necessário explicar o modelo de estrutura da pasta de cimento portland endurecida, publicado por Powers-Brownyard em 1948.

Na atualidade, o modelo de Powers é ainda considerado um dos poucos modelos que consegue explicar as propriedades físicas da pasta endurecida e o único modelo capaz de fazer cálculos quantitativos da composição volumétrica das pastas endurecidas de cimento Portland. O Modelo de Powers além de explicar a estrutura da pasta endurecida, mostra como estimar o volume fracionado dos constituintes importantes da estrutura física do cimento Portland curado a temperatura ambiente a partir da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento (HANSEN, 1986).

Muitas das características da estrutura da pasta de cimento endurecida dependem do estado físico da fase sólida e da sua inerente atração pela água e não, pela sua composição química (POWERS e BROWNYARD, 1947). No estado fresco, a pasta de cimento Portland está composta de grãos de cimento em solução aquosa, e no estado endurecido está composta por produtos sólidos reativos e espaços que podem ser penetrados por água, formando assim uma estrutura porosa. Na pasta de cimento, os produtos de hidratação formados são densos, apresentando uma porosidade característica (os poros gel). Denomina-se gel de cimento a aquela substância densa e porosa, devido ao fato de estar composta principalmente por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (POWERS e BROWNYARD, 1947).

Geralmente, não existe uma quantidade de gel de cimento suficiente para preencher os espaços existentes na pasta endurecida que inicialmente eram ocupados pela água de amassamento. Esses espaços não preenchidos pelo gel de cimento são chamados poros capilares. Desta forma, a porosidade total da pasta endurecida esta constituída, então, pelos poros capilares e os poros do gel Powers e Brownyard (1947).

Powers classificou empiricamente a água contida na pasta de cimento endurecida e saturada da seguinte forma:

- Água não evaporável,
- água adsorvida ou água gel, e
- água capilar.

Assim, Powers e Brownyard apresentaram um modelo empírico para distribuição das fases da pasta de cimento endurecido e posteriormente modificaram esse modelo matemático e desenvolveram outro para determinação do volume das fases que compõem uma pasta de cimento hidratada: redução de volume pela retração química (Eq. 6), água capilar (água livre) (Eq. 7), água de gel (água fisicamente ligado) (Eq. 8), sólidos de gel (Eq. 9), e cimento anidro (Eq. 10).

Para a determinação do modelo, Powers baseou-se em parâmetros resultantes da hidratação completa de 1g de cimento. Os parâmetros e valores a seguir, vão variar dependendo da composição do cimento:

- Aproximadamente 0,23 g/g de cimento hidratado corresponde à água não evaporável, também chamada água quimicamente ligada;
- Aproximadamente 0,19 g/g de cimento hidratado correspondem à água de gel, e;
- Aproximadamente 6,4 ml para cada 100 g de cimento hidratado é a redução do volume da pasta de cimento gerado pela retração química.

$$V_{cs} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 6})$$

$$V_{cw} = p - 1,32 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 7})$$

$$V_{gw} = 0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 8})$$

$$V_{gs} = 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 9})$$

$$V_{uc} = (1 - p)(1 - \alpha) \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

V_{cs} = volume de retração química [m³];

V_{cw} = volume de água capilar [m³];

V_{gw} = volume de água de gel [m³];

V_{gs} = volume de sólidos de gel [m³];

V_{uc} = volume de cimento anidro [m³];

p = porosidade inicial;

α = grau de hidratação do cimento [kg de cimento hidratado/kg de cimento anidro).

Pelo modelo, só é possível que se de uma hidratação completa quando a relação a/c for superior a 0,42 (=0,23+0,19). Se uma pasta de cimento hidratada é imersa em água, o volume (vazios) gerado pela reação química será preenchido por água adsorvida, e será livremente disponível para a hidratação do cimento. Portanto, numa relação a/c inferior a 0,42 o acesso livre da água aumentará o grau máximo de hidratação do cimento. A Figura 2.18 mostra as

relações volumétricas calculadas pelo modelo de Powers para uma relação $a/c > 0,42$ num sistema sem perda de massa (JENSEN e HANSEN, 2001a).

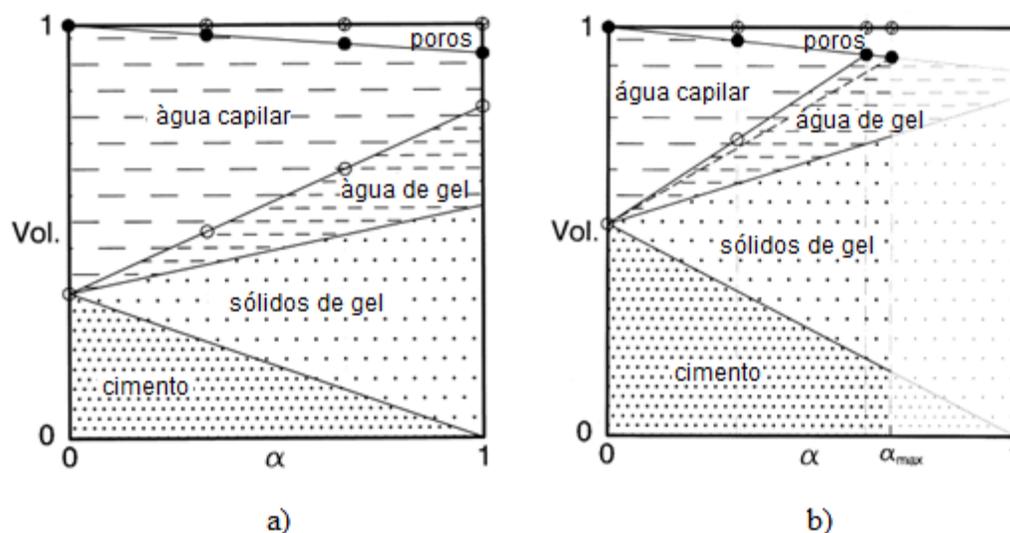


Figura 2.18 - Distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento, em função do grau de hidratação (α), aplica-se para um sistema fechado, ou seja, sem troca de água com o meio ambiente. Em: a) Para uma relação $a/c=0,60$: devido à elevada relação $a/c (>0,42)$, a completa hidratação do cimento ($\alpha= 1$) pode ser teoricamente obtida, b) Para uma relação $a/c = 0,3$: devido à baixa relação $a/c (<0,42)$, a completa hidratação do cimento ($\alpha= 1$) não é possível, estando limitada a um grau máximo de hidratação (JENSEN e HANSEN, 2001a, modificado)

Na figura anterior, são apresentadas as relações volumétricas que conseguem quantificar a demanda de água na pasta de cimento. A figura 2.18 a) a pasta de cimento hidratada com relações de $a/c > 0,42$ (elevada relação a/c), contém excesso de água livre nos capilares mas observa-se que todo o cimento se hidrata completamente. A Figura 2.18 b) corresponde à pasta de cimento hidratada com relações de $a/c < 0,42$ (baixa relação a/c), onde não existe água suficiente para a hidratação capilar do cimento e de acordo com medições feitas por Powers e Brownyard (1948) há uma porosidade mínima, que, abaixo dela, o crescimento das partículas de gel existentes e a formação de novas partículas é restrito por falta de espaço.

2.4.1 - Aplicação do modelo de Powers a amostras submetidas à cura interna

O modelo de Powers, citado no item 2.4, pode ser adaptado para diferentes sistemas, por exemplo, podem-se fazer adaptações a sistemas abertos onde há cura externa com água ou cura interna com água incorporada que é o caso do polímero superabsorvente.

A cura interna no concreto, pode ser utilizada para evitar a autodessecação durante a hidratação do cimento. A Figura 2.19 mostra a distribuição das fases de uma pasta de cimento com relações de água/cimento baixas onde é proporcionada água livremente (não é água de amassamento), durante as reações de hidratação. Este fornecimento de água permite ao cimento alcançar um maior grau de hidratação. O diagrama foi feito para uma relação a/c igual a 0,3 (água de amassamento) + 0,05 (água extra, para evitar a auto-secagem) (JENSEN e HANSEN, 2001a).

Jensen e Hansen, pesquisadores que contribuíram nos estudos de incorporação de água para cura interna, desenvolveram as equações propostas por Powers e Brownyard, para chegarem desta forma, à obtenção de equações capazes de calcular aproximadamente a quantidade de água necessária para cura interna e evitar a auto-secagem.

O desenvolvimento das equações propostas pelos autores, segue o princípio de que o volume de água incorporada, $V_{ew,0}$, deve ser igual a retração química desenvolvida no grau máximo de hidratação do cimento (JENSEN e HANSEN, 2001a).

Tendo que:

$$\{\alpha = \alpha_{max} \text{ para } V_{gw} + V_{gs} + V_{uc} = 1\} \rightarrow$$

$$0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + (1 - p) \cdot (1 - \alpha_{max}) = 1$$

num sistema aberto com relações água/cimento baixas:

$$\alpha_{max} = \frac{p}{1,1(1 - p)} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$V_{ew,0} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} = 0,18 \cdot p = 0,18 \cdot V_{cw,0} \quad (\text{Eq. 12})$$

Utilizando a relação água/cimento (g de água / g de cimento), a água incorporada $(a/c)_c$, (Eq. 11), e a relação de água/cimento podem ser representadas das seguintes formas:

$$(a/c)_c = \frac{V_{ew,0} p_w}{V_{c,0} p_c} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$(a/c) = \frac{V_{cw,0}p_w}{V_{c,0}p_c} \quad (\text{Eq. 14})$$

A partir das equações (Eq.11) , (Eq. 13) e (Eq. 14), a quantidade de água necessária para obter

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

$$(a/c)_c = 0,18 \cdot (a/c), \quad \text{para } (a/c) \leq 0,36 \quad (\text{Eq. 15})$$

A (Eq. 12) só é relevante para $(a/c) \leq 0,36$. Acima desta relação a/c, a hidratação completa pode ser alcançada com menos água incorporada do que a indicada pela (Eq. 15). O grau máximo de hidratação (α_{max}) é possível no intervalo de: $0,36 \leq (a/c) \leq 0,42$ se:

$$(a/c) + (a/c)_c = 0,42$$

Assim, no seguinte intervalo de relação (a/c) , se obterá a condição necessária de $(\alpha_{max}) = 1$:

$$(a/c)_c = 0,42 \cdot (a/c), \text{ para } 0,36 \leq (a/c) \leq 0,42 \quad (\text{Eq. 16})$$

Como exemplo ilustrativo de aplicação da (Eq. 15), pode-se observar que na Figura 2.19, se tem uma pasta de cimento com relação água/cimento = 0,30. Ao ser uma relação a/c igual a 0,30 e menor a 0,36 como o sugerido pela (Eq. 15), se tem que a água necessária para a obtenção de $\alpha_{max} = 1$ é $0,18 \times 0,30 = 0,54$ (g) de água incorporada / g de cimento).

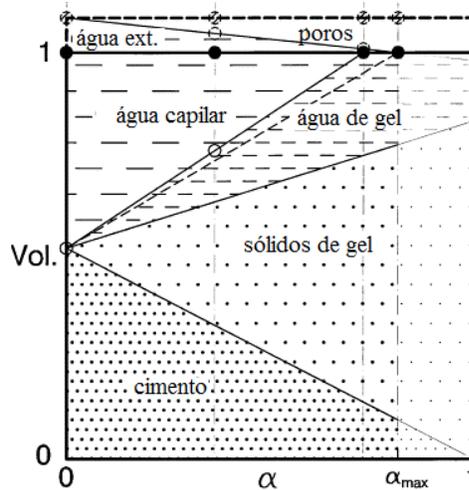


Figura 2.19 – Distribuição volumétrica de fases da pasta de cimento em função do grau de hidratação (α), num sistema fechado e para uma relação a/c de 0,30+0,05. O diagrama pode ser aplicável para a hidratação com suprimento externo, cura externa num sistema aberto, ou externo, cura interna com água incorporada (adaptado, JENSEN e HANSEN, 2001)

É possível gerar o gráfico (Figura 2.20) que representa o mínimo necessário de água incorporada, para obter $\alpha_{max} = 1$ prevenindo a auto-secagem e tendo em conta as equações (Eq. 15) e (Eq. 16). Para interpretar o gráfico, se tem como dado de entrada a relação água/cimento (a/c) da mistura, representando no eixo vertical a relação água/cimento necessária para prover a cura interna. Na prática, a relação água/cimento final da mistura dá-se pela soma dos dois valores.

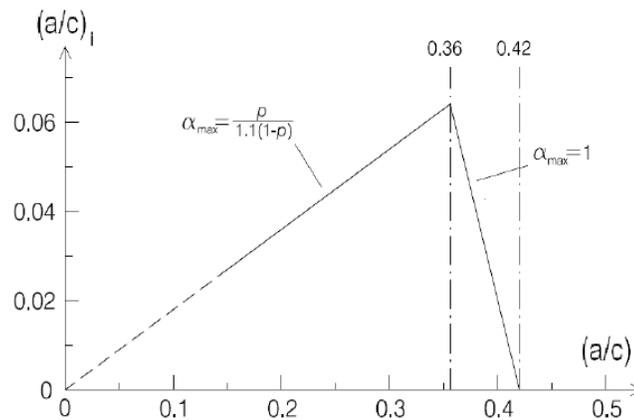


Figura 2.20 – Com base nas (Eq. 11) e (Eq. 12), o gráfico expressa o mínimo necessário de água para cura interna, para obter α_{max} , assim, prevenir a auto-secagem. (Adaptado: JENSEN e HANSEN, 2001a)

2.5 - ESTRATÉGIAS MITIGADORAS DA RETRAÇÃO AUTÓGENA

Há diferentes estratégias mitigadoras da retração autógena que vêm sendo estudadas. Dentre elas podem-se citar a utilização de:

- adição de fibras (poliméricas, metálicas ou de carbono);
- adição de agregados leves saturados,
- cura interna no concreto utilizando substâncias com água quimicamente ligada, pedrapomes, argila expandida, polímeros superabsorventes, aditivo retardador de retração (ARR), aditivo acelerador de pega, entre outros.

A estratégia mitigadora utilizando cura interna no concreto é o mais recomendado para combater as possíveis fissurações provenientes da retração autógena em concretos de alta resistência (JENSEN e HANSEN, 2001). Este método consiste na incorporação de água durante a mistura de algum mecanismo que consiga atuar como reservatório de água liberando-a aos poucos, quando necessário, ou seja, à medida que a umidade relativa do meio decresce e de modo a garantir uma hidratação uniforme.

Neste trabalho será utilizada como estratégia mitigadora a utilização de cura interna com polímeros superabsorventes PSA. Por tanto, o método de combate estudado é detalhado no subcapítulo 2.6, enquanto as demais estratégias mitigadoras não serão aprofundadas.

2.6 - O polímero superabsorvente PSA

A palavra polímero vem da junção das palavras gregas *poli* (muitas) e *mero* (partes), então, um polímero é uma macromolécula que está composta por milhares de unidades de repetição denominadas meros, ligados por ligação covalente. Para a formação dos polímeros, precisa-se que pequenas moléculas (manômeros) se liguem entre si para formar uma longa cadeia polimérica. Assim, para que aconteça a reação de polimerização, cada manômero, no mínimo, tem que ter a capacidade de se combinar com outros dois manômeros; portanto, o polímero faz referência ao material formado por essas macromoléculas (CANEVAROLO, 2002).

Existe no mercado uma grande quantidade de tipos de polímeros, os quais são derivados de diferentes compostos químicos. Dentre dos diferentes polímeros, encontram-se os polímeros superabsorventes, que constituem uma classe de polímero que possui grande afinidade pela água disponível no mercado em diversos tipos.

Os polímeros superabsorventes são aqueles que podem absorver grandes quantidades de água dependentes da concentração do íons do fluido. A capacidade de absorção diminui com o incremento da concentração de íons devido à formação de uma interligação adicional entre as cadeias poliméricas (REINHARDT e ASSMANN, 2012).

Os PSAs são materiais poliméricos que têm a capacidade de absorver uma grande quantidade de líquido a partir dos arredores e retê-lo dentro de sua estrutura (JENSEN, 2008). Segundo Hasholt *et al.* (2012), os polímeros superabsorventes são chamados “super” porque podem absorver uma quantidade substancial de água, por exemplo, 1000 vezes o seu próprio peso ou mesmo mais. No entanto, o PSA é só um termo genérico utilizado para um grupo de materiais, onde nem todos os membros do grupo são igualmente eficazes. Além disso, a capacidade de absorção pode ser dependente do fluido a ser absorvido.

As partículas PSA tem uma capacidade muito grande de reter água sendo ainda um tipo de polímero com um tamanho de partícula máximo de 80 μ m, como mostrado na Figura 2.21 (YAO *et al.*, 2011).

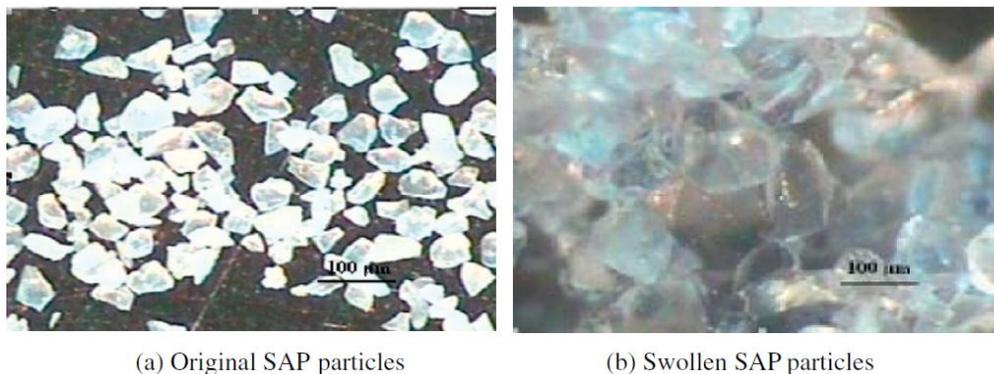


Figura 2.21 - Morfologia das partículas de PSA por microscópio óptico (YAO *et al.*, 2011)

É sabido que cerca de 85% da produção mundial de PSA são consumidos na produção de artigos para higiene, mas também existem outras aplicações como, por exemplo, combate à lixiviação do solo, à erosão de encostas, combate a incêndios e próteses.

Quanto a sua composição química, os PSAs são uma estrutura interligada e iônica, formada por poliácridatos ou poliácridatos/poliácridamidas copolimerizados (JENSEN e HANSEN, 2001). Estes polímeros encontram-se disponíveis em diferentes tamanhos e formatos como: pó, grãos e partículas que podem ser de uma variedade de tamanhos e formas diferentes (Figura 2.22) (TRAMFLOC, 2012).



Figura 2.22 - Amostras de polímeros superabsorventes, secos e saturados, acima e abaixo respectivamente (TRAMFLOC, 2012)

Os polímeros superabsorvente mais utilizados são a Poliacrilamida (PA) e o Poliacrilato de Sódio (PAS) (Figura 2.23) que absorvem água por meio da formação de pontes de hidrogênio e por osmose, respectivamente (MARCONATO e FRANCHETTI, 2002).

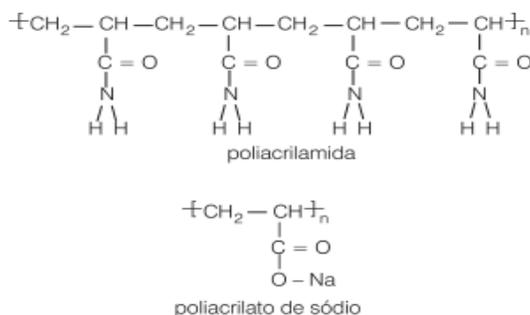


Figura 2.23 – Estrutura da poliacrilamida e do poliacrilato de Sódio, onde “H”, “C”, “O”, “N” e “Na” representam átomos de Hidrogênio, Carbono, Oxigênio, Nitrogênio e Sódio, respectivamente (MARCONATO e FRANCHETTI, 2002)

Estes polímeros são substâncias incháveis que podem absorver líquidos, geralmente, mais de que seu próprio peso através da formação de um gel onde o líquido absorvido não é liberado mesmo sob pressão, mas sim conforme a umidade relativa do ambiente onde ele se encontra. Existem dois estados de fases diferentes para a transição do estado seco até ficar inchado (saturado). Neste processo de transição, existem forças repulsivas que atuam expandindo a rede polimérica, e as forças atrativas que atuam para reduzir a rede. Dentro do PSA, existe uma elevada concentração de íons que originam um fluxo de água a ingressar por osmose para seu interior. Outro fator contribuinte para aumentar o inchamento é a solução de água de grupos hidrófilos presentes ao longo da cadeia de polímero. Mas também existe um fator que se opõe ao inchamento do PSA, o qual é a energia elástica das moléculas. É de especial importância a salinidade da solução aquosa, devido ao aumentar a concentração de íons que estão fora do polímero, a pressão osmótica dentro do gel diminui, diminuindo a capacidade de inchamento (JENSEN e HANSEN, 2001).

Antigamente era aplicada a cura interna para promover a hidratação do cimento e controlar a retração do concreto durante o endurecimento. Nesse processo utilizava-se o agregado saturado leve (Saturated lightweight aggregate, PTM). Porém ocorriam problemas ligados à sua adição, como a redução significativa do módulo de elasticidade a qual foi minimizada com a utilização do PSA (JENSEN, 2008).

Segundo Hashol *et al.* (2012), a cura interna é uma estratégia de mitigação para a retração autógena, onde o PSA é um material promissor interessante, que futuramente pode se tornar um agente de cura interna comum na construção de concreto. O fato de utilizar o PSA como agente para cura interna deve-se à absorção rápida de água que tem o polímero e que depois a libera gradualmente quando o concreto necessita. As ligações iônicas entre as moléculas do PSA e as presentes na água que forçam a água a ser absorvida pela partícula de PSA, como pode ser observado na Figura 2,24. As ligações de interconexão do PSA formadas são tão fortes de modo que mesmo com a molécula inchada não há rompimento.

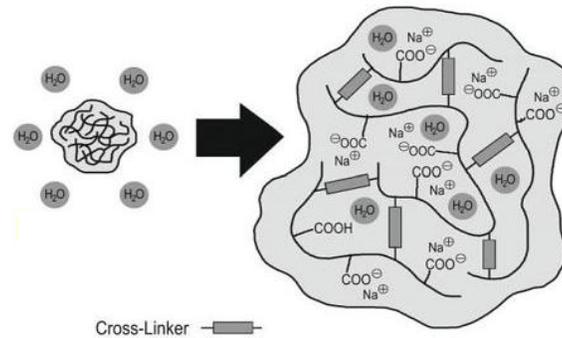


Figura 2.24 – Representação de uma partícula de PSA , à base de ácido poliacrílico, seca e inchada após absorção de água (FRIEDRICH, 2012)

Ainda se considera que a presença de componentes químicos nas misturas de concreto (estado fluido e estado sólido) tende a apresentar alterações, ocasionando variações na resistência e durabilidade do concreto afetando negativamente.

2.6.1 - Efeitos do polímero superabsorvente PSA na redução da retração autógena

Diferentes pesquisas são feitas para combater a retração autógena e diferentes são os métodos e agentes utilizados para sua redução. Mechtcherine *et al.* (2009) determinaram a retração autógena em concretos de ultra-alto desempenho, com amostras de relação $a/c=0.22$, e foi escolhido as quantidades de PSA com base nos resultados de investigações anteriores, sendo esta quantidade de 0,3% e 0,6 %, por massa de cimento. A quantidade de água para cura interna foi estimada com a intenção de compensar a perda de trabalhabilidade.

Os autores concluíram que as misturas contendo PSA e água para cura interna mostraram reduções na retração autógena. A adição de 0,3% de PSA, em relação à massa de cimento mais água extra resultou numa diminuição em retração autógena de aproximadamente 1100 $\mu\text{m/m}$ até 300 $\mu\text{m/m}$ no primeiro dia de medição comparando-o com a mistura de referência. A Figura 2.25 mostra as curvas médias do resultado das leituras de retração autógena durante 28 dias, onde-se encontra um concreto de referência (REF), um concreto com composição de 0,3% por massa de cimento de PSA (S0.3_1 e S0.3_2) e um concreto com composição de

0,6% por massa de cimento de PSA (S0.6_1), tendo aproximadamente como resultado média de retração autóloga 1110 $\mu\text{m}/\text{m}$, 600 $\mu\text{m}/\text{m}$, 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 180 $\mu\text{m}/\text{m}$ respectivamente.

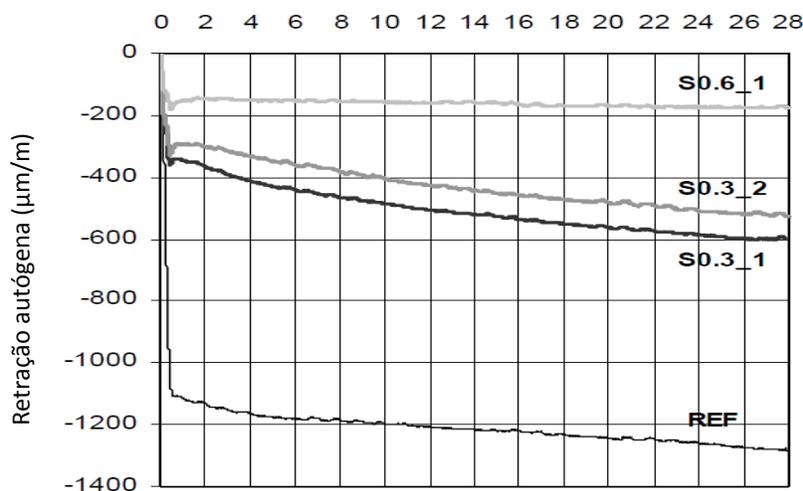


Figura 2.25 - Retração Autóloga em misturas de concreto com diferentes teores de PSA e $a/c=0,22$ (modificado MECHTCHERINE *et al.*, 2009)

Mechtcherine *et al.* (2009) concluíram que usando o PSA como agente de cura interna reduz a retração autóloga e este efeito torna-se ainda mais pronunciado com quantidades crescentes de PSA e água extra.

Soliman e Nehdi (2012) estudaram também a eficiência do polímero superabsorvente PSA como agente mitigador da retração autóloga em concretos de ultra-alto desempenho. Os autores trabalharam com uma adição de 0,6% por peso de cimento de PSA e com uma quantidade de água para cura interna igual a 18% a mais da relação a/c com base no modelo de Powers. A retração autóloga foi testada com a metodologia desenvolvida por Jensen e Hansen utilizando o dilatômetro. A adição de 0,6% de PSA reduziu em 22% a retração autóloga comparada com o concreto de referência.

Pierárd *et al.* (2006) investigaram a eficiência do polímero superabsorvente para diminuir a retração autóloga em concretos e argamassas. Foi utilizado três amostras para a determinação da retração autóloga as quais foram seladas a fim de evitar a perda de umidade das amostras e obter realmente medidas de retração autóloga. A adição de 0,3% e 0,6% de PSA levou a uma

redução de um valor aproximado de 50% e 65% respectivamente, conforme Figura 2.26. Os autores concluem que a utilização do PSA como agente de cura interna tem um efeito significativo sobre a retração autógena nas primeiras idades, mas pode levar a alguns efeitos negativos como a diminuição da resistência a compressão, sugerindo obter uma quantidade de polímero e de água para cura interna necessária para evitar a fissuração devido à retração autógena.

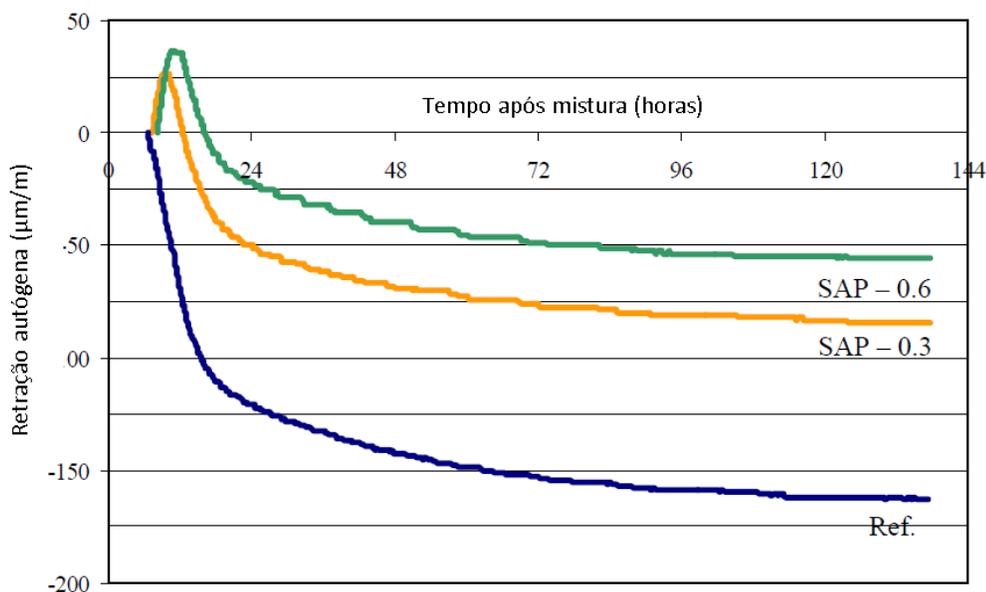


Figura 2.26 – Influencia do PSA na retração autógena (PIÉRARD *et al.*, 2006)

Conclusões semelhantes quanto à eficácia do emprego do PSA para reduzir a retração autógena são também obtidas em outros estudos. Igarashi e Watanabe (2006) testaram a retração autógena em pasta de cimento com adição de 0,35% de PSA e uma relação de água/cimento 0,25. A adição do PSA reduziu drasticamente a retração autógena, e quando testada uma quantidade de 0,7% de PSA, a retração autógena foi totalmente eliminada, apresentando nas duas misturas expansão nas primeiras horas (Figura 2.27).

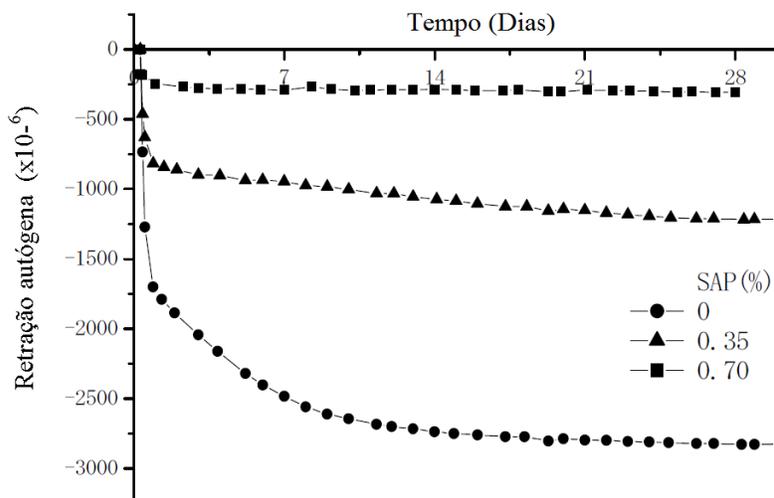


Figura 2.27 – Retração autóloga da pasta de concreto para misturas com diferentes quantidades de PSA (0%, 0,35% e 0,70%) (adaptado de IGARASHI E WATANABE, 2006)

A Figura 2.28 mostra a retração autóloga obtida em concretos com diferentes quantidades de PSA nos estudos feitos por Igarashi e Watanabe (2006). A adição de PSA reduz a retração autóloga quando esta quantidade aumenta como visto nas amostras de pasta de cimento. Correspondentemente à redução da retração, a tensão de restrição foi reduzida com a adição de PSA. Quando a quantidade de PSA foi duplicada, o concreto apresentou pequena expansão durante as primeiras 24 horas e foi mantida durante os primeiros sete dias.

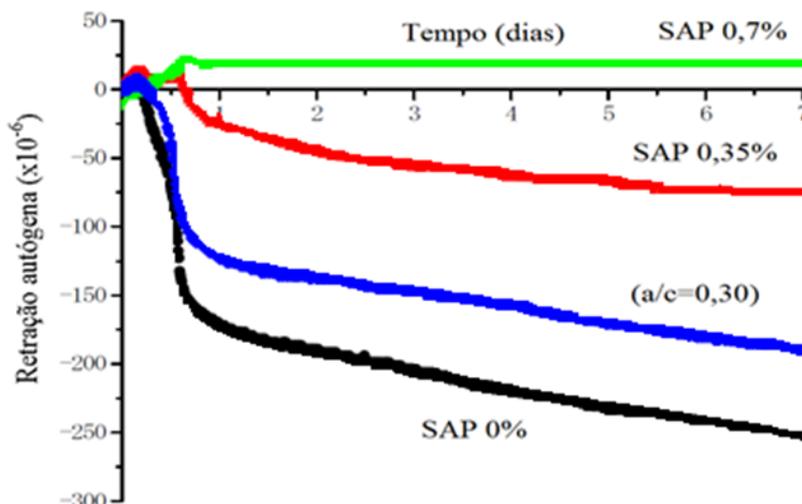


Figura 2.28 – Retração autóloga em concretos para misturas PSA (0%, 0,35% e 0,70%) (adaptado de IGARASHI E WATANABE, 2006)

Estudos de retração autógena feitos por Craeye *et al.* (2011) medidos por meio do dilatômetro vertical levam a conclusão que a adição do PSA conduz a uma redução na retração autógena. As leituras foram iniciadas uma vez atingido o tempo zero (6 horas depois da moldagem) como o realizado nesta pesquisa. Nesses estudos, é apresentada expansão nas primeiras horas como o obtido em diferentes trabalhos, para Craeye *et al.* (2011), esta expansão é apresentada nas composições com maior quantidade de PSA, possivelmente devido à deliberação prematura de água para cura interna num momento de auto-secagem. As porcentagens de PSA em relação à massa de cimento estudadas foram 0,30, 0,50, 0,70 e 0,90 e após 144 horas se obtiveram reduções da retração autógena de 42%, 54% e 57% respectivamente.

Resultados semelhantes, comprovando a eficácia do uso do polímero superabsorvente PSA na mitigação da retração autógena também podem ser encontrados nos estudos feitos por Kumm (2009), Lura *et al.* (2006), Craeye e Schutter (2006).

2.6.2 - Resistência à compressão

Segundo Schröfl *et al.* (2012), quando se utiliza partículas PSA como uma mistura em materiais à base de cimento, é criada na matriz um número de espaços vazios que pode afetar a resistência do material de forma negativa. Uma diminuição da carga de ruptura foi repetidamente relatada em diversas publicações como, por exemplo, Piérard *et al.* (2006). Estes autores pesquisaram os efeitos na resistência à compressão em concretos com teor de PSA de 0,3% e 0,6% em relação à massa de cimento obtendo reduções na resistência, aos 28 dias, de 8% e 14%, respectivamente (Tabela 2.2). Os autores assumem que essa perda de resistência é atribuída ao aumento da porosidade no concreto devido aos vazios introduzidos por partículas de PSA. Também Craeye e De Schutter (2006) observaram uma redução na resistência à compressão em concretos com teor de PSA de 0,3 %, 0,4% e 0,5% obtendo reduções na resistência aos 28 dias de 16%, 27% e 31%, respectivamente (Tabela 2.3).

Tabela 2.2 - Resistência à compressão do concreto de referencia contendo diferentes teores de PSA. (adaptado PIÉRARD *et al.*, 2006)

Mistura	PSA %	Resistência à Compressão MPa (28 dias)	Reduções na resistência, %
PSA_0.3	0,3	99	-8%
PSA_0.6	0,6	93	-14%

Tabela 2.3 - Resistência à compressão do concreto de referencia contendo diferentes teores de PSA. (modificado CRAEYE E DE SCHUTTER, 2006).

Mistura	PSA %	Resistência à Compressão MPa (28 dias)	Reduções na resistência, %
PSA_0.3	0,3	91.3	-16%
PSA_0.4	0,4	79.8	-27%
PSA_0.5	0,5	75.0	-31%

Schröfl, *et al.* (2012) pesquisaram em diferentes tipos de PSA a influência do polímero na resistência à compressão obtendo os resultados apresentados na figura 2.29

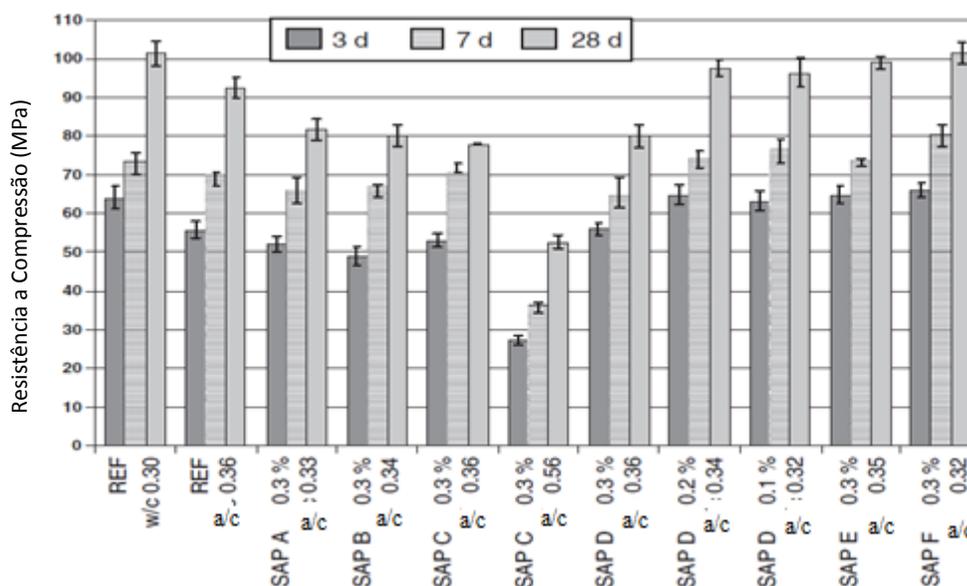


Figura 2.29 - Resistência à compressão das argamassas de referência e argamassas modificados com PSA e água para cura interna (modificado SCHRÖFL, *et al.*, 2012)

Para Schröfl *et al.* (2012) os resultados obtidos devem-se a uma liberação prematura de água nas misturas contendo PSA levando a uma diminuição considerável na resistência à

compressão, o que pode ser atribuído ao aumento da eficácia da relação água/cimento e subsequentemente maior porosidade da argamassa.

Nos estudos feitos por Craeye et al. (2011), as reduções apresentadas na resistência a compressão e resistência a tração provavelmente são devido à quantidade de água para cura interna adicionada aos concretos. Outra explicação que os autores dão a esta diminuição é pelo fato da mesma adição do polímero superabsorvente, pois este pode levar a uma maior quantidade de poros de maior dimensão (até 200 μ m) e uma redução da quantidade de poros menores que serão preenchidos com os produtos de hidratação. O PSA é um produto que atua como agente de cura interna, as bolhas de ar que ficam dentro do concreto podem ter um efeito desvantajoso sobre a sua resistência, pois vai gerar provavelmente vazios.

Pelo exposto, percebe-se que em geral o PSA promove alguma redução na resistência à compressão dos concretos. Na literatura estudada, a influencia do PSA na resistência à tração dos concretos não é muito explorada, ressalvas feitas ao trabalho desenvolvido por Mechtcherine et al (2006), Igarashi e Watanabe (2006) e mais recentemente por Craeye et al. (2011).

2.6.3 - Porosidade

Yao et al. (2011), determinaram que as partículas PSA podem evitar o encolhimento e, conseqüentemente reduzir as fissuras, mas, também ao falar sobre a distribuição de tamanho, as partículas PSA podem influenciar o desempenho do concreto afetando a estabilidade mecânica e a reologia do concreto.

Mechtcherine et al. (2009) realizaram experimentos a fim de determinar a porosidade e a distribuição dos tamanhos dos poros em concretos de alta resistência utilizando a técnica de intrusão por mercúrio. Foram realizados testes para idades de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias, utilizando nas sua investigação uma amostra de referência e outras amostras com relações água/cimento de 0,26 e 0,27 para teores de 0,3% de PSA e outra com 0,6% de PSA. Para todas as idades consideradas no experimento, o autor notou um aumento na porosidade das amostras de concreto com PSA (Figura 2.30).

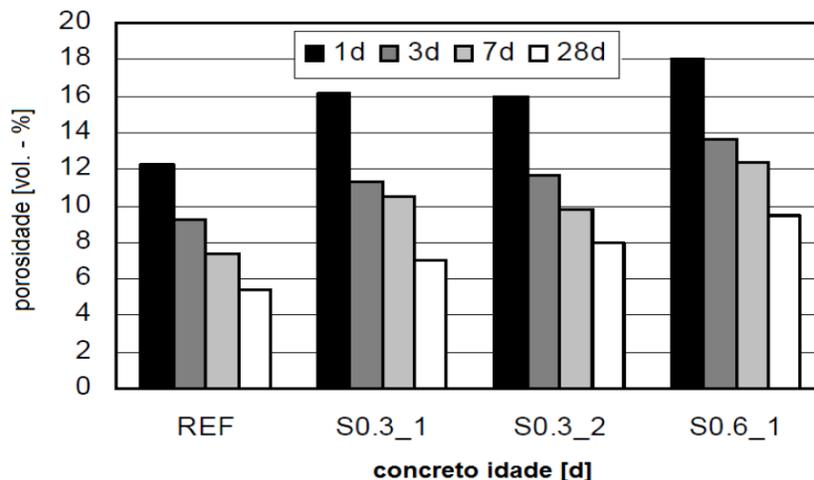


Figura 2.30 - Desenvolvimento da porosidade em função da composição do concreto de alta resistência e da idade. (MECHTCHERINE et al.,2009)

Também foram feitas medições em mm^3/g dos poros capilares e dos poros de gel, obtendo numa idade de 28 dias, para o concreto com 0,3% de PSA um aumento em relação ao concreto de referência, de 29% de volume dos poros de gel e 49% de volume dos poros capilares. Para o concreto com 0,6% de PSA os valores foram ainda maiores. (Figura 2.30). Os autores concluem que a adição de PSA ao concreto gera um aumento na porosidade total, enquanto o volume de poros capilares aumenta proporcionalmente em comparação ao aumento do volume de poros de gel.

2.6.4 - Trabalhabilidade

Segundo Schröfl *et al*, (2012), uma vez que o PSA absorve água da mistura, é muito importante compensar essa água (perdida) com a adição de água extra para garantir a trabalhabilidade requerida da mistura em estado fresco. Os autores investigaram a absorvidade do PSA ao adicionar nas misturas diferentes teores e tipos de PSA. Conforme a Figura 2.31, cada um das misturas requereu diferente quantidade de água extra (água para cura interna) para manter, em todas as misturas, a mesma trabalhabilidade desejada (19 ± 1)cm. A absorvidade tem sido considerada para o intervalo de 17 – 20 minutos após o contato inicial da água com os materiais secos (incluindo o PSA).

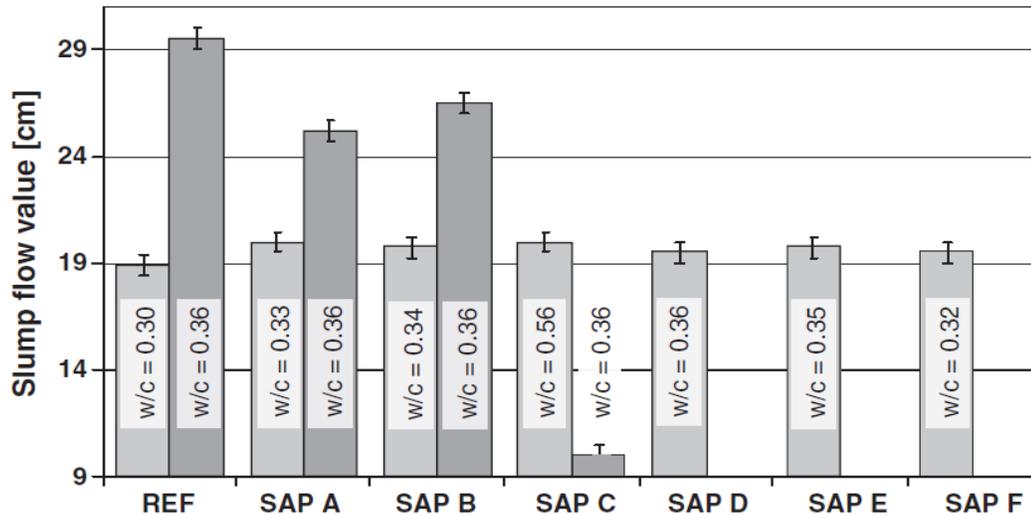


Figura 2.31 - Slump teste de argamassas com 0,3% e PSA ajustada a relação a/c como uma medida para compensar a perda da trabalhabilidade devido à capacidade de absorção de água dos polímeros (Espalhamento medido a partir do cone Hägermann, desvio ± 1 cm) (SCHRÖFL *et al.*, 2012)

Os autores concluíram que as quantidades de água necessárias para cura interna de argamassas contendo PSA muda dependendo do tipo de PSA e de sua capacidade para absorver água.

2.7 – Aditivo redutor de retração – ARR

Para fins comparativos, além dos traços utilizando na composição do concreto o polímero superabsorvente – PSA foram feitos dois outros traços com o aditivo redutor de retração – ARR.

Os aditivos químicos redutores de retração (Shrinkage Reducing Admixture - SRA) foi introduzido no mercado americano em 1995, a fim de modificar o mecanismo de retração por secagem, sem causar expansão (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

Existem diferentes tipos de ARR comercialmente disponíveis, os quais são similares em natureza agindo para a diminuição da tensão superficial do fluido nos poros da pasta de material cimentícios, mesmo sem ter igual composição química.

O ARR reduz a tensão superficial da água nos poros entre 2,5nm e 50nm RIXOM e MAILVAGANAM (1999). Isso ocorre pois suas substâncias agem na interface do líquido com as paredes dos capilares, diminuindo o ângulo de contato do menisco e conseqüentemente da tensão. Dessa forma, ao se reduzir a magnitude da tensão superficial da água do poro, obtém-se a redução da pressão capilar exercida pela mesma e, portanto, a diminuição da retração.

Em relação à dosagem do ARR, a literatura pesquisada recomenda a utilização de 1 a 2% em relação à massa de cimento. Estudos realizados por Balogh (1996), por Tomita (1992) e por Silva (2007), concluíram que o produto obtém melhores resultados na redução da retração quando adicionados nessa faixa de dosagem.

TAZAWA e MIYAZAWA (1995) perceberam que a porcentagem da redução da tensão superficial na solução corresponde aproximadamente à mesma diminuição da porcentagem da retração autógena.

Silva (2007) estudou a retração autógena em concretos de alto desempenho sem e com diferentes teores de ARR (em relação à massa de cimento), usando prisma de 2,5 x 2,5 x 28 cm. A determinação teve início após atingido o patamar de percolação (tempo zero), utilizando extensômetros. A dosagem empregada pela autora foi de 1 e 2% de ARR, concluindo que o teor de 2% de ARR foi o mais promissor que a dosagem de 1%, obtendo como média da retração autógena uma diminuição de 50% 1 e 3 dias, 40% com 7 e 28 dias, 35% aos 90 dias e 30% aos 120 dias. Portanto, para a autora, a eficácia da redução da tensão superficial da água dos poros diminuiu seu efeito ao longo do tempo, por que as moléculas do redutor de tensão superficial são absorvidas pelos produtos de hidratação.

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O programa experimental desta dissertação foi realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM/UnB), em Brasília, e com a colaboração dos laboratórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A, em Aparecida de Goiânia, para a determinação da transição suspensão sólido dos microconcretos estudados.

Neste capítulo apresentam-se as variáveis, os materiais, os concretos, assim como são descritos as metodologias implementadas para a obtenção dos resultados.

3.1.1 – Nomenclatura dos microconcretos

Para o programa experimental foi definido a fabricação de 7 microconcretos: 6 de alta resistência e 1 de resistência convencional. Dos 6 microconcretos de alta resistência, uma é a mistura de referência com relação a/c igual a 0,3, três misturas contendo o polímero superabsorvente PSA e duas misturas contendo o aditivo redutor de retração, para avaliar o efeito dessas estratégias mitigadoras da retração autógena em relação ao microconcreto de referência. Uma última mistura de referência com relação a/c mais elevada (a/c=0,5) compatível de um concreto de resistência convencional, foi realizada para fins comparativos com o traço de referência com relação a/c=0,3 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1- – Nomenclatura dos microconcretos

Abreviação	Descrição
REF 1	Mistura de referência com a/c = 0,3
PSA_0,3	Mistura contendo 0,3% de PSA em relação à massa de cimento
PSA_0,4	Mistura contendo 0,4% de PSA em relação à massa de cimento
PSA_0,6	Mistura contendo 0,6% de PSA em relação à massa de cimento
ARR_1	Mistura contendo 1% de ARR em relação à massa de cimento
ARR_2	Mistura contendo 2% de ARR em relação à massa de cimento
REF 2	Mistura de referência com a/c = 0,5

O microconcreto de referência com relação a/c igual a 0,3 (REF 1), adotado nesta pesquisa, foi proposta pelo comitê da RILEM TC 225 SAP para realização de ensaios interlaboratoriais, em 2012, com objetivo de investigar a eficácia de dois tipos distintos de PSA. O intuito de usar esse traço foi utilizar uma dosagem otimizada e de conhecida eficiência, evitando-se etapa de ajuste de traço que não era objeto desta pesquisa.

3.1.2 –Organograma dos microconcretos e ensaios

Para cada uma das sete misturas foram realizados os ensaios conforme Figura 3.1 e 3.2, onde está apresentado uma visão geral do programa experimental com a representação das variáveis e ensaios empregados para estudar o fenômeno da retração autógena, quando utilizado o polímero superabsorvente, o aditivo redutor de retração como estratégia para combatê-la.

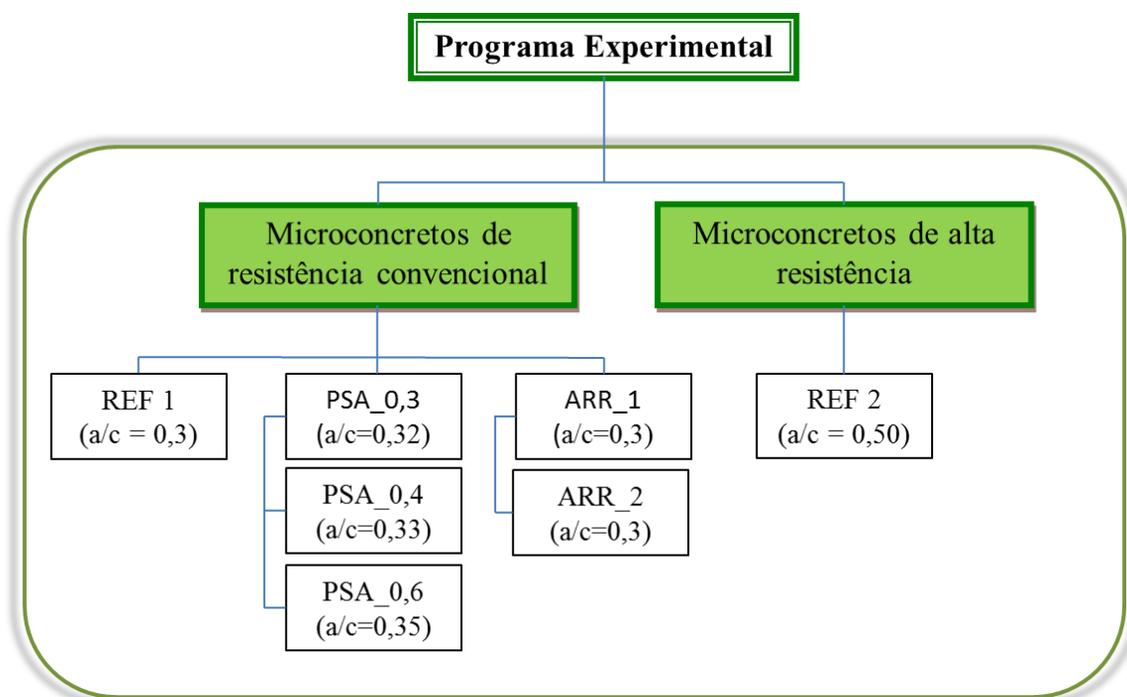


Figura 3.1 - Organograma dos microconcretos

A relação a/c dos microconcretos contendo PSA ficou levemente superior à do microconcreto de referência (REF 1) devido à necessidade de adição de água para cura interna, como descrito adiante no item 3.4.

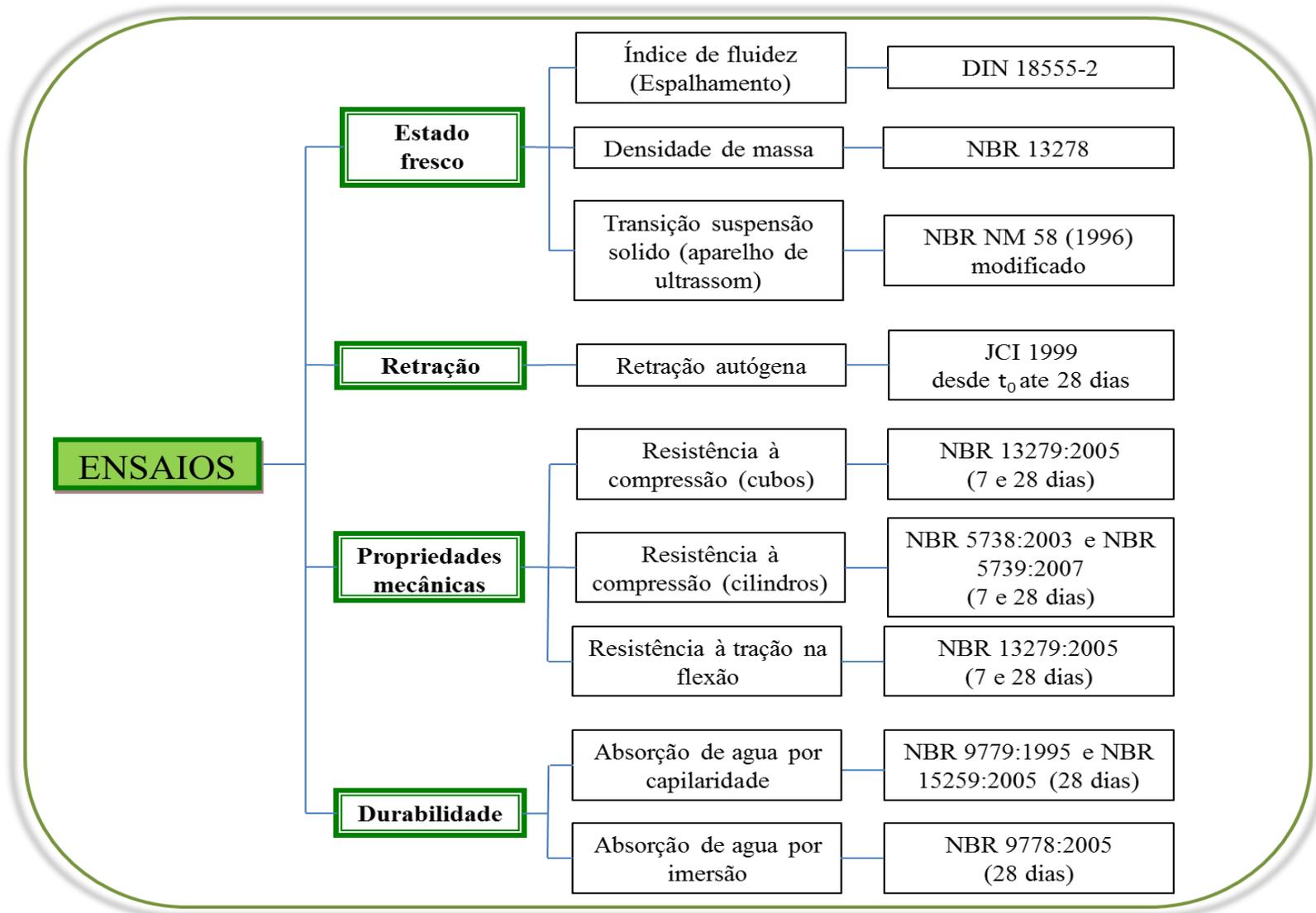


Figura 3.2 - Visão geral do programa experimental

3.2 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Entende-se por variáveis as características que são controladas, medidas ou manipuladas numa determinada pesquisa. Estas variáveis vão diferir em muitos aspectos, dependendo da forma como podem ser medidas e o papel que o pesquisador imprime à pesquisa.

As variáveis estudadas neste programa experimental, com vistas a atingir os objetivos propostos, estão divididas em variáveis dependentes e variáveis independentes.

As *VARIÁVEIS DEPENDENTES* ou também chamadas de variáveis de resposta, são aquelas que possibilitam a quantificação de características e propriedades relacionadas à qualidade do produto (RIBEIRO e TEM CATEN, 2001), e podem ser determinadas experimentalmente.

As variáveis dependentes são determinadas como objeto de estudo desta pesquisa (experimental), e estão relacionadas com o concreto. As variáveis dependentes definidas nesta pesquisa são:

- a) retração autógena;
- b) resistência a compressão;
- c) resistência à tração na flexão;
- d) absorção por capilaridade;
- e) absorção por imersão.

Tentou-se avaliar a influência dos fatores controláveis principalmente, frente ao fenômeno da retração autógena nos microconcretos de alto desempenho, objeto principal da pesquisa.

Os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão foram realizados com a finalidade avaliar os efeitos dos polímeros superabsorventes e do aditivo redutor de retração nelas. Estes ensaios foram realizados nas idades de 7 e 28 dias para analisar o comportamento dos microconcretos estudados em função do tempo. Os ensaios de absorção por capilaridade e absorção por imersão, foram realizados com a finalidade de se avaliar a durabilidade e os efeitos do PSA e do ARR.

Já os ensaios de retração autógena, principal tema nesta pesquisa, foram realizados a fim de avaliar a magnitude da variação dimensional presente nos diferentes microconcretos estudados, devido ao fenômeno, já exposto, da autodessecação.

As *VARIÁVEIS INDEPENDENTES* ou também chamadas de fatores controláveis, são aqueles subconjuntos de parâmetros do sistema, que podem exercer influência sobre as variáveis dependentes. A escolha destas e seu controle total são necessários, devido ao fato de obter a possibilidade de se verificar a real influência nas variáveis dependentes (RIBEIRO, TEM CATEN, 2001). A escolha das variáveis independentes baseou-se em conhecer principalmente sua influência na magnitude do fenômeno da retração autógena, objeto principal desta pesquisa. As variáveis independentes da pesquisa são as seguintes:

- a) teor de adição de polímero superabsorvente: 0,3%, 0,4%, 0,6% (em relação à massa de cimento);
- b) teor de aditivo redutor de retração: 1% e 2% (em relação à massa de cimento);
- c) relação água/cimento : 0,30 e 0,50
- d) idade (variável em função do ensaio);
- e) espalhamento.

Os teores empregados nessa pesquisa para o polímero superabsorvente e aditivo redutor de retração foram definidos após levantamento bibliográfico e correspondem ao intervalo de dosagem visual adotado na literatura técnica para mitigar a retração autógena, sem causar perdas expressivas nas propriedades do concreto.

3.3 MATERIAIS CONSTITUINTES E ENSAIOS

3.3.1 – Cimento

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento Portland CP V ARI (alta resistência inicial). O material foi proveniente de um mesmo lote e foi devidamente armazenado em sacos plásticos, permanente hermeticamente fechados, nas dependências do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB).

A Figura 3.3 apresenta a composição granulométrica do cimento usando, granulometro a laser. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotécnia da Universidade de Brasília.

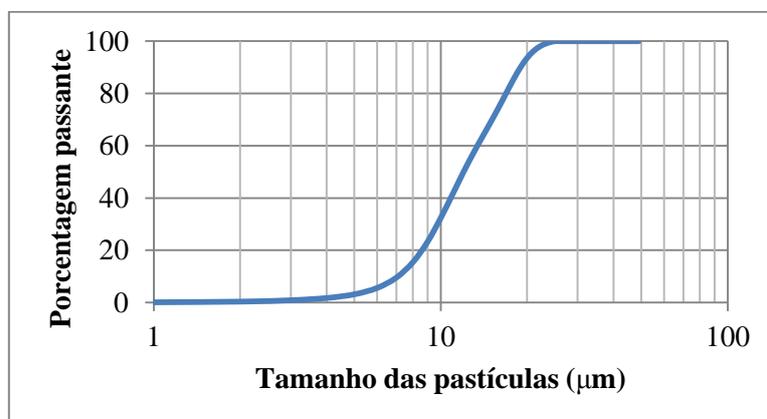


Figura 3.3 – Granulometria do cimento usando granulômetro a laser

A Tabela 3.2 e a Tabela 3.3 apresentam os resultados dos ensaios físicos, mecânicos e químicos do cimento utilizado na fabricação dos microconcretos. As características físicas e mecânicas do cimento utilizado foram realizadas no Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB) e as características químicas do material foram realizadas no Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A., (em Goiânia/GO).

Tabela 3.2- Caracterização física e mecânica do cimento realizada nos Laboratórios da Universidade de Brasília (LEM)

Ensaio	Unidade	Resultados	Limites NBR 5733	Referência normativa
Massa específica	g/cm ³	3,11	-	NBR NM 23:2000
Finura na peneira # 200	(%)	0,17	≤ 6,0	ABNT NBR 11579:1994
Tempo de início de pega	h	02:27	≥ 01:00	NBR NM 65:2002
Tempo de fim de pega	h	03:22	≤ 10:00	NBR NM 65:2002
Água de consistência – Pasta	(%)	32,4	-	NBR NM 43:2002
Resistência à compressão	1 dia	MPa	25,5	NBR 7214:1996
	3 dias	MPa	33,7	
	7 dias	MPa	42,4	
	28 dias	MPa	48,4	

Tabela 3.3 – Caracterização química do cimento realizada nos Laboratórios de FURNAS

Composição química	Teores (%)	Limites NBR 5733	Referência normativa
Perda ao fogo	2,19	≤ 4,5	NBR NM 18:2012
Resíduo insolúvel	0,61	≤ 1,0	ABNT NBR 15:2004
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,79	≤ 3,5	NM 16:2004
Óxido de magnésio (MgO)	0,79	≤ 6,5	NM 11-2:2004
Dióxido de silício (SiO ₂)	20,98	-	NM 11-2:2004
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,12	-	NM 11-2:2004
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,66	-	NM 11-2:2004
Óxido de cálcio (CaO)	64,17	-	NM 11-2:2004
Óxido de cálcio livre (CaO)	2,1	≤ 3,0	NBR 5748:1993
Álcalis Totais	óxido de sódio (Na ₂ O)	0,53	NBR 5747:2004 ou IT.DCT.TC.403
	óxido de potássio (K ₂ O)	1,46	NBR 5747:2004 ou IT.DCT.TC.403
	Equiv. alcalino	1,49	IT.DCT.TC.403
Álcalis Solúveis em Água	óxido de sódio (Na ₂ O)	0,08	NBR 5747:2004 ou IT.DCT.TC.403
	óxido de potássio (K ₂ O)	0,78	NBR 5747:2004 ou IT.DCT.TC.403
	Equiv. alcalino	0,59	IT.DCT.TC.403
sulfato de cálcio (CaSO ₄)	4,74	-	NBR NM 16:2012

Referente aos resultados da composição química do cimento pode-se observar que se tem um resíduo insolúvel baixo e não se tem um material pozolânico, o que era de esperar devido a que é um cimento CP V. Os teores de oxido de cálcio e oxido de magnésio estão em níveis aceitáveis o que provavelmente não irão causar reação expansiva do cimento devido a hidratação tardia destes compostos (CaO e MgO).

Em relação ao filler, ele pode ser incorporado no teor de ate 5% nesse tipo de cimento (CPV). A verificação do teor de filler calcário incorporado no cimento Portland pode ser verificada pelo teor de anidrido carbônico que não é apresentado nesta análise química.

Escolheu-se o cimento CP V, pois se queria um cimento com o menor teor de adição mineral possível para minimizar o efeito da adição mineral na retração autógena.

3.3.2 – Silica ativa

Utilizou-se sílica ativa nacional, comercialmente disponível em pó e do tipo densificada. Tem uma concentração fixada em 10% em relação à massa de cimento.

A Figura 3.4 apresenta a composição granulométrica da sílica ativa usando granulômetro a laser. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotécnia da Universidade de Brasília.

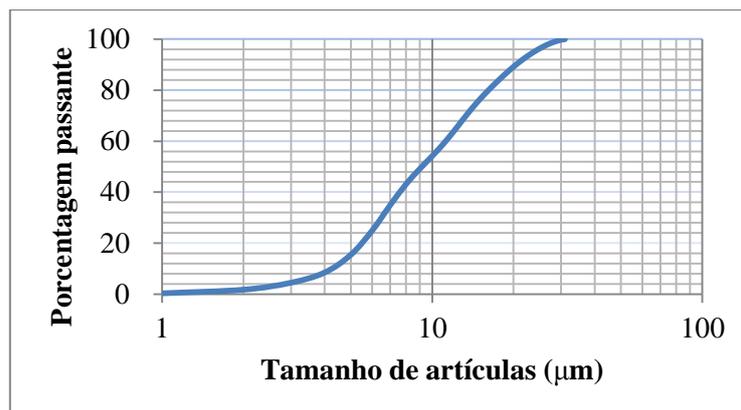


Figura 3.4 – Granulometria da sílica ativa usando granulômetro a laser

O diâmetro médio correspondente à fração acumulada de 50% das partículas equivale a 0,24 µm.

A Tabela 3.4 e a Tabela 3.5 apresentam os resultados dos ensaios físicos e químicos da sílica ativa utilizada na fabricação dos microconcretos. Os ensaios constantes na Tabela 3.4 e na tabela Tabela 3.5 foram realizados, respectivamente, no Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB) e no laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A., em Goiânia.

Tabela 3.4 – Propriedades físicas da sílica ativa

Propriedade	Unidade	Resultado	Técnica
Aspecto	-	pó	-
cor	-	Cinza escuro	-
Massa específica	g/cm ³	2,22	Picnômetro
Conteúdo de cloro	-	isento	

Tabela 3.5 – Características químicas da sílica ativa realizadas nos Laboratórios de FURNAS

Propriedades determinadas		Teores	Limites NBR 13956:2012	Método de ensaio	
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo	3,07	≤ 10,0	NM 18:2004	
	trióxido de enxofre (SO ₃)	0,03	≤ 4,0	-	
	óxido de magnésio (MgO)	0,69	---	NM 11-2:2004	
	dióxido de silício (SiO ₂)	92,06	---	NM 11-2:2004	
	óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,44	---	NM 11-2:2004	
	óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,06	---	NM 11-2:2004	
	óxido de cálcio (CaO)	1,23	---	NM 11-2:2004	
	Álcalis Totais	óxido de sódio (Na ₂ O)	0,45	---	IT.DCT.TC.403
		óxido de potássio (K ₂ O)	0,92	---	IT.DCT.TC.403
		Equiv. alcalino	1,06	---	IT.DCT.TC.403
Umidade	0,40	≤ 3,0	-		
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃		92,56	> 70,0	-	

Os ensaios químicos da sílica ativa encontram-se dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR 13956:2012 para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta.

3.3.3 –Agregado miúdo

Produto comercial local, de origem natural, proveniente do depósito aluvial do rio Corumbá. A areia foi caracterizada pelos ensaios de composição granulométrica, massa específica, material fino que passa na peneira 75 µm. A distribuição granulométrica Tabela 3.6 e Figura 3.5 apresentou-se dentro dos limites da zona utilizável da ABNT NBR 7211:2009 e pelas sugestões do Comitê organizador da RILEM TC 225-SAP.

Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo

Pen (mm)	Amostra 1			Amostra 2			% Retida média	% Retida acumulada média
	Amostra (g)	% retida	%Retida acumulada	Amostra (g)	% retida	%Retida acumulada		
6,3	0,64	0,1	0	2,01	0,2	0	0,13	0,1
4,8	1,79	0,2	0	2,19	0,2	0	0,20	0,3
2,4	62,63	10,3	10	106,81	10,7	11	8,47	10,8
1,2	161,42	20,1	30	225,73	22,6	34	19,36	32,2
0,6	208,87	20,9	51	221,98	22,2	56	21,55	53,7
0,3	194,24	17,4	68	169,19	16,9	73	18,18	70,9
0,15	193,63	17,4	86	148,01	14,8	88	17,09	87,0
0,075	125,5	9,6	96	89,3	8,9	97	10,74	96,2
Fundo	50,98	4,1	100	34,53	3,5	100	4,28	100,0
Total	999,7	100		999,75	100		100	
Modulo de finura - NM 248 (ABNT, 2001)							2,55	
Dimensão máxima característica (mm) - NM 248 (ABNT,2001)							4,8	
Massa específica (Kg/dm ³) - NM 52 (ABNT, 2009)							2,6	

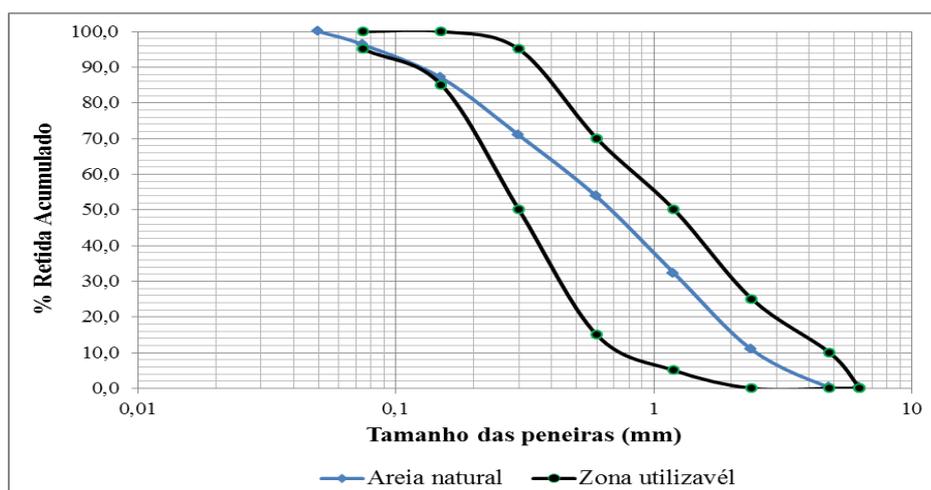


Figura 3.5 – Distribuição granulométrica da areia natural de rio

3.3.4 – Aditivos

O aditivo superplastificante empregado foi de terceira geração, com concentração de 1,8% em relação à massa de cimento. Encontra-se disponível em solução aquosa, desenvolvido para a obtenção de uma trabalhabilidade aceitável para a obtenção de concretos de alto desempenho.

O aditivo redutor de retração usado para mitigar a retração autógena é um líquido, não expansivo, base glicol, com o objetivo de diminuir a tensão superficial nos poros capilares do concreto.

Na Tabela 3.7 encontram-se as principais características do aditivo superplastificante e do ARR.

Tabela 3.7 – Caracterização dos aditivos

Nome	Cor	Massa específica	Ph	Teor de sólidos	Base química
Superplastificante	Castanho claro	1,110 g/cm ³	6	-	Policarboxilato
ARR	Bege	1,00 g/cm ³	11,36	0,5 a 2% (desprezível)	Policarboxilato

3.3.5 – Polímero Superabsorvente

O PSA usado foi constituído de ácido acrílico como monômero principal, potencialmente um acrilamida. Ele tinha alta quantidade de grupos aniônicos com altas densidades de ligações cruzadas. O PSA apresentava partículas esféricas produzidas usando a técnica de polimerização por suspensão inversa. A distribuição de partícula do PSA no estado seco é mostrada na Figura 3.6. O polímero foi produzido por SNF Floerger, Andreziux Cedex/Franca e foi fornecido na forma seca de pó seco.

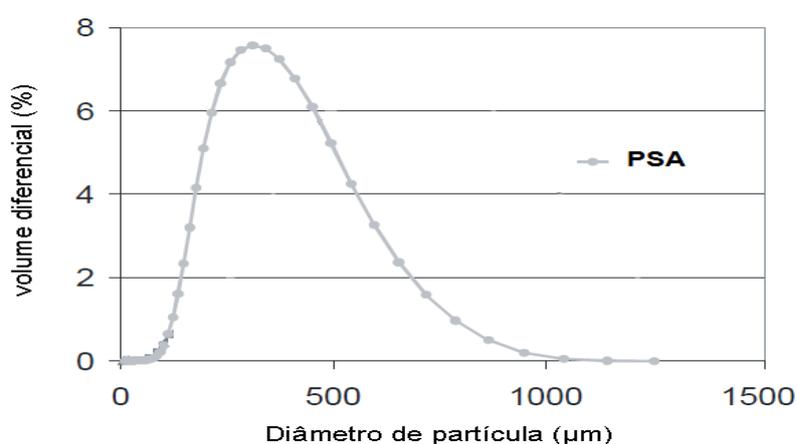


Figura 3.6 – Distribuição do polímero superabsorvente – PSA (MECHTCHERINE *et al.*, 2013)

Na Figura 3.7 apresenta-se o polímero superabsorvente utilizado, seco e depois molhado, visto pelo microscópio marca Olympus BX60, com um aumento de 40X.

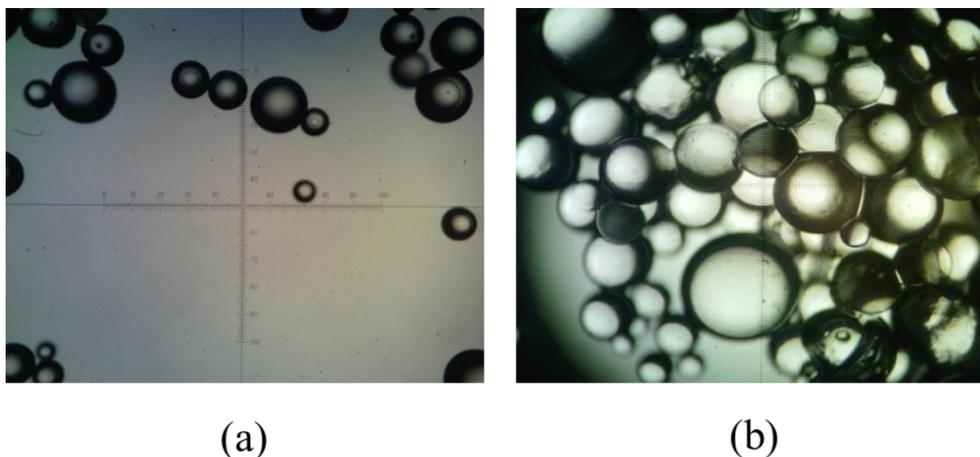


Figura 3.7– Polímero superabsorvente (a) Seco, (b) molhado (com aumento de 40x)

3.4 – Composição dos microconcretos e procedimentos de mistura

A composição dos microconcreto de referência foi proposta pelo comitê organizador da RILEM TC 225-SAP para realização dos ensaios interlaboratoriais pelos membros desse comitê (Tabela 3.8). A relação a/c estabelecida de 0,3 é usual para concretos de alta resistência.

Tabela 3.8 – Composição do microconcreto de referência (REF 1)

Componentes	Massa (kg/m ³)	Volume (l/m ³)
Cimento CPV ARI	700	222,9
Sílica ativa (dosagem 10% em relação à massa de cimento)	70	30,0
Areia Lavada de rio	1218	459,6
Aditivo superplastificante (dosagem 1,8% em massa em relação à massa de cimento)	12,6	11,5
Água, água/cimento = 0,3	210	210,0
Ar		20,0

A composição do microconcreto de referência com relação a/c igual a 0,5 (REF 2) é apresentada na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Composição do microconcreto REF 2

Componentes	Massa (kg/m³)	Volume (l/m³)
Cimento CPV ARI	442	142,1
Sílica ativa (dosagem 10% em relação à massa de cimento)	44,2	19,9
Areia Lavada de rio	1603,2	616,6
Aditivo superplastificante (dosagem 1,8% em massa em relação à massa de cimento)	7,9	7,1
Água, água/cimento = 0,3	220,8	220,8
Ar		

Na Tabela 3.10 é apresentada a sequência para mistura dos materiais constituintes dos microconcretos. A composição dos microconcretos e o procedimento de mistura foram estabelecidos para se obter espalhamento de 190 ± 10 mm, determinado no ensaio de índice de consistência pelo tronco de cone sem os golpes de acordo com a DIN 18555-2.

Tabela 3.10 - Roteiro para mistura do microconcreto

Sequência (min)	Ação	Duração de cada etapa (min)
00:00 – 04:00	Homogeneização dos componentes secos (incluindo o PSA)	4
04:00 – 05:00	Adição de água, incluindo o superplastificante pré-dissolvido	1
05:00 – 08:00	Mistura	3
08:00 – 09:00	Raspagem dos aglomerantes presos as paredes do misturador	1
09:00 – 12:00	Mistura (incluindo o ARR)	3

Nos microconcretos contendo o aditivo redutor de retração (fornecido na forma de líquido viscoso), o aditivo foi adicionado após o término da mistura, na última etapa do procedimento de mistura apresentado na Tabela 3.9. Os teores de ARR usados na pesquisa (1% e 2%) não elevou a consistência dos microconcretos para além do intervalo de espalhamento especificado (190 ± 10 mm).

Nos microconcretos contendo o polímero superabsorvente (fornecido em pó seco), o polímero foi pré-misturado aos demais materiais secos da mistura, durante a primeira etapa do procedimento de mistura apresentado na Tabela 3.8.

Para esses microconcretos, fez-se necessária a adição de água extra na mistura, chamada de “água para cura interna”, a fim de manter a consistência dentro do intervalo especificado.

Esse incremento foi necessário pelo fato do PSA ser constituído de partículas com elevada finura e alta capacidade de absorver água da mistura (e devolvê-la na hidratação do cimento), o que reduz a fluidez do microconcreto.

Devido à essa adição os microconcretos contendo PSA apresentam relação a/c superior à do microconcreto de alta resistência de referência (REF 1). A quantidade de água para cura interna variou em função da dosagem de PSA adicionado à mistura.

Após a adição de água extra, os microconcretos contendo 0,3%, 0,4% e 0,6% de PSA exibiram relação a/c iguais a 0,32, 0,33 e 0,35 respectivamente (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Relação a/c e $(a/c)_i$ dos microconcretos com PSA

Teor de PSA	a/c	$(a/c)_i$
REF 1	0,3	-
PSA_0,3	0,3	0,02
PSA_0,4	0,3	0,03
PSA_,6	0,3	0,05

O cálculo aproximado da quantidade de água necessária para cura interna foi realizado utilizando o modelo empírico de Powers (item 2.4 e 2.4.1) e determinou-se a relação a/c máxima proposta neste modelo.

O Modelo de Powers propõe que a água necessária para cura interna de misturas com relação $a/c \leq 0,36$ deve ser calculada utilizando a Equação 13. Portanto, para a relação água cimento de 0,30, obteve-se o valor de 0,054 como relação máxima necessária para cura interna, como demonstrado a seguir:

$$(a/c)_i = 0,18 \times (a/c)$$

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

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

Portanto, o valor de 0,054 foi utilizado como parâmetro para o cálculo de $(a/c)_i$ dos microconcretos com PSA. Ou seja, foi realizado um traço teste no qual a água foi adicionada em pequenas quantidades até que o espalhamento atingisse um valor dentro do intervalo desejado de acordo com o ensaio de espalhamento de tronco de cone. Dessa

forma foi determinada a quantidade de água necessária para atingir o espalhamento, para cada um dos microconcretos que continham PSA.

Após a mistura prosseguiu-se com a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de determinação do tempo zero (ultrassom), ensaio de determinação da retração autógena, ensaios para determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade.

3.5 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS

3.5.1 - Determinação do espalhamento pelo método do tronco de cone

O ensaio de espalhamento pelo método do tronco de cone foi realizado no cone de HAGERMANN de acordo com DIN 18555-2, sem os golpes, especificado para os ensaios interlaboratoriais Figura 3.8.

O ensaio consiste na determinação do espalhamento utilizando um tronco de cone de aço inoxidável de 60 mm de altura, com um raio interno de 100 mm na parte inferior e 70 mm na parte superior. A base onde é realizado o ensaio e a superfície interna do tronco de cone foram previamente limpas com pano úmido. A colocação do microconcreto no tronco de cone foi feito em duas camadas, de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 10 golpes uniformemente, com um soquete normal, homogeneamente distribuídos.

Terminada esta operação, foi realizado a rasamento do topo do tronco de cone, por meio de uma espátula. Depois de aproximadamente 15 segundos foi levantado lentamente o tronco de cone (Figura 3.8b) para fazer a leitura do espalhamento sem os golpes (Figura 3.8c).

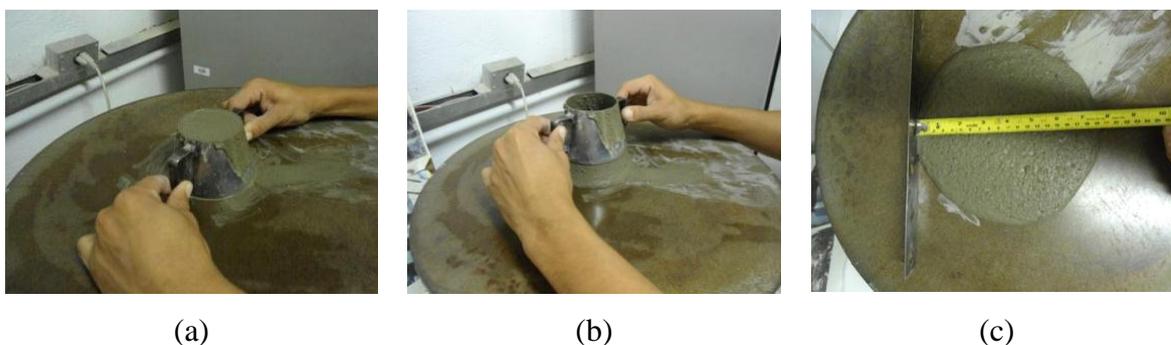


Figura 3.8 - (a) Moldagem, (b) Retirada do tronco de cone, (c) Determinação do espalhamento

O ensaio de espalhamento também foi realizado de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 13276:2005, com os golpes, onde o molde tronco-cônico tem $65\pm 0,5$ mm de altura, com um raio interno de $125\pm 0,5$ mm na parte inferior e $80\pm 0,5$ mm na parte superior. O ensaio foi realizado a fim de obter os resultados de acordo com a norma brasileira.

3.5.2 - Determinação do tempo zero pelo método do pulso ultrassônico

O ensaio para a determinação do tempo zero foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 8802:1994. Nesta pesquisa foram utilizados corpos-de-prova prismáticos com dimensão longitudinal de 300 mm e dimensão transversal de 150 mm as quais se encontram no intervalo proposto pela RILEM NDT 1 (1972) e a ABNT NM 58:1996.

O ensaio consiste na determinação do tempo de propagação de uma onda emitida pelo aparelho de ultrassom, que passa pelo corpo-de-prova através de transdutores-receptores que são acoplados nas extremidades do molde retangular, conforme mostrado na Figura 3.9. Desta forma, tendo o tempo em que a onda se propaga pelo corpo-de-prova obtém-se a velocidade de propagação dividindo o comprimento do corpo pelo tempo de propagação da onda.

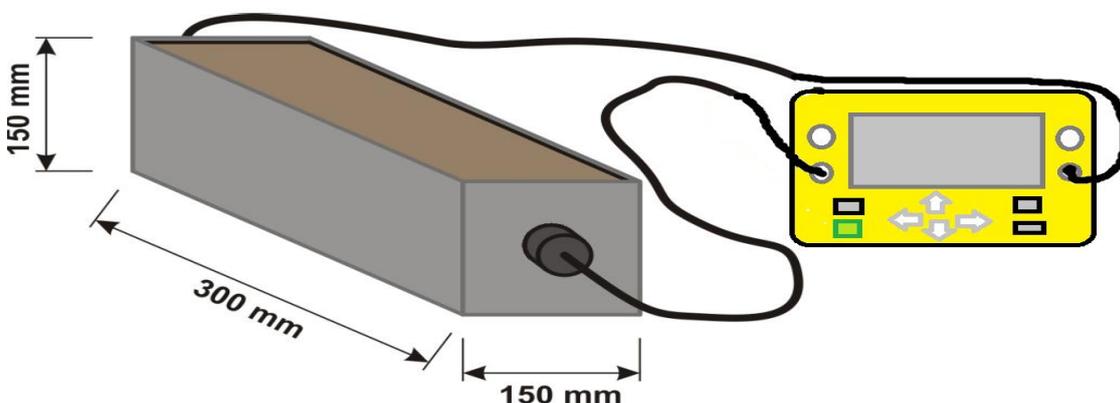


Figura 3.9 - Esquema do ensaio para determinação do tempo zero através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (modificado Rodrigues, 2009)

Foi necessário aplicar uma camada fina de gel de silicone nas faces dos transdutores, a fim de garantir um contato contínuo entre as superfícies dos transdutores e o concreto. Os procedimentos que se adotaram no trabalho para a realização do ensaio para medida da velocidade ultra-sônica podem ser visualizados na Figura 3.10.

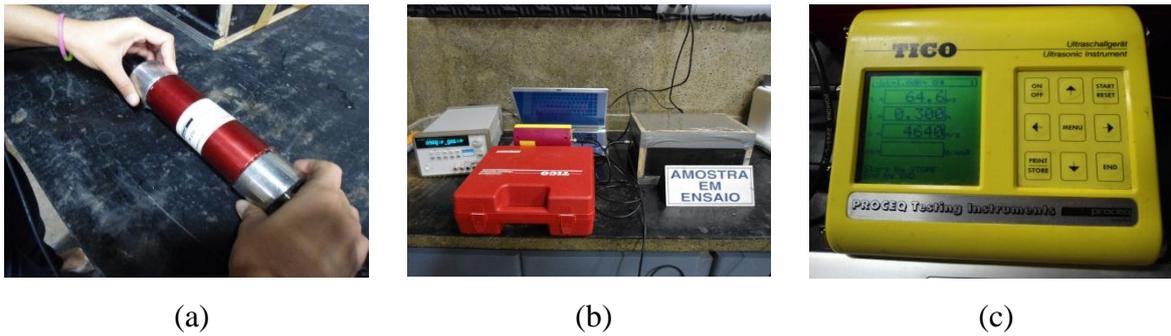


Figura 3.10- (a) Calibração dos transdutores, (b) Vista dos transdutores acoplados ao corpo-de-prova, (c) realização das leituras

Após diversas tentativas para a determinação do t_0 no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB), usando o aparelho de ultrassom marca James Instrument INC® com transdutores de 50mm de diâmetro e frequência de 54 KHz, não foi possível sua determinação porque o equipamento disponível não registro nenhuma velocidade durante os ensaios.

Os ensaios para a determinação do tempo zero (t_0) foram realizados no Laboratório de FURNAS Centrais Elétricas S.A, em Aparecida de Goiânia, por Claro e Saraiva (2013) utilizando os mesmos materiais desta pesquisa. Os procedimentos de ensaio e a determinação das curvas para o cálculo do patamar de percolação se encontram descritos no trabalho de Carvalho e Saraiva (2013).

3.5.3 - Ensaio de densidade no estado fresco

A densidade dos microconcretos foi determinada conforme procedimento da NBR 13278:2005. O ensaio consiste na razão entre a massa do microconcreto pesado e o volume necessário para preencher um recipiente de volume conhecido. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB) (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Pesagem do recipiente de volume conhecido para a determinação da densidade dos microconcretos

3.5.4 - Retração autógena medida com extensômetro

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi a adotada por Silva (2007), a partir de prescrições da JCI. Para cada um dos seis traços selecionados, foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 75mm x 75mm x 285mm. As formas foram metálicas e foram forradas em suas faces internas com material anti-aderente (folha de poliestireno, com espessura de 3mm), para diminuir o atrito do corpo-de-prova com a forma, permitindo a movimentação livre do microconcreto de forma que esta não fosse restringida (Figura 3.12).

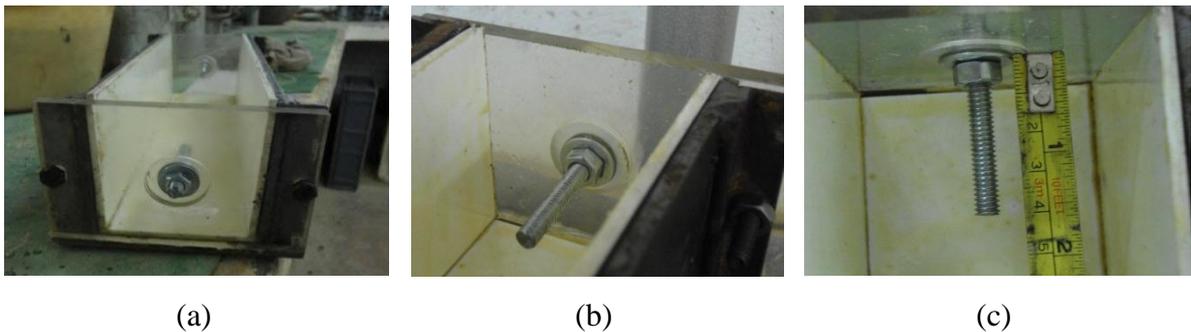


Figura 3.12 - (a) Posicionamento do pino nas faces da forma. (b) Pino Metálico e Folha de poliestireno (c) Medição para determinação da distância G

Nas extremidades das placas laterais dos corpos-de-prova, foi inserido um pino metálico, que coincide com o eixo longitudinal do molde. A distância interna entre as extremidades dos pinos é medida com o auxílio de um paquímetro digital, antes de preenchê-los com o microconcreto. Essa medida corresponde ao valor de “G” (Figura 3.13).

Depois de tomar a medida interna G , entre os dois pinos da forma, se procedeu à moldagem dos corpos-de-prova. As três formas foram preenchidas com microconcreto proveniente da mesma betonada, em duas camadas e adensadas com mesa vibratória três vezes durante 5 segundos, com cuidado, para não mudar a posição dos pinos. Em seguida, os três corpos-de-prova são envoltos em 15 camadas de filme plástico e reforço nas bordas com fita adesiva para evitar a perda de água. Após o termino do isolamento, são posicionados sobre uma placa metálica disposta sobre uma bancada, situada numa sala climatizada, com temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $48 \pm 2\%$, para iniciar a determinação das variações dos comprimentos dos corpos-de-prova (Figura 3.14).

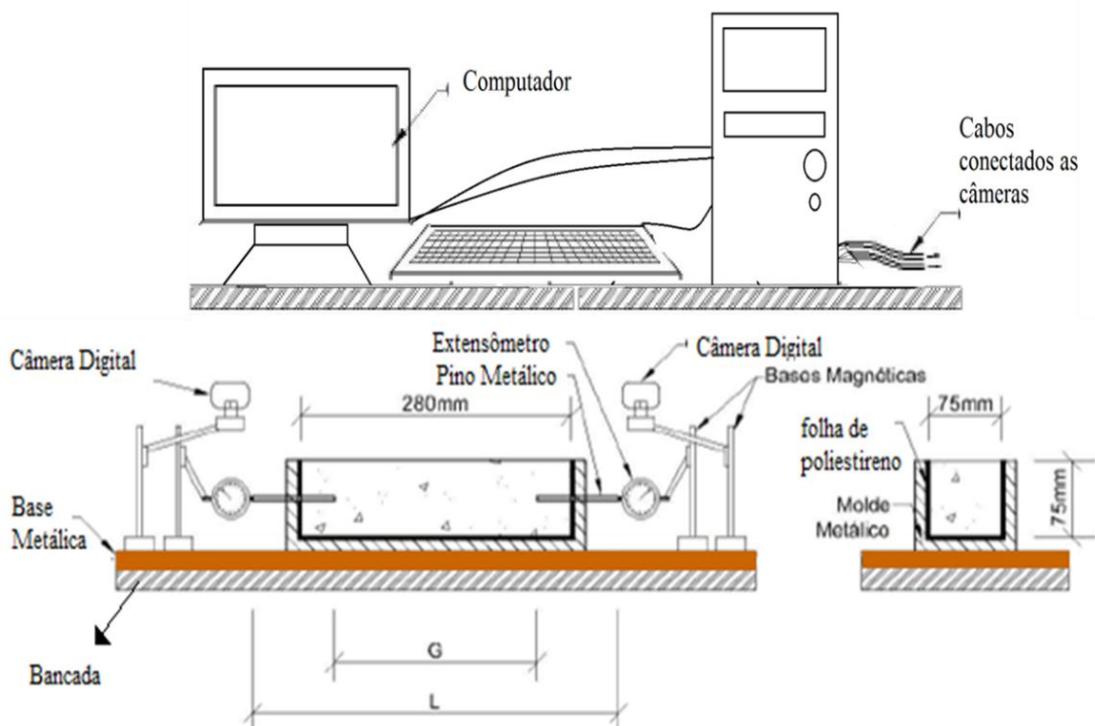


Figura 3.13 - Esquema da metodologia utilizada neste trabalho para a determinação da retração autógena (modificado SILVA, 2007)

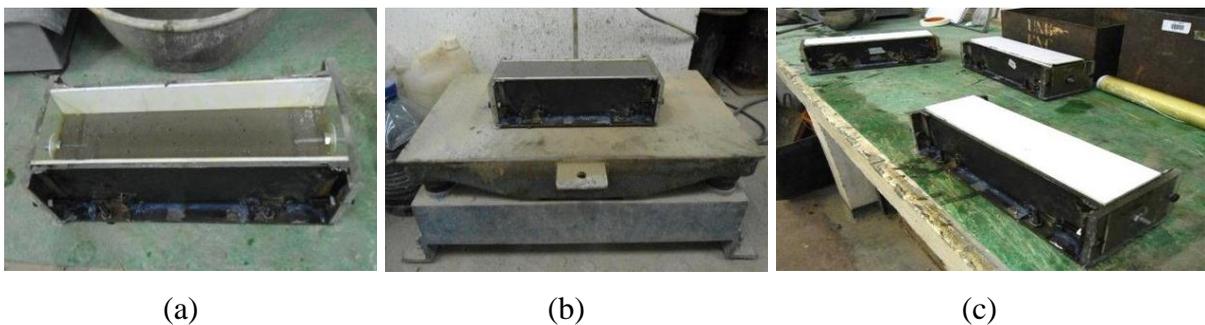


Figura 3.14 - (a) Preenchimento das formas metálicas (b) Adensamento na mesa vibratória (c) Formas prontas para envolvimento com filme plástico

Cada forma metálica é posicionada com 2 extensômetros como ilustrado na Figura 3.15. As bases metálicas de cada extensômetro servem de suporte e foram fixadas sobre a placa metálica depois de acoplar os pinos metálicos dos corpos-de-prova aos extensômetros logo após o tempo zero, determinado pelo ensaio de pulso ultrassônico.

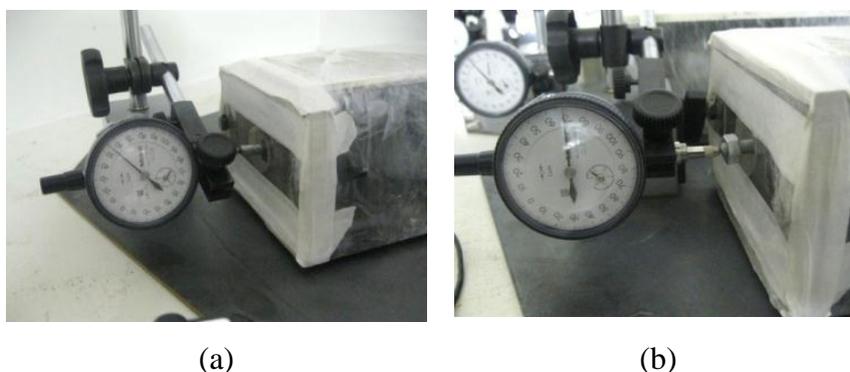


Figura 3.15 - (a) Posicionamento do extensômetro (b) Detalhe da ligação entre extensômetros e pinos metálicos

Antes de posicionar os extensômetros, as porcas das faces externas têm que ser removidas, para permitir a movimentação livre dos pinos metálicos.

As leituras foram registradas através de fotos capturadas dos extensômetros por câmeras digitais, utilizando o software Yawcam®. O software permite capturar imagens automaticamente em qualquer intervalo de tempo desejado e também a utilização de mais de uma câmera simultaneamente ao computador. As leituras foram realizadas a partir do tempo zero até a idade de 28 dias. (Figura 3.16).

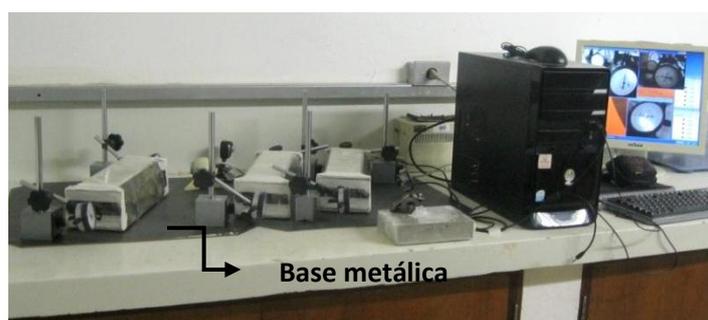


Figura 3.16 - Ensaio retração autógena

Antes da colocação dos extensômetros e após a retirada aos 28 dias, cada forma mais corpo de prova foi pesado para verificar a perda de massa de água. O cálculo para obtenção dos

valores da deformação relativa de comprimento dos corpos-de-prova a partir das leituras realizadas foi calculada conforme a o apresentado no item 2.3.4.1 utilizando a equação 5.

3.5.5 - Resistência à Compressão dos cilindros

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em cilindros de 5 cm x 10 cm de acordo com as normas ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007, cada corpo-de-prova foi moldado em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformemente com o soquete normal, homogeneamente distribuídos. Ao terminar esta operação, foi feito o rasamento do topo dos corpos-de-prova. Foram moldados um total de 14 corpos de prova de cada traço que foram ensaiados aos 7 e 28 dias.

Após a moldagem, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida por 24h. Depois deste tempo, eles foram desmoldados, identificados, embalados com filme plástico e armazenados em sala climatizada até a data de ruptura. Antes do ensaio os corpos de prova tiveram seu topo e base retificados para depois ser ensaiados (Figura 3.17).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de resistência mecânica foi uma prensa de marca Forney, classe 0,5 de capacidade de 100 toneladas. A prensa possui um medidor digital de carregamento para fazer as leituras dos ensaios e tem um indicador de pico marca Forney.

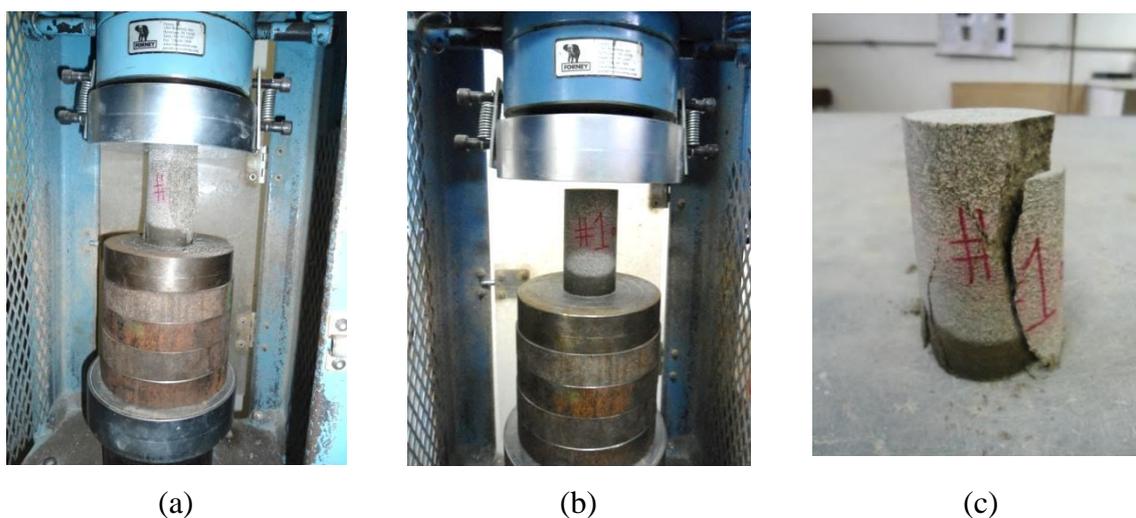


Figura 3.17 – Ensaio de resistência à compressão: a) ensaio, b) ruptura e c) corpo-de-prova depois da ruptura

3.5.6 - Resistência à Compressão dos cubos

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2005. Foram utilizadas as metades dos corpos de prova usadas no ensaio de resistência à tração na flexão, posicionando-as de modo que recebessem a carga axial de 500 ± 50 N/s, apoiados em seções quadradas metálicas (Figura 3.18). Foram rompidos 18 corpos de prova para as idades de 7 e 28 dias.

O ensaio foi realizado depois de ter feito o ensaio de resistência à tração na flexão.



Figura 3.18– Ensaio de resistência à compressão dos cubos: a) ensaio e b) corpos-de-prova depois da ruptura

3.5.7 - Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2005. Para a moldagem dos corpos-de-prova prismáticos, cada molde foi colocado sobre uma mesa de adensamento e fixado adequadamente. Foram moldados em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 quedas da mesa de adensamento. Ao terminar esta operação, foi feito o arrasamento do topo dos corpos-de-prova.

Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram nos moldes durante 24h. Depois deste tempo, eles foram desmoldados, identificados, embalados com filme plástico e armazenados em sala climatizada até a data de ruptura.

Este ensaio consiste em aplicar uma carga de 50 ± 10 N/s em corpos de prova de 4 cm x 4 cm x 16 cm, na horizontal, até a ruptura (Figura 3.19). A resistência à tração na flexão é determinada através da Equação 15.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3} \quad \text{Eq. (15.)}$$

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons;

L = distância entre os suportes, em milímetros.

Foi estabelecida a moldagem de 18 prismas, dos quais a metade foi rompida com 7 dias e os outros 9 rompidos com 28 dias.



(a)



(b)

Figura 3.19 – Ensaio de resistência à tração na flexão: a) ensaio e b) ruptura

3.5.8 - Determinação da absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 9779:1995 e a ABNT NBR 15259:2005. Foram utilizados corpos de prova prismáticos com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm, os quais foram embalados com filme plástico e armazenados numa sala climatizada até a idade de 28 dias. Como preparação para o ensaio, os corpos de prova foram secos em estufa por 72 horas a 100°C. Após a

estabilização da massa, os exemplares foram dispostos em contato com uma lâmina de água de aproximadamente 5 mm, como mostra a figura 3.20.

A massa dos corpos de prova foi registrada após 10 minutos, 90 minutos, 24 horas, 48 horas e 72 horas após o início do ensaio.

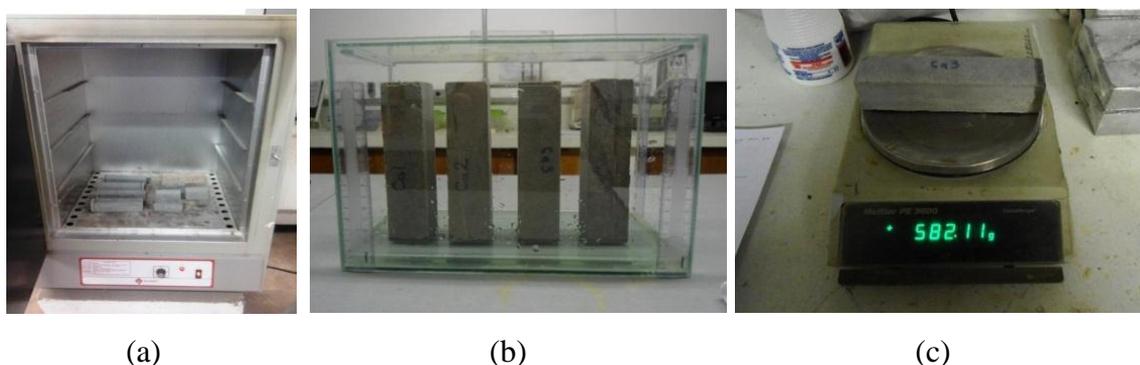


Figura 3.20 - (a) Secagem na estufa dos corpos-de-prova (b) Corpos-de-prova com a lâmina de água de aprox. 5 mm (c) Pesagens dos corpos-de-prova

3.5.9 - Determinação da absorção de água por imersão

A determinação da absorção de água por imersão foi realizada de acordo com a ABNT NBR 9778:2009. Foram utilizados metades de corpos de prova prismáticos, os quais depois da desmoldagem foram embalados com filme plástico e armazenados numa sala climatizada até a idade de 28 dias. Depois foram secados na estufa durante 72 horas. Ao retirar as amostras da estufa e esfriadas, elas foram mantidas com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4 horas, 2/3 nas 4 horas subsequentes e totalmente imersas nas 64 horas restantes (Figura 3.21).

As pesagens das amostras foram realizadas decorridas 24, 48 e 72 horas de imersão.

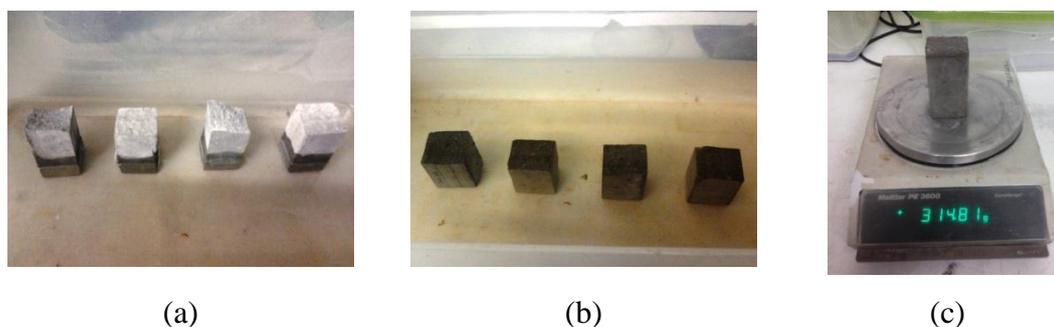


Figura 3.21 - (a) Corpos de provas imerso em 1/3 de seu volume (b) Corpos de prova imerso totalmente (c) Pesagens dos corpos-de-prova

4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

4.1.1 - Ensaio de espalhamento – diâmetro de espalhamento

Em todas as misturas o teor de aditivo superplastificante manteve-se constante a fim de obter experimentalmente o mesmo intervalo de espalhamento para manter um parâmetro constante de comparação. Nas misturas onde o espalhamento não se encontraram no intervalo desejado (190 ± 10 mm) modificaram-se o valor da relação água/cimento para cura interna até obter o valor desejado (misturas com PSA).

A Figura 4.1 contém os resultados de espalhamento de cada um dos microconcretos (REF 1, PSA_0,3, PSA_0,4, PSA_0,6, ARR_1, ARR_2 e REF 2). Os resultados de espalhamentos são referentes à média de três determinações realizadas. A determinação do espalhamento foi realizada imediatamente depois do término da mistura.

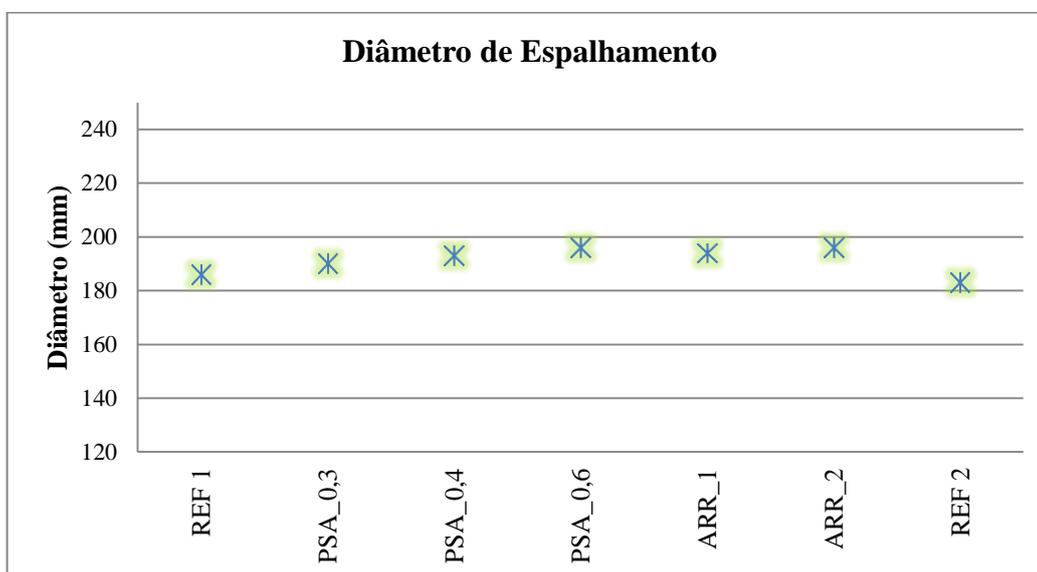


Figura 4.1– Diâmetro médio de espalhamento dos microconcretos

Os valores de espalhamento situaram-se dentro do intervalo proposto de 190 ± 10 mm. Para os microconcretos contendo PSA foi necessário ajustar a quantidade de água para cura interna a fim de obter o espalhamento desejado.

Nas misturas com PSA pode-se observar que a quantidade de água para cura interna foi à necessária para atingir o espalhamento desejado, pois os valores de espalhamento foram muito parecidos. Em trabalhos futuros, recomenda-se fazer ensaios para conhecer a porcentagem de absorção do PSA e do tempo exato de absorção de água pelo polímero para se ter com maior precisão o valor exato de água a adicionar.

Os traços com PSA tornaram-se pouco trabalháveis, ocasionando uma perda de espalhamento precisando de constante mistura para a moldagem dos corpos-de-prova, diferentemente dos concretos com aditivo redutor de retração, que mesmo obtendo aproximadamente o mesmo espalhamento, a trabalhabilidade deles perdura mais tempo, conseguindo moldar os corpos-de-prova.

Os traços contendo aditivo ARR apresentaram-se coesos e viscosos com espalhamento dentro do intervalo. Não foi necessário aumentar nem reduzir a relação a/c. Não foi descontada da água da mistura a quantidade adicionada de ARR, pois não continha água livre segundo informações do fabricante. Ao adicionar o ARR, em qualquer dos dois teores estudados (1% e 2%) esperava-se que o espalhamento apresentasse ligeiramente acima do intervalo especificado, pois pesquisas realizadas por Silva (2007) e Lopes (2011) mostraram que a presença do ARR aumentou ligeiramente o abatimento, embora a viscosidade e a tensão inicial de escoamento tenham reduzido em 30%. Entretanto isso não aconteceu nesta pesquisa mesmo na mistura ARR_2 tendo maior quantidade de aditivo ARR.

A Figura 4.2 permite melhor visualização dos efeitos da água adicionada aos microconcretos e do aditivo superplastificante adicionado. Na Figura 4.2 (a) e (b) pode se observar que os traços contendo PSA não apresentaram exsudação nem segregação dos materiais. O traço referência (REF 2) que não tinha nenhum dos agentes mitigadores de retração autógena (traço com relação a/c = 0,5), apresentou segregação dos materiais desde o término da mistura e ao mesmo tempo apresentou exsudação do material (Figura 4.3 – (a) e (b)), o que originou uma mistura com baixo teor de finos, ocasionando uma baixa coesão. Neste caso, a exsudação do concreto provavelmente deve-se à elevada quantidade de água para material absorvente dela presente na mistura, ou devido a um excesso de superplastificante, mas que foi necessário adicioná-lo para poder obter o espalhamento desejado.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2 – Aspecto dos microconcretos depois da mistura: (a) microconcreto PSA_0,3, (b) espalhamento do microconcreto PSA_0,3, (c) microconcreto REF_0,5 e (d) espalhamento do microconcreto REF_0,5

Ao aumentar a relação de água cimento para 0,5, a exsudação foi expressiva, comprometendo a coesão. Embora não tenha sido realizada determinação da perda de abatimento com o tempo, percebeu-se que o concreto, após 5 min tornaram-se pouco trabalhável, o que causaria uma perda rápida de espalhamento, originando um material difícil de moldar. Para a moldagem desse traço foi necessário misturar sem cessar para moldar os corpos-de-prova, pois a segregação e a exsudação do material não permitiam a moldagem usual.

Na tabela 4.1 são apresentados os resultados do ensaio de espalhamento realizado de acordo com a DIN 18555-2 e com a ABNT NBR 13276:2005, para fins comparativos.

Tabela 4.1 - Diâmetro médio de espalhamento dos microconcretos de acordo com a DIN 18555-2 e a ABNT NBR 13276:2005

	Espalhamento (mm)	
	DIN 18555-2	ABNT NBR 13276:2005
REF 1	186	282
PSA_0,3	190	290
PSA_0,4	193	294
PSA_0,6	196	301
ARR_1	194	304
ARR_2	196	305
REF 2	183	277

Os valores de espalhamento obtidos pela norma brasileira foram maiores do que os resultados determinados pela norma DIN 18555-2. Isso se deve ao fato do comitê técnico da RILEM (TC-SAP 225) ter sugerido não se aplicar os golpes, além das dimensões do cone brasileiro serem maiores do que às do cone Hargermann (DIN 18555-2).

4.1.2 – Tempo zero (t_0)

O tempo zero ou transição suspensão-sólido foi determinado experimentalmente para estabelecer o momento inicial de determinação experimental da retração autógena, referenciando-o como o momento no qual o microconcretos desenvolveram uma estrutura rígida ou superfície para permitir a transferência de tensões de tração.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados de ensaio obtidos para cada microconcreto estudados. Nas Figuras 4.3 a 4.5 apresentam-se as curvas de velocidade de programação do pulso ultrassônico versus tempo decorrido desde o início da mistura (cimento e água) até 48 horas. O intuito de continuar a determinação foi para observar melhor o comportamento completo da função velocidade versus tempo até sua estabilização.

As misturas apresentaram uma velocidade baixa de propagação de onda ultrassônica inicial (de aproximadamente 70 m/s), e depois se apresentou um aumento brusco de velocidade quando aconteceu à pega. Durante as leituras registradas nas primeiras horas, detectou-se que ocorriam instantes onde o aparelho registrava aumento na velocidade de propagação e,

logo em seguida, retornava para o valor inicial de 70m/s. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de estar ocorrendo a formação das amas (subconjunto contínuos de grãos e produtos de hidratação ligados mecanicamente) e a sua ligação ainda não é o suficientemente forte para suportar as possíveis deformações impostas, terminando por romper essas ligações pré-estabelecidas. A continuação das reações e formação de novos produtos de hidratação geram sólidos mais fortes, ao redor das amas, reestabelecendo as ligações antes perdidas até a formação do primeiro caminho contínuo capaz de atravessar todo o sistema.

Tabela 4.2 – Resultados do tempo obtido para estabelecimento do patamar de percolação.

REF 1	PSA_0,3	PSA_0,4	PSA_0,6	ARR_1	ARR_2	REF 2
6h20 (380min)	7h30 (450min)	7h50 (470min)	7h50 (470min)	6h50 (410min)	7h40 (480min)	6h40 (400min)

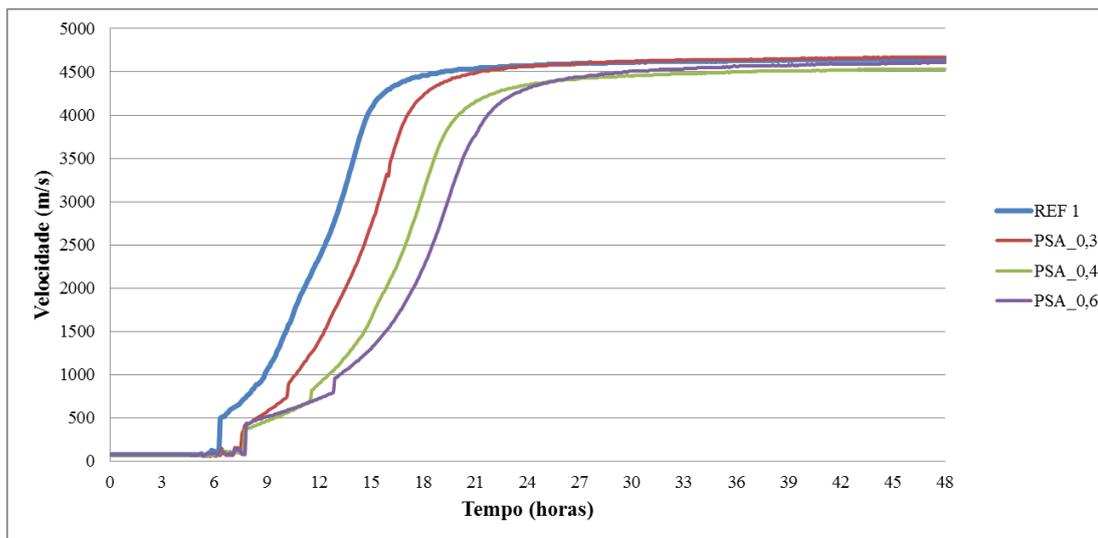


Figura 4.3- Velocidade de propagação x tempo dos traços REF 1, PSA_0,3, PSA_0,4 e PSA_0,6 (CLARO e SARAIVA, 2013)

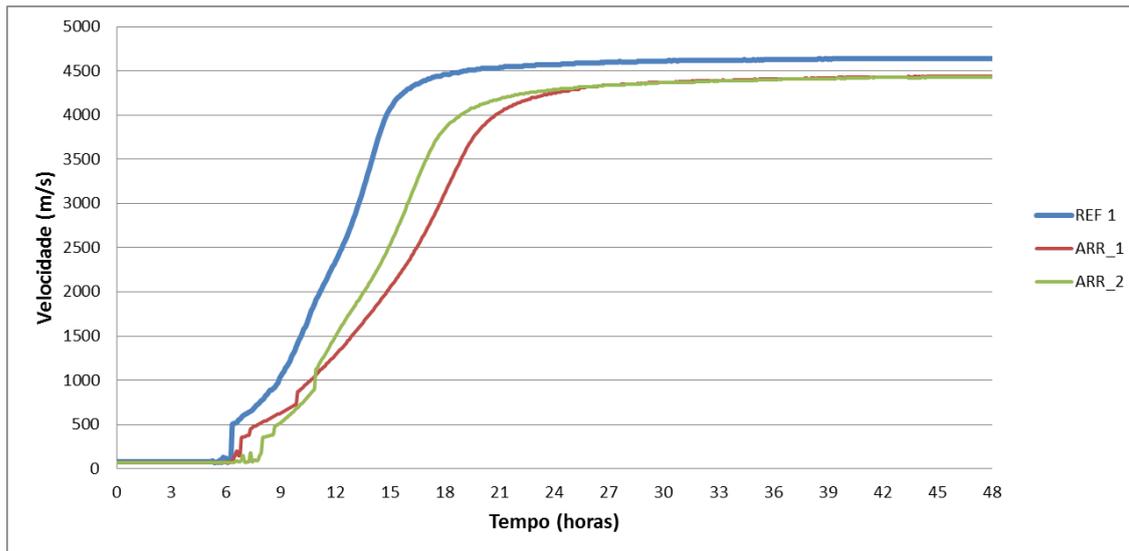


Figura 4.4 – Velocidade de propagação x tempo dos traços REF 1, ARR_1 e ARR_2 (CLARO e SARAIVA, 2013)

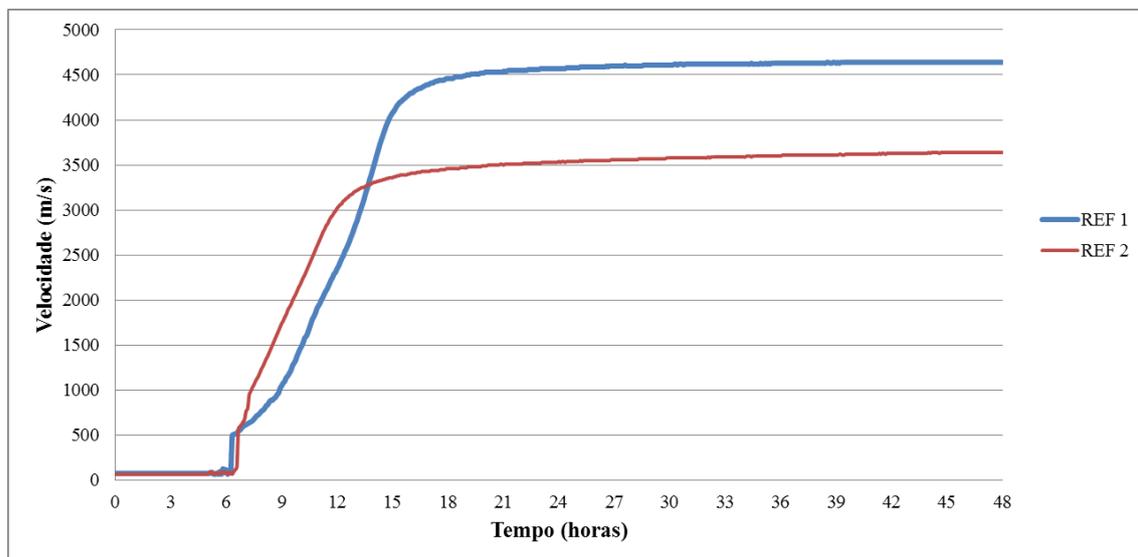


Figura 4.5 – REF 1 e REF 2 (CLARO e SARAIVA, 2013)

Para a mistura de referência, o resultado do tempo zero foi de 6h20 (380 minutos). Nas misturas contendo PSA (0,3, 0,4 e 0,6) apresentaram tempo zero respectivamente de 7h30, 7h50 e 7h50. Observou-se que a presença do PSA retardou a pega em relação à mistura de referência da ordem de 1h20. Para as dosagens de PSA estudadas o tempo zero não variou substancialmente. O atraso no tempo de pega possivelmente deve-se a um aumento das partículas floculadas de cimento e ao fato do acréscimo da quantidade de água para cura interna provocando o afastamento das partículas de cimento umas das outras.

Estudos feitos por Dudziak e Mechtcherine (2010) observaram que o PSA afetou o tempo t_0 dos concretos, onde a mistura de referência apresentou um tempo zero aproximadamente de 8h40 e o concreto com um teor de 0,4% PSA obteve um tempo zero aproximadamente de 10h20, ou seja retardo de aproximadamente 1h40, muito próximo ao observado nesta pesquisa. Kumm (2009) também observou retardamento de cerca de 3 horas para a mistura contendo 0,27% PSA em relação à mistura de referência (este resultado foi obtido mediante o gráfico da evolução de temperatura das misturas).

Nas misturas contendo aditivo redutor de retração (ARR1 e ARR_2), o tempo zero foi de 6h50 (410 minutos) e 8h (480 minutos), respectivamente. Quando comparado a mistura de referência (REF 1), a presença de 1% de ARR provocou aumento de 30 minutos em tempo zero. Dobrando o teor de ARR para 2%, o atraso no tempo zero foi de 1h40. Silva (2007) também observou retardamento quando adicionado o 2% de ARR ao concreto, comparado com o de referencia valor que pode estar correlacionado com o obtido, pois verificasse que o ARR gera demora no acontecimento da pega, o atraso foi de 1:20h . Lopes (2011) observou um atraso de 1h, para o teor de 1% de ARR em relação ao concreto de referência e de 1:20h para o teor de 2% de ARR.

Estudos feitos por Weiss e Berke (2002) observaram um aumento no tempo zero, em misturas com 1,5% e 2% de ARR, em relação à mistura de referência, usando método de resistência à penetração e usando o método da agulha de Vicat, respetivamente.

Segundo Maltese et al. (2005) e Rajabipour et al. (2008) o comportamento observado de retardo no processo de endurecimento da pasta de cimento com o ARR pode ser devido ao fato de que o aditivo redutor, ao estar constituído por moléculas orgânicas hidrofóbicas, poderia diminuir a capacidade da água em dissolver sais, principalmente aqueles sais responsáveis de acelerar a hidratação.

O microconcreto REF 2 apresentou um ligeiro retardo no tempo de início de pega (20 minutos). Este retardo se deve ao efeito do aumento da quantidade de água (maior relação a/c comparado ao REF 1), pois este aumento de água gera maior quantidade de água livre na mistura, dificultando a aglomeração das partículas de cimento, reduzindo o tempo de pega em relação ao traço de referência (REF 1).

4.1.3 – Densidade

Na Tabela 4.3 apresenta-se os resultados de densidade de massa dos microconcretos estudados. Os valores estão muito próximos entre si, mostrando que a presença de PSA e do ARR, nos teores estudados, não interfere na massa específica.

Tabela 4.3– Densidade dos microconcretos testados

Microconcreto	Densidade (g/cm ³)
REF 1	2590
PSA_03	2591
PSA_04	2585
PSA_06	2579
ARR_1	2623
ARR_2	2633
REF 2	2622

Kumm (2009) também observou que as misturas com polímero superabsorvente nos teores estudados apresentaram densidade ligeiramente menor comparados com a mistura de referencia, obtendo uma redução máxima de 2,65%.

4.2 – PROPRIEDADES NO ESTADO SÓLIDO

4.2.1 – Retração autógena

Os resultados apresentados de retração são referentes à média dos valores obtidos dos três corpos-de-prova ensaiados, cujos valores individuais determinados nos ensaios experimentais encontram-se no Apêndice A.

4.2.1.1 – Perda de massa

Foi realizado um controle da perda de massa de água dos corpos-de-prova para garantir a eficácia dos ensaios, verificando assim que a retração determinada experimentalmente fosse retração autógena, e não também uma retração por secagem.

Para a determinação da perda de massa, todos os corpos de prova foram pesados logo após a moldagem, já envoltos com as diferentes camadas de fita e filme plástico, e

posteriormente com 28 dias após o término da determinação da retração autógena (depois de retirada dos relógios comparadores). Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores de massa de cada um dos três corpos-de-prova antes e depois do ensaio.

Tabela 4.4 – Perda de massa dos microconcretos antes e depois do ensaio

Microconcreto		Massa inicial (g)	Massa final (g)	(%) perda
REF_1	CP1	6960,0	6958,3	0,48
	CP2	6958,1	6956,6	0,43
	CP3	6924,5	6922,7	0,48
PSA_0,3	CP1	6937,0	6935	0,52
	CP2	6938,2	6936,8	0,32
	CP3	6818,4	6816,8	0,42
PSA_0,4	CP1	6852,2	6850,2	0,41
	CP2	6888,2	6887,6	0,49
	CP3	6957,0	6956,1	0,23
PSA_0,6	CP1	7008,3	7006,5	0,43
	CP2	6982,9	6981,2	0,42
	CP3	6922,0	6920,3	0,42
ARR_1	CP1	7003,4	7001,6	0,43
	CP2	6998,1	6996,4	0,42
	CP3	7001,0	6999,2	0,44
ARR_2	CP1	7012,4	7011,2	0,39
	CP2	7010,3	7008,9	0,40
	CP3	7002,7	7001,2	0,42
REF 2	CP1	6956,2	6953,2	0,53
	CP2	6970,2	6967,4	0,50
	CP3	6982,0	6979,2	0,50

A variação de massa de água dos corpos-de-prova, em relação à massa total, foi de no máximo 0,52 %, em todos os microconcretos, até 28 dias. Por tanto, pode-se dizer que neste período se manteve uma boa selagem dos corpos-de-prova, sem perda de água de modo a ser medida realmente a retração autógena.

4.2.1.2 – Resultados individuais

Na Figura 4.6 e Figura 4.7 são apresentadas as curvas individuais de retração autógena, em função da idade, para todos os microconcretos estudados (REF 1, PSA_0,3, PSA_0,4, PSA_0,6, ARR_1, ARR_2 e REF 2). No eixo do x, a idade zero corresponde ao início da determinação autógena, ou seja, na transição suspensão sólido (tempo zero – t_0). Os resultados individuais dos três corpos-de-prova, por microconcreto, se encontraram muito próximos entre si, revelando um bom controle das operações de ensaio. Os resultados

individuais das leituras dos extensômetros de cada um dos corpos-de-prova estão expostos no Apêndice A.

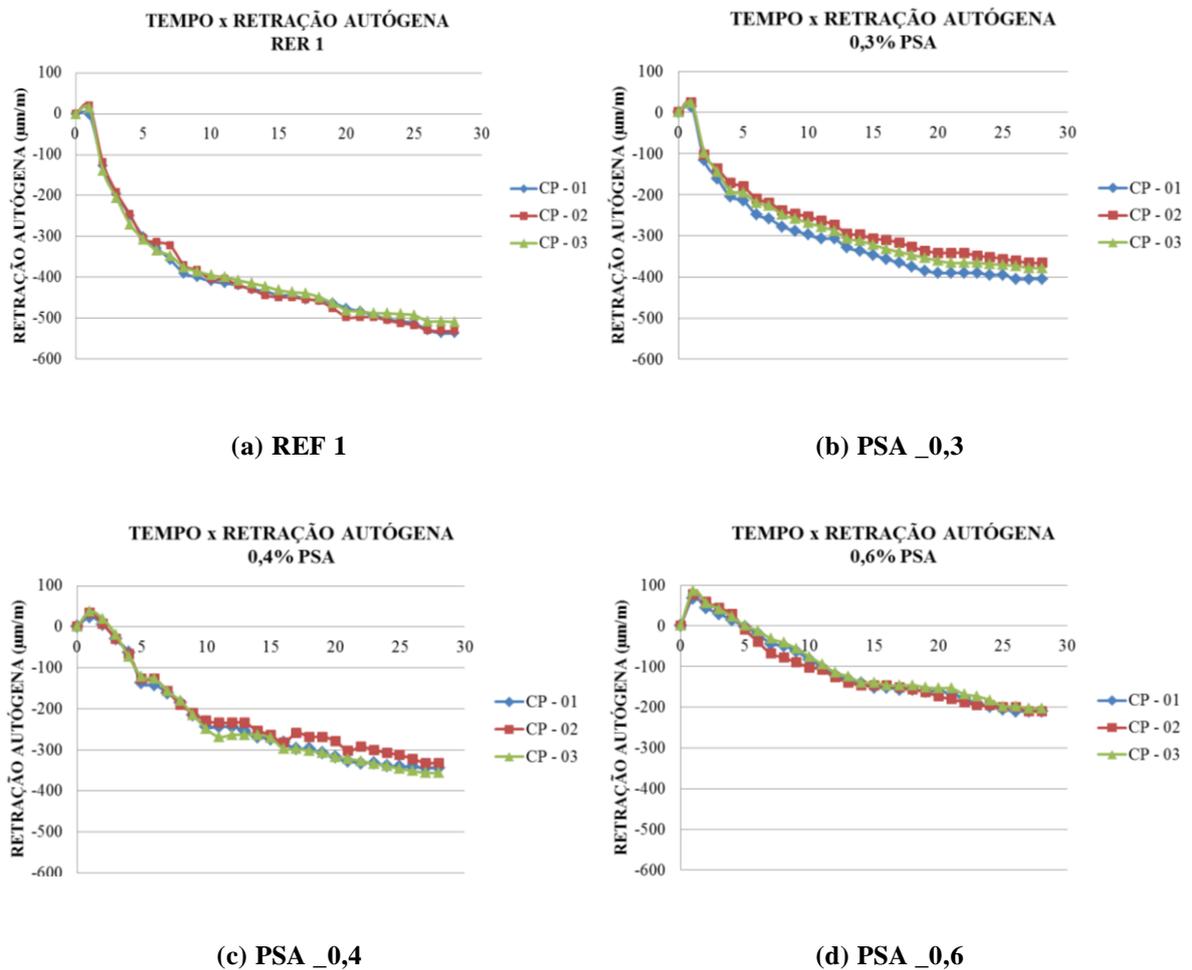
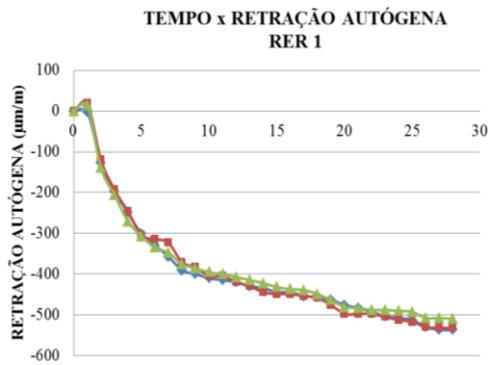


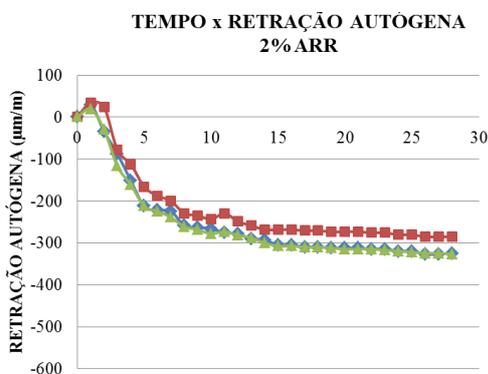
Figura 4.6 – Resultados individuais de retração autóloga determinada desde o tempo t_0 (usando a técnica do ultrassom) até a idade de 28 dias: (a) REF 1, (b) PSA_0,3, (c) PSA_0,4 e (d) PSA_0,6



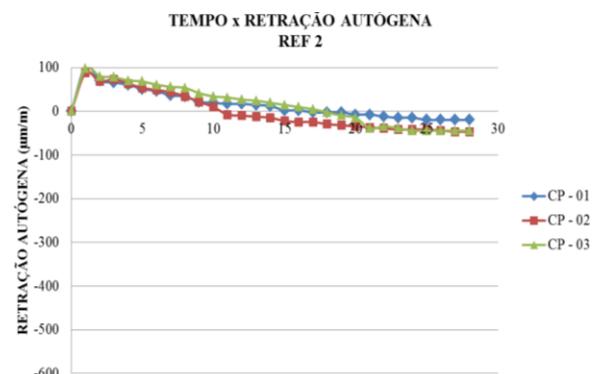
(a) REF 1



(b) ARR_1



(c) ARR_2



(d) REF 2

Figura 4.7 – Resultados individuais de retração autóloga determinada desde o tempo t_0 (usando a técnica do ultrassom) até a idade de 28 dias: (a) REF 1, (b) ARR_1, (c) ARR_2 e (d) REF 2

Como observado na figura 4.6 (a), a curva da mistura de referência exibem expansões nas primeiras idades (até aproximadamente dois dias após a transição suspensão sólido), o que coincide aproximadamente com o período de grande formação dos produtos de hidratação (período de aceleração e desaceleração). As deformações resultam das variações volumétricas químicas causadas, particularmente, pela reação da fase alita com C-S-H e C-H, além da formação da etringita e posterior formação do monossulfato.

Após esse tempo, o que corresponde ao período da reação avançada, nota-se uma inflexão na curva, pois as reações são mais lentas.

Pode ser observado que na mistura de referência, a magnitude da retração autógena é da ordem de $500\mu\text{m}/\text{m}$, aos 28 dias, e que em todas as misturas contendo PSA e ARR, a retração autógena é substancialmente inferior a este valor, na mesma idade. Silva (2007) obteve aos 28 dias retração autógena de aproximadamente $387\mu\text{m}/\text{m}$ para o concreto de referência com relação a/agl igual a 0,3. O resultado é aproximado e um pouco maior comparado ao obtido nesta pesquisa, provavelmente porque o consumo de cimento utilizado neste trabalho foi maior do que o utilizado pela autora pois concretos com maiores consumos de cimento tendem a apresentar maiores retrações, pois é a pasta, e não o agregado, a fase que sofre variações volumétricas.

No balanço volumétrico da hidratação, diversos pesquisadores relatam expansão inicial. Nesta pesquisa, todos os microconcretos estudados obtiveram expansão nas primeiras horas de hidratação, onde se observou um pico de expansão até 12 horas. Este fenômeno de início de expansão poder ser explicado devido: (i) à formação de etringita (Silva, 2007; Lopes 2011), (ii) à reabsorção da água de exsudação (Bjøntegaard, 1999) e (iii) ao crescimento de mais produtos da reação de hidratação no interior da rede que gera uma expansão moderada no sistema (Bazant e Whittman, 1982).

Nos estudos realizados por Kumm (2009), as misturas que continham o polímero superabsorvente apresentaram expansão nas primeiras idades, o que para a autora indica que possivelmente deve-se a uma maior formação de etringita e monossulfatos durante a hidratação do cimento. Para Kumm (2009), a expansão apresentada nas misturas contendo PSA, demonstra eficiência no combate à retração autógena até 3 dias de idade. Segundo a autora, a expansão inicial significa eficiência dos polímeros, pois ao obter valores positivos de microdeformações a retração autógena não se apresenta antecipadamente.

Pereira e Matos (2011) encontraram que a mistura com adição do polímero superabsorvente apresentou expansão nas primeiras idades de aproximadamente $100\mu\text{m}/\text{m}$. Craeye *et al.* (2010) trabalharam com concretos de alta resistência e as misturas contendo PSA apresentaram expansão de aproximadamente $200\mu\text{m}/\text{m}$ nas primeiras 11 horas. O autor atribui esta expansão possivelmente à prematura liberação de água para cura interna num momento de autosecagem.

O pico de expansão dos microconcretos estudados foi se elevando com o incremento da quantidade de PSA adicionado e conseqüente aumento de água para cura interna. Nesses microconcretos a expansão pode ser devida também ao fato de que as partículas PSA sofrem o inchamento nas primeiras horas, que é quando absorvem a água para cura interna ocasionando assim uma leve expansão no sistema que termina no momento em que o sistema precisa de água para a sua hidratação e é onde as partículas PSA liberam essa água voltando a seu tamanho original parando a possível expansão.

Silva (2007) obteve valores de expansão para seus concretos com relação $a/c = 0,60$ nas primeiras 48 h, aproximadamente, onde a autora também atribui ao crescimento dos grandes cristais de Ca(OH)_2 , as quais estão de acordo com os resultados obtidos por BENTZ e STUTZMAN (1994).

Os microconcretos com ARR também apresentaram expansão nas primeiras horas. Lopes (2011) perceberam expansões por aproximadamente 24 horas, após a pega, em concretos com relação $a/agl = 0,3$ e concretos com relação $a/agl = 0,4$ sendo pouco expressiva. Já para os concretos com maior relação a/agl igual a 0,63, a expansão se apresentou em todos os teores de ARR (1% e 2%) onde se estendeu por até cerca de 4 dias, após a moldagem. A autora baseia-se na explicação do que o fenômeno de expansão pode-se dever à formação e ao crescimento de grandes cristais de Ca(OH)_2 , enquanto se processam as reações de hidratação do cimento, explicação atribuída por Braroghel-Bouny *et al.* (2004).

Para os autores, nas primeiras horas, o crescimento de cristais gera certa pressão de cristalização nas paredes dos poros, o que provavelmente pode induzir a expansão na microestrutura. Quando se tem misturas com relação a/c alta, os grandes cristais terão tempo suficiente, espaço e quantidade de água para crescer, antes do processo de autodessecação ser mais forte e a resistência da matriz também.

O microconcreto com relação água/cimento 0,5 obteve uma magnitude de retração autógena muito baixa e nas primeiras horas apresentou uma expansão da ordem de 90×10^{-6} , ao primeiro dia, e em seguida ocorreu uma retração pequena, isto pode ser devido a que praticamente os concretos com relações de água/cimento maiores a 0,40 não irão apresentar retração autógena, pois possuem maior quantidade de água disponível para a sua hidratação e para o processo de cura.

4.2.1.3 – Resultados médios

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados médios da evolução da retração autógena nos diferentes microconcretos estudados. Cada curva corresponde à média aritmética dos três resultados individuais apresentados na Figura 4.6 e na Figura 4.7.

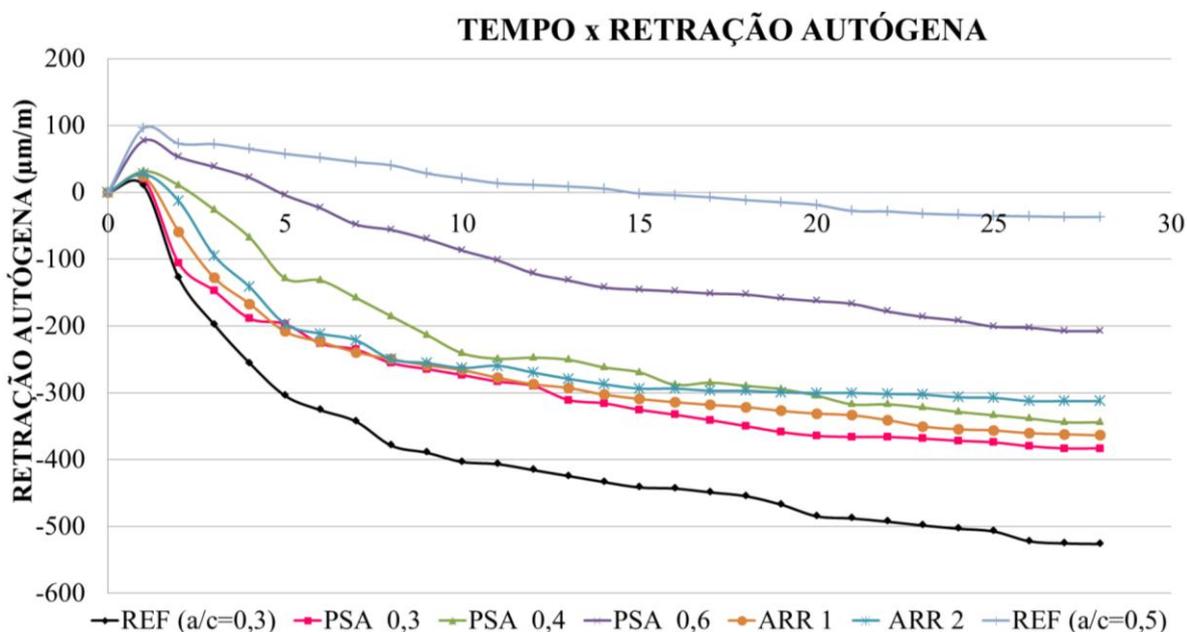


Figura 4.8 – Resultados médios da evolução da retração autógena dos microconcretos a partir tempo zero (t_0) até a idade de 28 dias, em corpos-de-prova prismáticos de 75mm x 75mm x 285mm, selado

Na Tabela 4.5 são mostrados os resultados médios de retração autógena em diversas idades para as misturas estudadas e a redução da retração autógena em relação ao traço de referência (REF 1). Os resultados positivos de deformação autógena correspondem à expansão e os valores negativos, retração.

Para o cálculo da retração autógena considerou-se seu início a partir do pico da expansão. Este procedimento foi adotado, pois ao se fazer os cálculos do acúmulo de tensões durante o endurecimento restringido ou ao se tentar estimar a formação de fissuras, deve-se incluir também a expansão. Os resultados de redução de retração autógena apresentados na Tabela 4.4 foram obtidos mediante a Equação 15.

$$\%_{REDU\tilde{C}\tilde{A}O\ RA} = 1 - \frac{(A_{tra\tilde{c}o,1} - B_{tra\tilde{c}o,i})}{(C_{REF,1} + D_{REF,i})} \times 100 \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

$\%_{REDU\tilde{C}\tilde{A}O\ RA}$ = Porcentagem de redu\~c\~ao da retra\~c\~ao aut\~o\~gena, de um determinado tra\~c\~o em rela\~c\~ao \~a mistura de refer\~encia (REF 1);

$A_{tra\tilde{c}o,1}$ = Deforma\~c\~ao obtida no tra\~c\~o com um dia de idade;

$B_{tra\tilde{c}o,i}$ = Deforma\~c\~ao obtida no tra\~c\~o na idade i;

$C_{REF,1}$ = Deforma\~c\~ao obtida no tra\~c\~o REF 1 com um dia de idade;

$D_{REF,i}$ = Deforma\~c\~ao obtida no tra\~c\~o REF 1 na idade i.

Tabela 4.5 – Resultados m\~edios de deforma\~c\~ao aut\~o\~gena dos microconcretos e redu\~c\~ao da retra\~c\~ao aut\~o\~gena em rela\~c\~ao ao tra\~c\~o de refer\~encia, em diversas idades

Dias	REF 1 ($\mu\text{m/m}$)	PSA_0,3 ($\mu\text{m/m}$)	PSA_0,4 ($\mu\text{m/m}$)	PSA_0,6 ($\mu\text{m/m}$)	ARR_1 ($\mu\text{m/m}$)	ARR_2 ($\mu\text{m/m}$)	REF 2 ($\mu\text{m/m}$)
1	11	20	32	77	24	28	96
2	-128	-106	11	53	-59	-13	73
3	-198	-147	-26	38	-128	-94	72
7	-343	-235	-158	-48	-239	-221	46
14	-433	-315	-262	-142	-302	-287	6
28	-526	-383	-344	-207	-363	-312	-37
1	-	Expans\~ao	Expans\~ao	Expans\~ao	Expans\~ao	Expans\~ao	Expans\~ao
2	-	10%	84%	83%	40%	71%	95%
3	-	20%	72%	81%	27%	42%	89%
7	-	28%	45%	64%	26%	30%	86%
14	-	25%	34%	50%	27%	29%	80%
28	-	25%	30%	47%	28%	36%	75%

Para efeito ilustrativo s\~ao apresentados os c\~alculos da redu\~c\~ao da retra\~c\~ao aut\~o\~gena dos microconcretos PSA_0,3 e PSA_0,6 na idade de 2 dias, substituindo os valores na Equa\~c\~ao 15:

$$\%_{REDU\tilde{C}\tilde{A}O\ RA,PSA_0,3} = 1 - \frac{[20 - (-106)]}{[11 - (-128)]} \times 100 = 10\%$$

$$\%_{REDUÇÃO\ RA,PSA_{0,6}} = 1 - \frac{[77 - (53)]}{[11 - (-128)]} \times 100 = 83\%$$

A mistura de referência com relação a/c igual a 0,3 (REF 1) apresentou expansão inicial máxima desprezível (11µm/m) nas primeiras 12 horas. A partir dessa idade, o comportamento da função é tal que a inclinação é praticamente uma reta bem íngreme, alcançando -128µm/m, com apenas 2 dias. Dessa idade até cerca de 7 dias (-343 µm/m) a cinética da função é aproximadamente uma reta menos íngreme que a primeira, porém ainda bastante pronunciada. A hidratação a partir dessa idade é mais lenta e a função torna-se visivelmente mais suave, alcançando resultado considerável de -526 µm/m, aos 28 dias.

Observa-se que todas as misturas contendo as duas diferentes estratégias mitigadoras estudadas, reduziram a magnitude da retração autógena, embora a eficácia tenha ocorrido de maneira diferente.

As misturas PSA_0,3 e ARR_1 apresentaram ligeira expansão inicial (da ordem de 20µm/m). A mistura ARR_1 obteve melhor desempenho aos 2 dias de idade apresentando redução de 40% ao passo de que o PSA_0,3 reduziu apenas 10%. A partir desta idade, as duas misturas apresentaram um comportamento muito próximo, com redução na retração autógena, em relação à mistura de referência, da ordem de 20 a 30% nas diversas idades.

A mistura contendo 2% de ARR apresentou redução na retração autógena expressivamente maior que à mistura ARR_1 nas idades iniciais (até 3 dias). A partir de 5 dias, a eficácia na reduções da retração autógena das duas misturas é próxima e da ordem de 25% a 35% até 28 dias. Como a mitigação da retração autógena é mais importante nas primeiras idades, o uso do teor de 2% de ARR é mais promissor para este fim. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Silva (2007) trabalhando com concretos com relação a/agl igual a 0,3.

O microconcreto contendo 0,4% de PSA, embora tenha apresentado retração final (aos 28 dias) próxima à das misturas PSA_0,3, ARR_1 e ARR_2, mostrou-se mais eficiente para combater a retração autógena nas idades iniciais. Apresentou leve expansão com 1 dias (30µm/m) e reduziu a retração autógena da ordem de 70% aos 2-3 dias e 45% aos 7 dias de idade, justamente quando o concreto é mais vulnerável a fissuras devido a menor capacidade do material de absorver tensões de tração. Nota-se que taxa de redução da

retração autógena é mais suave nas idades iniciais, comparada com a das misturas PSA_0,3, ARR_1 e ARR_2, e constitui uma alternativa promissora.

A mistura mais promissora, do ponto de vista de mitigar a retração autógena, foi o traço usando polímero superabsorvente no teor de 0,6% (PSA_0,6). O efeito de expansão inicial foi neutralizado apenas com 5 dias de idade, diferentemente das outras misturas que ocorreu numa idade inferior. Por se tratar de um microconcreto com alta resistência, o material provavelmente terá condições de suportar os esforços máximos de compressão induzidos pela expansão de 77 $\mu\text{m/m}$ observada com 1 dia de idade. O uso da técnica de cura interna promoveu redução considerável na retração autógena. A porcentagem de redução da retração autógena em relação à mistura de referência (REF 1) foi bastante promissora. Aos 2-3 dias houve redução da ordem de 80% na retração autógena e aos 7 dias e 28 dias redução de aproximadamente 65% e 50%, respectivamente, o que é bastante promissor.

A diminuição na porcentagem de redução na retração autógena em função do tempo se deve ao fato da água para cura interna diminuir à medida que a hidratação avança e nas primeiras idades, as reações químicas de hidratação do cimento são bem maiores e com o tempo elas vão decrescendo. Para Bentz e Jensen (2004), estas reações químicas de hidratação do cimento decrescem com o tempo principalmente quando se trabalha com cimentos ARI. Este comportamento está consistente com os dados apresentados por Piérard *et al.* (2006), Igarashi e Watanabe (2006), Mechtcherine *et al.* (2009), Kumm (2009) e Craeye *et al.* (2010). Um estudo posterior sobre análise de fissuração, considerando retração de origem térmica, autógena e secagem, poderá apontar se esses níveis de retração são aceitáveis de modo a não levar o material a fissurar.

O microconcreto com relação a/c igual a 0,5 (REF 2), apresentou expansão inicial (96 $\mu\text{m/m}$) nas primeiras 15 horas. A partir desse ponto, o comportamento da função foi muito suave, de modo a que a neutralização da expansão inicial só acontece aos 14 dias alcançando uma retração final, aos 28 dias, de apenas -37 $\mu\text{m/m}$. Comparando-se os dois microconcretos de referência, com relações a/c diferentes, pode-se dizer que aumentar a relação água/cimento de 0,30 para 0,50 diminuiu substancialmente a magnitude da retração autógena. Era esperado que a mistura REF 2 não apresentasse retração autógena

considerável, pois tinha uma relação água/cimento compatível com a de concretos convencionais cuja retração autógena é desprezível.

Kojima *et al.* (2001) também estudou a influência das relações a/c na retração autógena. Os resultados obtidos pelos autores mostram que quando se utilizaram relações água/material cimentante baixa, a retração autógena aumenta. Para Baroguel-Bouny (1994) na diminuição da umidade relativa interna do material, a relação água/material cimentante tem uma importância muito grande, pois ao ser cada vez menor esta relação, maior será a diminuição da umidade relativa interna, e por consequência, a retração autógena.

Na Figura 4.9 são apresentadas a influência da idade (1, 2, 3, 7, 14 e 28 dias) em função do teor de PSA, ARR e relação a/c na retração autógena dos microconcretos investigados.

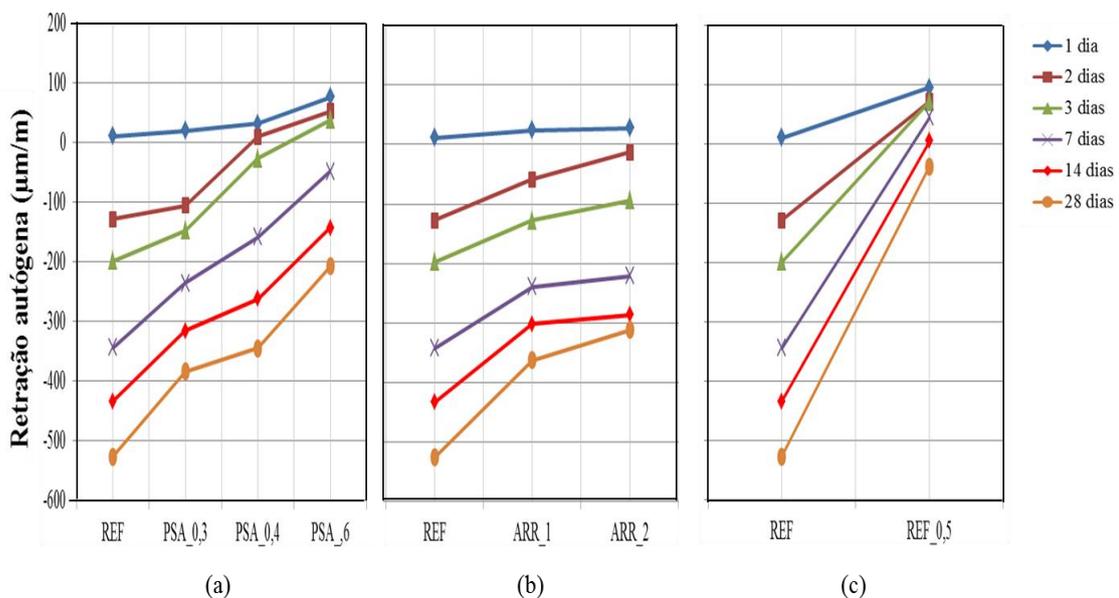


Figura 4.9 – Variação da retração autógena das misturas em relação à de referência em diversas idades: (a) traços com PSA, (b) traços com ARR e (c) traço com relação a/c = 0,5 (REF 2)

Com base na Figura 4.9, observa-se que a retração autógena apresenta um crescimento mais acentuado nas idades iniciais, tornando-se praticamente constante em idades mais avançadas. Na Figura 4.9a, observa-se que o teor de 0,6% de PSA apresenta a maior redução na retração autógena, nos primeiros 2 e 3 dias de idade. Aos 28 dias, a diferença da redução da retração autógena foi de aproximadamente 520 µm/m, para a mistura de referência, e de 200 µm/m, para o teor de 0,6% de PSA. Para os microconcretos com

adição de ARR (Figura 4,9b) pode-se observar que o teor de 2% de ARR é o mais promissor em termos de mitigação autógena, apresentando maior redução da retração autógena nos primeiros 3 dias. Já para a mistura com maior relação de a/c (REF 2) observa-se na Figura 4.9c que a longo do tempo a retração autógena obtida foi relativamente pequena comparada à mistura de referência.

4.2.1.4 – Comparação com outros pesquisadores

Existe certa dificuldade de comparação dos resultados de retração autógena com os de outros pesquisadores, pois não se pode fazer sempre uma comparação direta entre os resultados experimentais determinados por pesquisadores diferentes onde as metodologias utilizadas e o início da determinação da retração autógena são distintos. Como foi mencionado anteriormente e respaldado pela literatura, a padronização do estudo da retração autógena ainda não está definida. Esta falta de padronização faz com que os resultados obtidos pelos diferentes pesquisadores sejam difíceis de serem interpretados e associados, para se obter uma predição exata ou aproximada do fenômeno da retração autógena.

Diversas são as causas que originam essa discrepância nos resultados. Por exemplo, existem pesquisas que iniciam a determinação da retração autógena logo após a moldagem, alguns outros começam a determinação após 1 hora (JENSEN e HANSEN, 1995). Outros ainda começam a medir a retração autógena após a determinação do patamar de percolação (Kumm, 2009), usando medidas de resultados coletados na evolução da temperatura.

No entanto, é válido fazer um comparativo entre os resultados obtidos nesta pesquisa e os obtidos por Claro e Saraiva (2013), pois o início da determinação da retração autógena e metodologia utilizada foi a mesma. Claro e Saraiva (2013) trabalharam com o mesmo traço de referência desta pesquisa porém utilizando outro tipo de PSA com granulometria e composição diferentes nos teores de 0,3% e 0,6% de PSA.

Comparando os dois trabalhos, Claro e Saraiva (2013) obtiveram expansão no microconcreto com o teor de 0,3% de PSA até 3 dias. Aos 28 dias, o microconcreto apresentou uma redução da retração autógena de 52%, comparado à mistura de referência. Já nesta pesquisa, o microconcreto apresentou redução de 20% na retração autógena aos 3

dias e, aos 28 dias, redução de 25% comparado à referência. Da mesma forma, para os microconcretos com teor de 0,6% de PSA, Claro e Saraiva (2013) obtiveram reduções de 79% aos 7 dias e de 70% aos 28 dias e nesta pesquisa, o microconcreto com mesmo teor de PSA apresentou redução de 64% aos 7 dias e de 49% aos 28 dias.

Observa-se então, que a eficiência do PSA empregado pelos autores foi melhor que o utilizado nesta pesquisa. Este resultado, também observado em Mechtcherine et al. (2013), pode ser atribuído pela diferente granulometria e composição dos polímeros superabsorventes empregados. Mechtcherine et al. (2013), encontrou valores de redução da retração autógena para um dos tipos de PSA empregados da ordem de 52% e 44% aos 14 e 28 dias, respectivamente, comparados à mistura de referência.

Soliman e Nehdi (2013) estudaram os efeitos de materiais parcialmente hidratados e dos polímeros superabsorvente como agentes mitigadores de retração autógena. O teor de PSA empregado na pesquisa foi de 0,6% e obtiveram redução de 22% aos 7 dias comparado à mistura de referência.

Schroffj et al. (2012) trabalharam o mesmo traço de referência desta pesquisa e fabricaram misturas com adição de 0,3% de PSA, as misturas se diferenciavam pelos tipos de polímero superabsorvente utilizados. Os autores encontraram que, quando comparadas as misturas de referência com qualquer mistura contendo o PSA, a retração autógena foi reduzida significativamente da ordem de 80% para um dos tipos de PSA (SAP A) aos 3 dias e de 70% aos 7 dias. As outras misturas nos primeiros 3 e 7 dias ainda apresentaram expansão. O autor conclui que o tipo de PSA utilizado para retração autógena é muito importante, pois eles apresentam quantidades e períodos de tempo de liberação de água diferentes o que faz com que a mitigação na retração autógena seja mais ou menos eficiente dependendo do tipo de polímero que se utiliza.

Craeye et al. (2010) estudaram a eficiência do PSA em concretos de alta resistência como agente mitigador da retração autógena. Os autores determinaram a retração autógena utilizando um dilatômetro vertical para os teores de 0,5%, 0,7% e 0,9% de PSA. Nas primeiras 11 horas, os concretos estudados por Craeye et al. (2010) apresentaram expansão e depois redução na retração autógena. Para a adição de 0,5% de PSA houve uma diminuição na retração autógena de 42% comparada à mistura de referência aos 6 dias. As

misturas com 0,7% e 0,9% de PSA apresentaram reduções de 54% e 57%, na mesma idade, respectivamente.

Mechtcherine et al. (2009) determinaram a retração autógena em concretos de alto desempenho, com relação $a/c=0,22$, adições de 0,3% e 0,6% de PSA. Os autores concluíram que as misturas contendo PSA mostraram reduções significativas na retração autógena. A adição de 0,3% de PSA resultou numa diminuição na retração autógena de 72% aos 3 dias comparada à mistura de referência. Aos 28 dias, houve uma redução de 52%. A adição de 0,6% de PSA apresentou uma diminuição da retração autógena de 85% e de 86% aos 3 e 28 dias, respectivamente, comparado à mistura de referência.

Este comportamento de diminuição da redução da retração autógena das misturas contendo PSA em relação à mistura de referência à medida que a idade avança também foi verificado nesta pesquisa.

Silva (2007) trabalhando com concretos de relação $a/agl = 0,3$ e 1% de ARR também obteve redução da retração autógena, em relação à mistura de referência, de 20-30% aos 7 dias, como observado nesta pesquisa. Lopes (2011), nas mesmas condições $a/alg=0,3$ e 1% de ARR, obteve redução de 17% a 30%, usando o mesmo ARR desta pesquisa.

Conclui-se pelos resultados obtidos por diversos pesquisadores que a eficácia na mitigação da retração autógena depende do tipo e teor de polímero superabsorvente e aditivo redutor de retração utilizado, do consumo de cimento e da relação a/c .

4.2.2 – Resistência à compressão

4.2.2.1 - Resistência à compressão dos cubos

Na Tabela 4.6 apresentam-se os resultados de resistência média à compressão determinada em 18 corpos-de-prova cúbicos e respectivos coeficientes de variação (entre parênteses), nas idades de 7 e 28 dias, para cada um dos microconcretos estudados. Também são apresentadas as porcentagens de redução na resistência à compressão de cada mistura em relação à mistura de referência (REF 1).

Os resultados individuais de resistência à compressão encontram-se no Apêndice B. Foram eliminados os valores que se mostraram afastados da média em mais de três desvios padrões na distribuição normal dos resultados, este critério foi adotado por Machado (2005) e Palacios (2012). Os valores eliminados não foram utilizados nos cálculos. Para obter resultados provenientes de amostras com distribuição de probabilidade normal foi utilizado o programa Minitab® realizando o teste de Anderson-Darling. Os resultados são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão nos cubos e respectivo coeficiente de variação e porcentagem da redução devido ao PSA e ARR

		Microconcretos de alta resistência							
		Idade	REF 1	PSA_0,3	PSA_0,4	PSA_0,6	ARR_1	ARR_2	REF 2
Resistência à compressão cubos(MPa)	7 dias		100,5 (±1,6)	97,2 (±3,0)	95,5 (±3,5)	94,8 (±4,0)	99,5 (±3,8)	98,8 (±3,4)	58,2 (±2,8)
	28 dias		123,8 (±2,4)	120,4 (±2,0)	119 (±2,6)	116,7 (±4,1)	117,2 (±2,6)	114,5 (±4,3)	62,0 (±4,1)
Redução da resistência à compressão cubos (%)	7 dias		0	3	5	6	1	6	-
	28 dias		0	4	5	7	6	8	-

As médias dos resultados de resistência à compressão dos cubos nas idades de 7 e 28 dia, para cada microconcreto, são apresentadas na Figura 4.10.

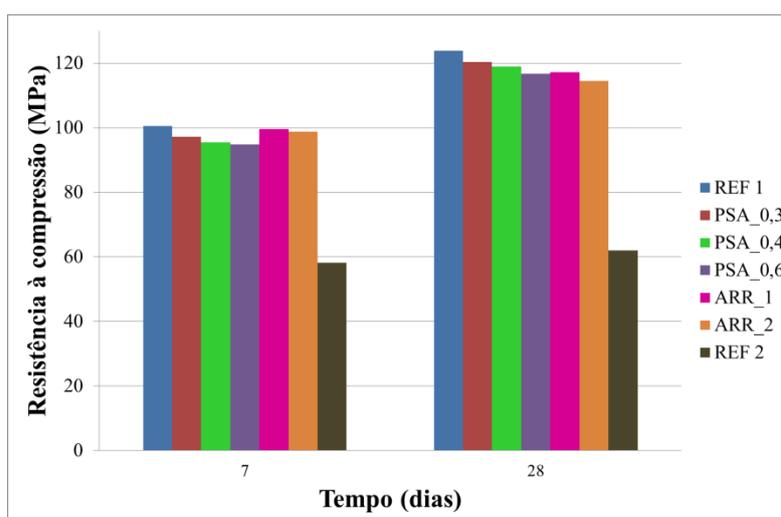


Figura 4.10 - Efeito do teor de PSA e ARR na resistência à compressão dos cubos

A magnitude da resistência à compressão (cubos) dos microconcretos, aos 28 dias, foi de 123,8MPa, 120,2MPa, 119MPa, 116,7MPa, 117,2MPa, 114,5MPa e 62,0MPa, respectivamente, para as misturas REF 1, PSA_0,3, PSA_0,4, PSA_0,6, ARR_1, ARR_2 e REF 2.

A mistura de referência (REF 1) apresentou resistência à compressão igual a 100,5 e 123,8 MP, aos 7 dias e 28 dias, respectivamente. Houve um crescimento de aproximadamente de 20% dos 7 para 28 dias. Este comportamento foi observado nos demais microconcretos exceto na mistura REF 2 que apresentou crescimento de aproximadamente 6%.

Como esperado, o microconcreto de referência com relação $a/c=0,3$ (REF 1) obteve a maior resistência à compressão para todas as idades analisadas. Por ser um concreto de alto desempenho, é esperado obter elevada resistência à compressão. O concreto com relação $a/c=0,5$ (REF 2), que é um microconcreto de resistência convencional, apresentou menor resistência à compressão comparado ao REF 1 devido a sua alta relação a/c .

Analisando os resultados de 7 dias (Figura 4.9), percebe-se que a adição de PSA e ARR reduz a resistência à compressão dos microconcretos se comparados ao microconcreto de referência. Entretanto, a maior redução foi de 8% que pode ser considerada desprezível especialmente face ao benefício alcançado na redução da retração autógena.

Claro e Saraiva (2013) encontraram reduções na ordem de 6% a 7% aos 7 e 28 dias, respectivamente, utilizando PSA no teor de 0,3% em relação a massa de cimento. Já utilizando PSA no teor de 0,6%, os autores encontraram reduções na ordem de 13% aos 7 dias e 15% aos 28 dias.

De forma geral, a perda de resistência à compressão dos microconcretos, com o emprego do PSA, pode ser atribuída aos efeitos causados pelo PSA na hidratação do cimento. O polímero sofre inchamento ao entrar em contato com a água. Na fase da hidratação, a água necessária para a cura interna vai sendo desprendida do polímero voltando este a seu tamanho original, o que parece deixar vazios na estrutura.

Os microconcretos com adição de ARR se comportaram de maneira semelhante. Para o teor de 2% de ARR, houve redução na resistência à compressão de aproximadamente 6%

aos 7 e de 8% aos 28 dias. Este comportamento pode ter relação com a interferência que o ARR gera. Os ARR dificultam a dissolução dos álcalis que são responsáveis por acelerar a hidratação, gerando assim, uma redução na resistência à compressão (RAJABIPOUR et al., 2008).

Lopes (2011) também obteve redução na resistência à compressão dos concretos empregando 2% de ARR, sendo esse efeito também mais pronunciado nas primeiras idades. A autora encontrou que os concretos com ARR sofreram redução na retração autógena obtendo uma perda de resistência cerca de 5%, em relação ao concreto de referência, com o uso de 2% de ARR. Já aos 28 dias, os resultados obtidos mostraram que a evolução do crescimento da resistência à compressão relativa não foi afetada pela presença de ARR.

Diferentes pesquisas relatam a redução da resistência à compressão de concretos com presença do polímero superabsorvente em comparação com ao concreto de referência. Esta diminuição de resistência é apresentada especialmente nas primeiras idades. Craeye e De Shutter (2006) observaram a redução da resistência à compressão dos concretos que tinham PSA, sílica ativa e relação de $a/c=0,32$. Esses autores observaram reduções mais pronunciadas nos concretos que tinham porcentagens maiores de PSA.

Hoa Lam e Hooton (2005) estudaram a influência do PSA em concretos com relação a/c igual a 0,35. Os teores utilizados pelos autores foram 0,3 e 0,6% de PSA em relação à massa de cimento e foi acrescentada água para cura interna aos dois concretos. Nas duas misturas, os autores observaram diminuição na resistência à compressão e concluíram que o concreto com teor de 0,3% de PSA apresentou maior diminuição na resistência à compressão comparada à mistura de referência. Esta conclusão deve-se possivelmente por se ter utilizado uma quantidade de água muito alta para cura interna na mistura com teor de 0,3% de PSA, pois o resultado de resistência à compressão do concreto com 0,6% foi maior comparado ao de 0,3%, tendo sido utilizada a mesma adição de água nos dois teores.

Segundo Dudziak e Mechtcherine (2010), diferentes teorias podem dar explicação ao fato do PSA gerar diminuição na resistência à compressão. Uma delas explica que a redução possivelmente se apresenta devido ao fato do concreto estar misturado com a partícula de PSA e, portanto, ter água extra na sua mistura. Como resultado dessa mistura se tem a

formação de poros, inicialmente preenchidos pela incorporação de água para cura interna e subsequentemente esvaziados pela utilização dessa água.

4.2.2.2 - Resistência à compressão dos cilindros

Na Tabela 4.7 são apresentadas as médias dos resultados de resistência à compressão em 7 corpos-de-prova cilíndricos e respectivos coeficientes de variação, aos 7 e 28 dias, para cada um dos microconcretos estudados. Os resultados individuais de resistência à compressão dos cilindros encontram-se no Apêndice B. O critério para a aceitação e cálculo dos resultados finais foi o mesmo utilizado para o ensaio de resistência à compressão nos cubos. Foi utilizado também o programa Minitab® para conferir que os resultados foram provenientes de amostras com distribuição de probabilidade normal. Os resultados são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.7- Resistência à compressão nos cilindros e respectivo coeficiente de variação e porcentagem da redução

		Microconcretos de alta resistência							
		Idade	REF	PSA_0,3	PSA_0,4	PSA_0,6	ARR_1	ARR_2	REF_0,5
Resistência à compressão cilindros (MPa)	7 dias	88,1	85,5	81,7	74,9	82,2	77,9	49,9	
		(±2,3)	(±3,1)	(±2,7)	(±3,2)	(±2,6)	(±2,5)	(±3,2)	
	28 dias	105,1	97,2	95,3	90,7	100,4	94,2	63,7	
		(±1,6)	(±2,4)	(±3,8)	(±2,7)	(±3,2)	(±3,3)	(±0,8)	
Redução da resistência à compressão cilindros(%)	7 dias	0	2,9	7,2	14,9	6,6	11,5	-	
	28 dias	0	7,5	9,3	13,7	4,5	10,4	-	

A magnitude da resistência à compressão dos microconcretos, aos 28 dias, foi de 105,1MPa, 97,2MPa, 95,3MPa, 90,7MPa, 100,4MPa, 94,2MPa e 63,7MPa, respectivamente, para as misturas REF 1, PSA_0,3, PSA_0,4, PSA_0,6, ARR_1, ARR_2 e REF 2.

A mistura de referência apresentou resistência à compressão igual a 88,1 e 105,1MPa, aos 7 dias e 28 dias, respectivamente. Houve um crescimento de aproximadamente de 20% dos 7 para 28 dias, mesmo comportamento observado nos corpos de prova cúbicos. Este crescimento foi observado nos demais microconcretos.

As médias dos resultados de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dia, para cada microconcreto, é apresentada na Figura 4.11.

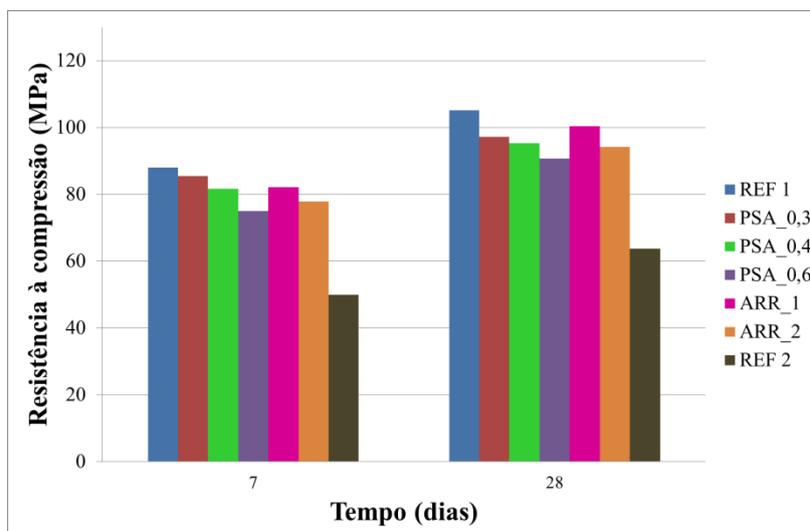


Figura 4.11 - Efeito do teor de PSA e ARR na resistência à compressão dos cilindros

Diferentes pesquisas como Jensen e Hansen (2002), Igarashi e Watanable (2006), Schoroffl *et al.* (2012), Pereira e Matos (2011) e Claro e Saraiva (2013), reportam reduções na resistência à compressão de microconcretos com adição do polímero superabsorvente PSA comparando-os com o de referência, especialmente nas primeiras idades. As reduções apresentadas na resistência provavelmente se devem a um incremento da porosidade dos microconcretos por ter sido introduzido partículas de PSA. Estas partículas, ao entrarem em contato com água, retém o líquido e se dilatam. Durante a hidratação do cimento, a água que se encontrava no interior do polímero é utilizada, “desinchando” o PSA. Essa redução da dimensão do PSA pode gerar vazios e afetar a resistência mecânica do microconcreto.

Nesta pesquisa também os microconcretos com adição de PSA apresentaram valores menores de resistência à compressão comparados aos do microconcreto de referência. As misturas com adição de 0,3% e 0,4% de PSA apresentaram uma redução na resistência da ordem de 3% e 7% aos 7 dias, respectivamente, e de 8% e 9% aos 28 dias, respectivamente. Esses resultados foram próximos aos obtidos no ensaio de resistência à compressão utilizando cubos, indicando coerência nos resultados.

A mistura com adição de 0,6% de PSA apresentou uma redução na resistência da ordem de 15% aos 7 dias e de 14% aos 28 dias. Essas reduções foram superiores às obtidas no ensaio de resistência à compressão utilizando cubos.

Estudos realizados por Jensen e Hansen (2002), em cilindros fabricados com argamassa, revelam que, aos 28 dias de idade, a mistura de referência apresentou resistência à compressão média de 134 MPa e a mistura com relação $a/c=0,3$ e teor de 0,6% de PSA apresentou resistência à compressão média de 109 MPa, ou seja, uma redução na resistência de 19%. Claro e Saraiva (2013) estudaram microconcretos de alta resistência e encontraram reduções na resistência à compressão em cilindros de 5% e 10% aos 7 dias para 0,3% e 0,6% de PSA respectivamente, e de 5% e 14% aos 28 dias.

Os microconcretos com teor de 1% e 2% de ARR apresentaram um comportamento similar na redução da resistência comparado ao obtido nos cubos. A mistura com 1% de ARR apresentou redução de 7% aos 7 dias e de 5% aos 28 dias. O emprego do ARR com teor de 2% apresentou redução de 12% aos 7 dias e de 10% aos 28 dias. A perda de resistência à compressão dos microconcretos com ARR foi mais pronunciado nas primeiras idades.

Silva (2007) encontrou que os concretos com adição de 2% de ARR apresentaram, em média, redução na resistência à compressão de 5% em relação aos concretos de referência. Lopes (2011) trabalhou com concretos de relação a/c igual a 0,33 e 10% de sílica ativa, verificou que a adição de 1% e 2% de ARR tendeu a uma redução na resistência à compressão em cilindros, especialmente nas primeiras idades.

Da mesma forma, Gettu e Roncero (2003), em estudos com concretos contendo 1% e 2% de ARR, obtiveram uma diminuição na resistência à compressão das misturas com relação a/c igual a 0,4 da ordem de 6% e 9% respectivamente, comparadas à referência, aos 365 dias de idade.

A redução da resistência à compressão do REF 2 apresentou o mesmo comportamento da resistência à compressão ensaiada nos cubos. Comparando-se ao microconcreto de REF 1 era esperado que REF 2 apresentasse menor resistência a compressão, tanto nos cubos como nos cilindros, pelo fato de não ser um concreto de alta resistência e ter uma relação a/c alta.

4.2.3 – Resistência à tração na flexão

Na Tabela 4.8 apresentam-se os resultados médios de resistência à tração na flexão referente à 9 corpos de prova prismáticos e respectivos coeficiente de variação (CV), nas idades de 7 e 28 dias para cada um dos microconcretos estudados. Também são apresentadas as porcentagens de redução na resistência à tração na flexão, de cada mistura em relação à mistura de referência (REF 1).

Os valores obtidos de resistência à tração na flexão para cada corpo-de-prova encontram-se no Apêndice B. Como explicado em 4.2.1.1, foram utilizados os critérios adotados por Machado (2005) e Palacios (2012) e o programa Minitab® para o cálculo da média. Os resultados são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.8 – Resistência à tração na flexão e respectivo coeficiente de variação e porcentagem da redução devido ao PSA e ARR

Microconcretos de alta resistência								
	Idade	REF	PSA_0,3	PSA_0,4	PSA_0,6	ARR_1	ARR_2	REF_0,5
Resistência à tração na flexão (Mpa)	7 dias	10,94 (±2,8)	10,75 (±1,8)	10,32 (±2,1)	9,17 (±2,8)	10,40 (±4,4)	10,20 (±4,0)	8,72 (±2,8)
	28 dias	11,04 (±1,6)	10,84 (±1,8)	10,45 (±1,3)	9,41 (±2,7)	10,52 (±2,8)	10,34 (±4,3)	9,14 (±4,1)
Redução da resistência à tração na flexão (%)	7 dias	0	0,9	5,3	15,6	4,6	4,4	-
	28 dias	0	1,8	5,5	14,5	6,4	6,0	-

A magnitude da resistência à tração na flexão dos microconcretos, aos 28 dias, foi de 11,04MPa, 10,84MPa, 10,45MPa, 9,41MPa, 10,52MPa, 10,34MPa e 9,14MPa, respectivamente, para as misturas REF 1, PSA_0,3, PSA_0,4, PSA_0,6, ARR_1, ARR_2 e REF 2.

A mistura de referência apresentou resistência à tração na flexão igual a 10,94 e 11,04 MP, aos 7 dias e 28 dias, respectivamente. Não houve um crescimento de 7 para 28 dias, como esperado, pois a resistência à tração cresce numa velocidade superior a resistência à compressão.

As médias dos resultados de resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dia, para cada microconcreto, são apresentadas na Figura 4.12.

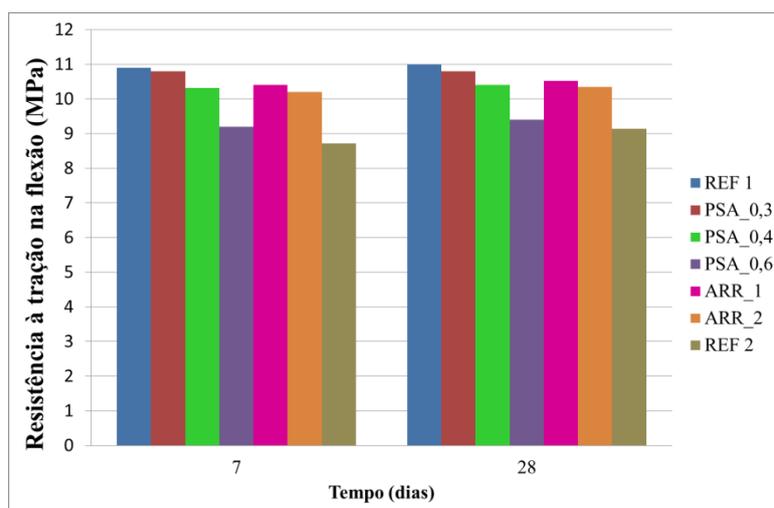


Figura 4.12 – Efeito do teor de PSA e ARR na resistência à tração na flexão

Considerando o microconcreto de referência como ponto de comparação, pode-se observar uma tendência de diminuição da tração na flexão à medida que aumenta o teor de polímero superabsorvente e o conteúdo de aditivo redutor de retração.

O percentual de perda na resistência a tração na flexão que ocorreu aos 7 dias foi muito próximo ao que aconteceu aos 28 dias e aumentou com o incremento do teor de PSA. Com 0,3% de PSA praticamente não se observou redução da resistência à tração na flexão. Com 0,4% de PSA a redução da resistência foi de aproximadamente 5%, considerada desprezível face à grande redução observada na retração autógena. Na mistura PSA_0,6 houve uma redução de 15%. Apesar deste percentual de redução, ainda constitui uma solução bastante promissora diante da eficácia na mitigação da retração autógena.

Claro e Saraiva (2013) trabalhando com microconcretos semelhantes não encontraram redução na resistência à tração na flexão para a mistura com teor de 0,3% de PSA. Já no uso do teor de 0,6% de PSA a redução foi de 11%, aos 28 dias

Para os microconcretos contendo ARR houve uma pequena redução da resistência de 6% aos 28 dias. Este valor pode ser considerado desprezível, diante do benefício do aditivo redutor de retração como agente redutor da retração autógena.

Nos estudos desenvolvidos por Lopes (2011), a autora avalia a influencia do aditivo redutor de retração em concretos com três classes de resistência à compressão (C40, C60 e C80) utilizando os teores de 1% e 2% de ARR. Para a resistência à tração na flexão, a autora revelou que o ARR não exercia influencia sobre a resistência a tração na flexão.

Com o aumento da relação a/c para 0,50, era esperado se obter uma resistência à tração na flexão menor que a da mistura de referência por se tratar de um concreto convencional com relação a/c alta.

4.2.4 – Absorção por capilaridade

Os resultados individuais de absorção de água por capilaridade encontram-se no Apêndice D. A tabela 4.9 sintetiza os resultados obtidos de todos os microconcretos estudados e apresenta os resultados médios do coeficiente de absorção por capilaridade. A Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam o comportamento dos microconcretos estudados frente à absorção capilar.

Tabela 4.9 – Resultados médios do coeficiente de absorção por capilaridade dos microconcretos

Microconcreto	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)		
		10min	90min	72h
REF 1	0,44	0,02	0,05	0,26
PSA_0,3	0,50	0,04	0,06	0,22
PSA_0,4	0,71	0,04	0,08	0,30
PSA_0,6	0,82	0,04	0,09	0,36
ARR_1	0,69	0,04	0,09	0,30
ARR_2	1,30	0,04	0,09	0,26
REF 2	3,26	0,06	0,27	0,83

Para a obtenção dos valores de absorção de água por capilaridade, os corpos-de-prova foram secados em estufa a 100 °C. Essa secagem em estufa pode ter ocasionado a queima do polímero superabsorvente o que acarretaria num comportamento diferente do fenômeno observado. Portanto, sugere-se fazer o ensaio sem a secagem em estufa para verificar se a secagem influenciaria nos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.

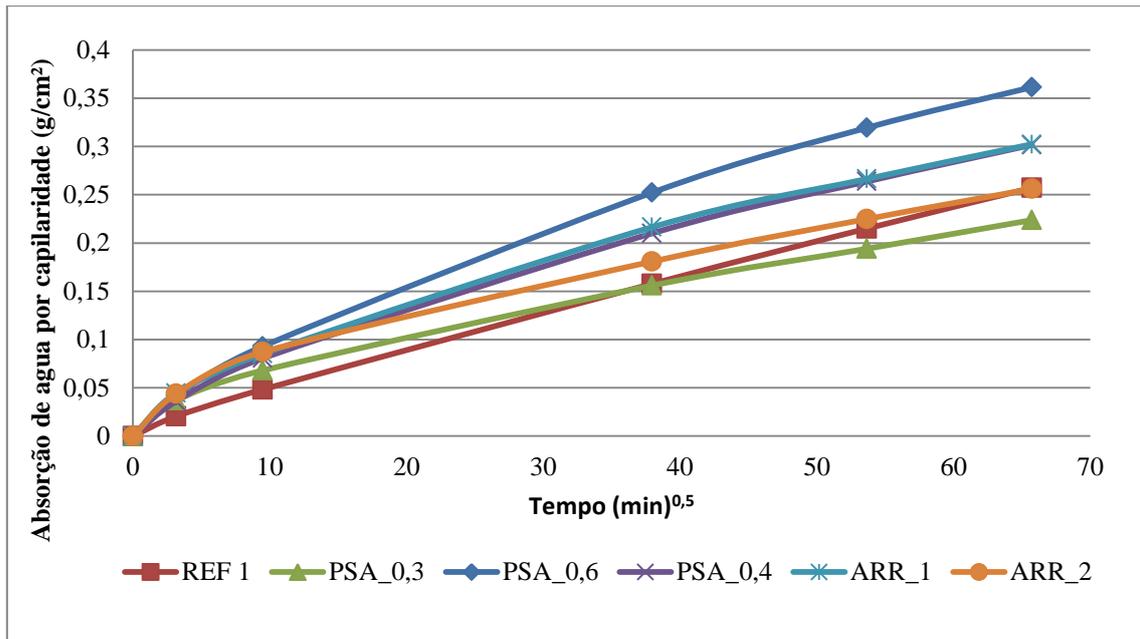


Figura 4.13 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo dos microconcretos

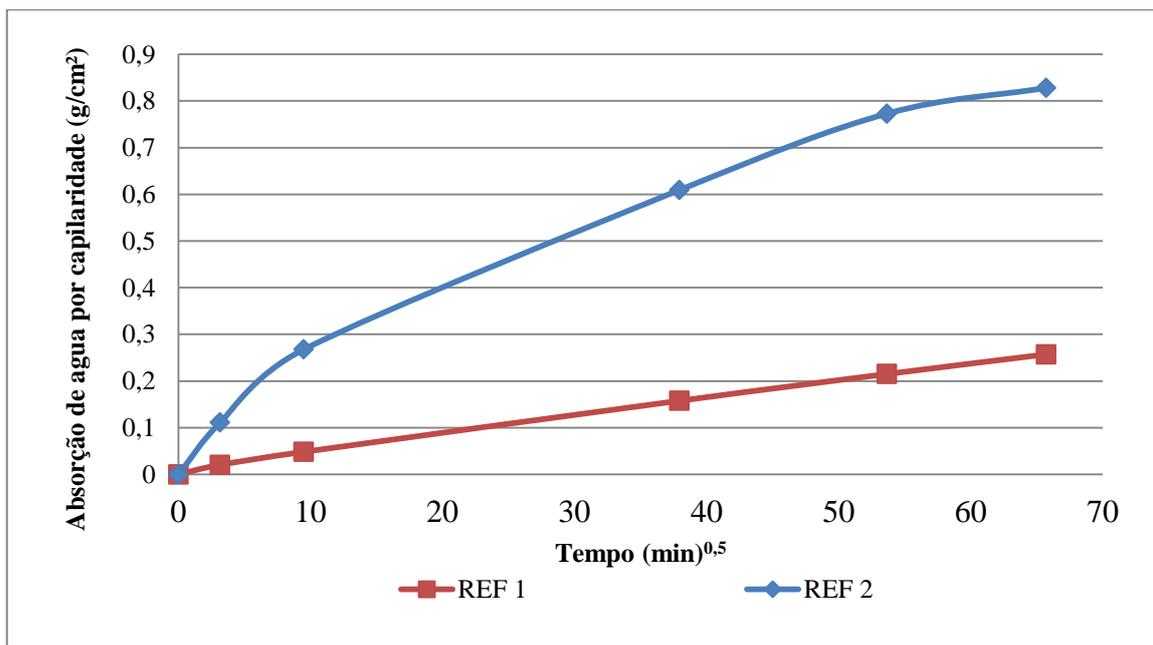


Figura 4.14 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo dos microconcretos de referência

Assim como nas outras propriedades, a absorção por capilaridade parece ser influenciada levemente pelo teor de polímero superabsorvente e pelo aditivo redutor de retração, embora os resultados médios de absorção por capilaridade tenham sido muito próximos. De uma maneira geral, quanto maior o teor de PSA e ARR, maior é a absorção capilar apresentada. Tem-se, portanto, absorção por capilaridade da ordem de $0,26 \text{ g/cm}^2$ para o

microconcreto de referência, $0,22 \text{ g/cm}^2$ para o microconcreto com um teor de 0,3% de PSA, $0,30 \text{ g/cm}^2$ para o microconcreto PSA_0,4, $0,36 \text{ g/cm}^2$ para o microconcreto PSA_0,6 e $0,83 \text{ g/cm}^2$ para o microconcreto REF 2.

Este comportamento pode ser justificado pelo fato dos concretos com maior teor de PSA e ARR provavelmente terem apresentado maior porosidade. No caso específico do PSA, o aumento da absorção capilar pode ser explicado devido ao fato de o polímero ter a capacidade de absorver água. À medida que a água ascende pelos poros do microconcreto e entra em contato com as partículas do polímero, ela é absorvida aumentando assim a capacidade de absorção do sistema.

Conforme o tempo avança, esta capacidade de absorção diminui. Como observado na Figura 4.13, depois de atingido 24 horas a inclinação da curva de capilaridade dos microconcretos com PSA se tornou menos inclinada, ou seja, a capacidade de absorção do polímero diminuiu provavelmente devido a sua saturação.

Para melhor entendimento dos resultados encontrados, no entanto, é necessário se conhecer as proporções de refinamento da estrutura de poros e diâmetro de capilares, por meio de ensaios de porosimetria.

Na literatura não foram encontradas muitas referências sobre o comportamento do PSA em ensaios de absorção por capilaridade. Para Reinhardt and Assmann (2012), a adição de partículas de PSA causa a densificação da matriz levando a uma menor porosidade capilar. Assim, uma maior quantidade de partículas pequenas cria uma estrutura porosa que absorve água mais facilmente do que aquela gerada a partir de uma menor quantidade de partículas maiores (REINHARDT E ASSMANN, 2012). Entende-se, portanto que a adição do PSA aumenta a capilaridade do sistema.

No estudo feito por Snoeck et al. (2012), foi relatado que as misturas de referência não podem ser comparadas às misturas com a adição do PSA. Uma vez que o PSA absorve água da mistura, a relação a/c diminui e, portanto, as duas misturas apresentam matrizes cimentícias diferentes. Neste trabalho, esta afirmação não se aplica, pois nas misturas com PSA foi adicionada uma quantidade a mais de água para cura interna. Assim, foi possível fazer as comparações entre as mesmas.

Estudos feitos por Lopes (2011) obtiveram como resultado o aumento da absorção capilar para um concreto contendo 1% de ARR. No mesmo trabalho, os resultados de porosimetria das pastas dos concretos mostraram que a incorporação do ARR acarreta em um pequeno acréscimo na porosidade total, com o leve aumento no volume dos poros de menor diâmetro (poros de gel e mesoporos) justificando assim os resultados da absorção. De forma geral, Lopes (2011) conclui que o ARR não altera a absorção por capilaridade e, portanto, não prejudica a durabilidade dos concretos sob o ponto de vista da entrada de agentes agressivos.

4.2.5 – Absorção de água por imersão.

Os resultados individuais de absorção de água por imersão encontram-se no Apêndice E. A Tabela 4.9 sintetiza os resultados obtidos de todos os microconcretos estudados e apresenta os resultados médios da porcentagem (%) de absorção.

Tabela 4.10– Resultados médios de absorção por imersão dos microconcretos

Microconcreto	Absorção (%)
REF 1	2,49
PSA_0,3	2,16
PSA_0,4	2,80
PSA_0,6	4,44
ARR_1	1,78
ARR_2	3,16
REF 2	6,33

A propriedade de absorção de água por imersão indica volume dos poros no concreto. Assim como na propriedade de absorção por capilaridade, a absorção por imersão foi influenciada pelo teor de PSA e ARR.

Os resultados dos valores médios de absorção por imersão foram muito próximos. Tem-se, portanto, absorção por imersão da ordem de 2,49% para o microconcreto de referência, 2,16% para o microconcreto com um teor de 0,3% de PSA, 2,80% para o microconcreto PSA_0,40, 4,44% para o microconcreto PSA_0,60 e 3,26% para o microconcreto REF 2.

Os microconcretos com ARR apresentaram um aumento na absorção por imersão para o microconcreto com 2% de ARR. Estudos feitos por Lopes (2011) indicam que o ARR (seja nos teores de 1 ou 2%) acrescenta significativamente a absorção por imersão em relação aos concretos de referencia sem ARR. Lopes (2011) conclui que esse comportamento pode estar relacionado à relação $(a+ARR)/agl$, devido ao fato de não se descontar a quantidade de ARR da água total de amassamento (embora o fabricante informe que o aditivo seja isento de água livre), originando um aumento de água na mistura e conseqüente aumento da porosidade.

Comparando os resultados obtidos do microconcreto REF 1 e do REF 2, era esperado que o microconcreto com maior relação a/c (REF 2) apresentasse maior capacidade de absorção de água devido a sua matriz cimentícia ser mais porosa.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 – CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi feita com a motivação de estudar em microconcretos de alto desempenho à retração autógena, pois nesses concretos se apresenta elevada retração autógena e podem ser suscetíveis ao aparecimento de fissuras nas primeiras idades. Estudou-se a utilização de um produto novo – o polímero superabsorvente (PSA) – e do aditivo redutor de retração (ARR), para mitigar a retração autógena. Investigou-se o efeito do PSA e do ARR nas propriedades mecânicas e os efeitos na durabilidade.

Através das atividades desenvolvidas no programa experimental e dos resultados apresentados no Capítulo 4, podem ser destacadas as principais conclusões.

O uso do aparelho de ultrassom como instrumento para a determinação do tempo zero (t_0) foi considerado apropriado. Foram ensaiados sete microconcretos contendo diferentes proporções de PSA e ARR. Os resultados mostraram que o tempo zero determinado por onda ultrassônica é retardado na presença de PSA, onde o teor de 0,3% causou um retardo de 70 minutos, enquanto a adição nos teores de 0,4% e 0,6% retardou em 90 minutos. Em relação ao ARR, houve um retardo de 30 minutos e 100 minutos, para os teores de 1% e 2%, respectivamente. Em quanto ao aumento da relação a/c, verificou-se também um retardo do tempo zero de apenas 20 minutos.

O atraso na determinação do tempo zero na presença de PSA, possivelmente deve-se a um aumento das partículas floculadas de cimento e ao fato do acréscimo da quantidade de água para cura interna, provocando o afastamento das partículas de cimento umas das outras. Já na presença de ARR, o atraso possivelmente deve-se ao fato do aditivo redutor de retração diminuir a dissolução de álcalis no fluido do poro. Deste modo, essa baixa alcalinidade apresenta uma redução da velocidade de hidratação do cimento ocorrerá.

Quanto à retração autógena, os resultados experimentais mostraram que a adição do polímero superabsorvente e o aditivo redutor de retração, são soluções mitigadoras da retração autógena.

O uso de polímeros superabsorventes mostra-se bastante promissor na redução da retração autógena, sendo o teor de 0,6% mais promissor na redução do fenômeno, pois reduz com eficácia a retração autógena em aproximadamente 80%, aos 3 dias de idade, com ligeira redução nas propriedades mecânicas (até 15%), considerada desprezível especialmente frente ao benefício alcançado na redução da retração.

O aditivo redutor de retração mostrou-se eficaz na diminuição da retração autógena, sendo o teor de 2% mais eficaz, obtendo redução de aproximadamente 40%, aos 3 dias de idade, com ligeira redução nas propriedades mecânicas (até 10%), considerada desprezível face ao benefício alcançado na redução da retração.

Com relação ao microconcreto com resistência convencional (REF 2), apresentou-se ligeira retração autógena da ordem de 72 $\mu\text{m/m}$, aos 3 dias, com um efeito de expansão inicial que foi neutralizado aos 15 dias de idade. Este comportamento era esperado devido ao fato de ter uma relação de água cimento baixa, compatível com a de concretos convencionais cuja retração autógena é desprezível.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo para mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes, investigando sua influência nas propriedades reológicas, elásticas e viscoelásticas.
- Avaliar a influência do polímero superabsorvente adicionado saturado ou úmido, que otimizem o seu efeito de agente de cura interna para reduzir a retração autógena em concretos de alta resistência.
- Avaliar microscopicamente as amostras submetidas à cura interna com PSA e ARR, com realização de ensaios de porosimetria, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, para entender a interferência, das duas soluções mitigadoras, na redução das propriedades mecânicas e na durabilidade.

- Determinar a porcentagem de absorção de água do polímero superabsorvente e o tempo que demora em absorver essa água, a fim de obter com maior precisão o valor mais aproximado de água para cura interna a adicionar à mistura, como por exemplo o ensaio *Teg Bag*.
- Realizar estudos sobre análise de fissuração, considerando retração de origem térmica, autógena e secagem, para determinar se os níveis de retração são aceitáveis de modo a não levar o material a fissurar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738, 2003, Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 6p.

_____. NBR 5739, 2007, Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 4p.

_____. NBR NM 58, 1996, Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 13p.

_____. NBR 9779:1995, Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade - Método de ensaio, 2p.

_____. NBR 9778:2005, Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica - Método de ensaio, 4p.

_____. NBR 13278, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, 4p.

_____. NBR 13279:2005, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, 9p.

_____. NBR 15259:2005, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade- Método de ensaio, 3p.

AMARAL FILHO, E.M. **Concreto de alta resistência (1ra Parte)**. Revista IBRACON, n.4, Ano 2, Abril/Maio/Junho de 1992. PP 40-49.

BALTHAR, V.K.C.B.L. **Retração Autógena e Evolução das Propriedades Mecânicas de Pastas Pozolânicas**. Rio de Janeiro, 2004.

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.

BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. **Mitigation strategies for Autogenous shrinkage cracking**. Cement and Concrete Research, v. 26, 2004. PP. 677-685.

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, n. 7, 2001. PP. 1075-1085.

BOUASKER, M.; GRONDIN, F.; MOUNANGA, P.; KHELIDJ, A. **Retrait chimique des mortiers au très jeune âge : influence des inclusions granulaires**. XXIVèmes RUGC - Construire : les nouveaux défis, 1&2 juin 2006, La Grande Motte

BISSCHOP, J. **Evolution of solid behavior**. In: A. Bentur (ed), *Proceedings of the Early age cracking in cementitious systems*, RILEM, Cachan, France, 2002. PP. 27-33.

CANEVAROLO, S. V. **Ciências dos Polímeros**. 1º Edição. Editora Líber, São Paulo, Brasil. (2002).

CLARO, G. P. P. e SARAIVA, L. M. (2012). **Contribuição ao estudo da retração autógena em microconcretos de alta resistência**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.

COSTA FILHO, T.B. (2005). **Avaliação do desempenho de argamassas com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina em relação à corrosão de armaduras em ambiente contaminado com íons cloreto**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 003A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 201 p.

CRAEYE, B., DE SCHUTTER, G. **Experimental evaluation of autogenous shrinkage by means of a vertical dilatometer for concrete**. In: RILEM Proc. PRO 52 Volume Changes os Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Jensen OM, Lura P, Kovler K (eds) RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux France, 2006. PP. 21-30.

CUSSON, D., HOOGEVEN, T. **Internal curing of high performance concrete with pre soaked fina lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking**. *Cement and Concrete Research*, v.38, 2008. PP.757-765.

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

DUDZIAK L, MECHTCHERINE, V. **Reducing the cracking potential of Ultra-High Performace Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP)**. In: Van Zijil GPAG, Boshoff WP (eds) *Proceedings of the international conference on Advanced Concrete Materials*, 17-19, November, 2010, pp 11-19.

FERREIRA, A.B. de Hollanda. **Mini Dicionário da Língua Portuguesa**. 1 ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1985. 506 p.

GETTU , R.; RONCERO, J., MARTÍN, M. A., 2001, **Evaluation of the performance of concretes incorporating a shrinkage reducing chemical admixture**. In: F.J. Ulm, Z.P. Bazant e F.H. Wittmann (eds), *Concreep-6@MIT*, *Proceedings of the Sixth International Conference on Creep, Shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials*, Cambridge (MA), USA, August, pp. 679-684.

GETTU, R.; RONCERO, J. **Behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures**. In: *Proceedings of the Advances in Concrete and Structures*, edited by Yuan et al. 2003.

HAMMER, T. A.; BJONTEGAARD, O.; SELLEVOLD, E. J. **Measurement methods for testing of early age autogenous strains**. In: A. Bentur (ed), *Proceedings of the Early age cracking in cementitious systems*, RILEM, Cachan, France, 2002. PP.207-215.

HASPARYK, N; LOPEZ, A.N; ANDREADE, M.A; SANTOS, S.B. **O Cimento Portland**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. PP. 295-322.

HASPARYK, N.P et al. **Deformações por Retração e Fluência**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 656-685.

HASHOLT, M. T., JENSEN, O. M., KOVLER, K., & ZHUTOVSKY, S. **Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength**. Construction and Building Materials, 31, 2012. PP. 226-230.

HUA, C., ACKER, P., EHRLACHER, A. **Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. I Modelling at macroscopic scale**. Cement and Concrete Research, 25(7), pp. 1457-1468, 1995.

ISAIA, G. C. O. **Concreto: da Era Clássica à contemporânea**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. PP. 1-43.

JENSEN, O. M., & HANSEN, P. F. **Water-entrained cement-based materials I . Principles and theoretical background**, 2001. PP. 647-654.

JCI - Committee Report of Japan Concrete Institute, Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete, In: E. Tazawa (ed), Autoshrink, Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan June, 1998. PP. 3-67.

JENSEN, O.M.; HANSEN, P.F. **Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background**. Cement and Concrete Research 31, (2001a). PP. 647±654.

JENSEN, O.M.; HANSEN, P.F. **Autogenous deformation and RH-change in perspective**, Cem. Concre. Res 31, 2001b. PP. 1859 – 1865.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Water-entrained cement-based materials II: experimental observations**. Cement and Concrete Research, v. 32, 2002. PP. 973-978.

JENSEN, O.M. **Use of superabsorbent polymers in construction materials**. 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites 13-15 October 2008, Nanjing, China

JOFFILY, I. A. L. (2010). **Avaliação do ensaio de penetração de pino para mensuração indireta da resistência à compressão do concreto**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-003A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p

KOVLER, K., JENSEN, O.M. **Internal Curing of Concete**, RILEM Report 41, RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, 2007.

KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. **Overview and future trends of shrinkage research.** Materials and Structures. Volume 39, 2006. PP. 827-847.

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

LEAL, A.C.F.S. (2012). **Investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-010A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151p.

LOPES, A.N.M. (1999). **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa.** Dissertação de mestrado, publicação E.DM 009A/99, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.

LOPES, A.N.M. (2011). **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura.** Tese doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2011.

LURA, P., JENSEN, O.M., BREUGEL, K.. 2002. **Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms.** Cement and Concrete Research 33 (2003) 223–232.

LURA, P., DURAND, F., MEJLHEDE, O.J. **Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers.** Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. RILEM Proceedings PRO 52, O. M. Jensen et al. (eds.), RILEM Publications S.A.R.L., 2006. PP. 57-66.

MAIA, V.S. (2003). **Avaliação da perda de capacidade portante de vigas de concreto armado danificadas pela corrosão das armaduras de flexão.** Dissertação de mestrado, publicação E.DM 011A/03, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133 p.

MALTESE, C.; PISTOLESI, C.; LOLLI, A. *et al.*, 2005, **Combined effect of expansive shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars.** Cement and Concrete Research, v. 35, pp. 2244 – 2251.

MARCONATO, J. C.; FRANCHETTI, S. M. M. **Polímeros Superabsorventes e as Fraldas Descartáveis.** Um material alternativo para o ensino de polímeros. 2002. Disponível em: <<http://qnesc.sbc.org.br/online/qnesc15/v15a09.pdf>>. Acesso em: 4 Out. 2012, 20:04.

MECHTCHERINE, V.; DUDZIAK, L. **Application of Super Absorbent Polymers (SAP).** In Concrete Construction. RILEM State of the Art Reports Volume 2, 2012, PP. 63-98.

MECHTCHERINE, V., DUDZIAK, L., & HEMPEL, S. **Mitigating early age shrinkage of Ultra - High Performance Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP).**

Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Instituto de Materiais de Construção, TU Dresden, Alemanha, 2009.

MECHTCHERINE, V., GORGES, M., SCHROEFL, C., BRAMASHUBER, W., RIBEIRO, A.B., CUSSON, D., SILVA, E.F, ICHIMIYA, K., IGARASHI, S., KOVLER, K., LOPES, A.N.M., LURA, P., REINHARDT, HW., FILHO, R.D.T, WEISS, J., YE, G. **Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on Autogenous Shrinkage and other Proprieties of a High-performance Finegrained Concrete: Results of a RILEM Round-robin Test, TC 225-SAP.** Manuscript number MAAS-D-13-00152. Aceito para publicação. Materials and Structures. 2013

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1.ed. São Paulo: IBRACOM, 2008.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.,1981, **Concrete**, Prentice-Hall. 1 ed., New Jersey, Englewood Cliffs.

MORTIMER, R. G. **Physical chemistry.** 3. ed. Canada: Elsevier, 2008. 1385 p.

OLIVEIRA, L.B.(2001). **Avaliação da influência de juntas entre o material de reparo e o concreto antigo com relação à proteção da armadura.** Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM-012A/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170p

PALACIOS, M.P.G (2012). **Emprego de Ensaios Não Destrutivos e de Extração de Testemunhos na Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-007A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 165p.

PEREIRA., M. S. (2008). **Controle da Resistência do Concreto: Paradigmas e Variabilidades – Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação PECC. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 229p.

PEREIRA, D. F. e MATOS, V. N. (2011). **Combate à retração autógena utilizando polímeros super absorventes.** Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 72 p.

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

RAJABIPOUR, F., SANT, G., WEISS, JASON. **Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution.** Cement Concrete Research, no. 38, pp 606-615, 2008

RAMOS, D.V.M. (2005). **Avaliação da influência das elevadas temperaturas em concretos empregados em revestimentos de túneis.** Dissertação de Mestrado em

Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DM – 011A/05 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 320p.

REINHARDT, H.W, ASSMANN, A. **Application of Super Absorbent Polymers (SAP)**. In Concrete Construction. RILEM State of the Art Reports Volume 2, 2012. PP. 115 - 135.

REINHARDT, H.W, GROSSE, C.U. **Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete**. In Construction and Building Materials. 2004. PP. 145 - 154.

RIBEIRO, J.L.D.; TEM CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS,2001.

RODOLPHO, P. M. (2007). **Comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DM –011A/07 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p.

RODRIGUES, G. S. S. (2010). **Contribuição ao Estudo da Retração e da Fluência e seus Mecanismos de Atuação a Baixas Idades em Concretos Estruturais**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação: E.TD – 005 A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 222p.

SANTOS, C. C.N (2008). **A influência das características da areia artificialmente britada nas propriedades do estado fresco do concreto**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DM –004A/08 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 226p.

SANTOS, L. (2006). **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-005A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p

SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M., **Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas**. Revista Matéria, v. 12, n. 2, 2007.

SILVA, E.F. (1997). **Concreto de Alto Desempenho: estudo de propriedades mecânicas**. Dissertação de mestrado, publicação E.DM 003A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 166 p.

SILVA, E. F., (2007), **Variações dimensionais em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Dezembro.

SILVA, F.G., LIBORIO, J.B.L. **Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos**. VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias, Vol. 15, No 2. 2005

SILVOSO, M. M. Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos

efeitos da hidratação via algoritmos genéticos. 2003. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, V. B. (2005). Avaliação da eficiência de pastilhas galvânicas na proteção de armaduras em estruturas de concreto sujeitas à ação de cloretos. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-008A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 193p

SILVA, E.F.; LOPES, A.N.M.; REGO, P.I.A.; AKITAYA, T.A. Técnica da propagação do pulso ultrassônico para determinação do tempo zero (t_0) em concretos de alto desempenho. A engenharia como alavanca para o desenvolvimento e sustentabilidade. CLME'2011/III CEM. 2011.

SCHRÖFL, C.; MECHTCHERINE, V.; GORGES, M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage, Cement and Concrete Research. 2012. Doi:10.1016/j.cemconres.2012.03.01.1

SOLIMAN, A.M, NEHDI, M.L. Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC. Construction and Building Materials 41, 2013, pp 270-275.

STRUBLE, L. J.; LEI, W. G. Rheological changes associated with setting of cement pastes. Advanced Cement Based Materials, v. 2, p. 224-230, 1995.

TRAMFLOC, INC. (2012). Polimeros superabsorventes para retenção de água e controle de erosão. Disponível em: <<http://www.tramfloc.com/tf62.html>>. Acesso em: 13 mar. 2012.

TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete. In: E. Tazawa (ed), Autoshrink' 98, proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan June, 1999. PP. 269-280.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S; KASAI, T. Chemical Shrinkage and Autogenous Shrinkage of hydrating cement paste. Cement and Concrete Research, v. 25, nº 2, February 1995, pp. 288-292.

TEIXEIRA, M.P., (1998). Metodologia auxiliares para o diagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto. Dissertação de mestrado, Publicação E.DM 012A/98, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.

VASCONCELOS, K.L. DE. (1997). Avaliação comparativa da eficiência de inibidores de corrosão em armaduras de estruturas de concreto. Dissertação de mestrado, Publicação E.DM 014A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

WEBER, S; REINHARDT, H.W. **A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing**, Adv. Cem. Based Mater. 6. 1997. 59± 68.

WEISS, J., 2002, **Experimental determination of the “time zero” to (maturity-zero Mo)**, In: Proceedings of the Early age cracking in cementitious systems – RILEM, Cachan, France, 2002, edited by A. Bentur, p.195-206.

YAO, Y; ZHU, Y; YANG, Y. **Incorporation superabsorbent polymer (SAP) particles as controlling pre-existing flaws to improve the performance of engineered cementitious composites (ECC)**. Construction and Building Materials 28, 2011. PP. 139–145.

APÊNDICES

**APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE
RETRAÇÃO AUTÓGENA MEDIDA COM EXTENSOMETROS**

Tabela A.1- Resultados individuais de retração autógena do microconcreto de referência (REF 1)

Tempo (dias)	ΔL - CP1 (μm)	ΔL - CP2 (μm)	ΔL - CP3 (μm)	ΔL - Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0
1,00	-2,44	19,51	14,63	11
2,00	-126,83	-118,54	-138,54	-128
3,00	-195,61	-192,20	-205,37	-198
4,00	-249,76	-246,34	-270,24	-255
5,00	-300,49	-304,88	-307,32	-304
6,00	-328,78	-313,76	-334,63	-326
7,00	-357,56	-323,41	-347,32	-343
8,00	-390,24	-370,73	-375,61	-379
9,00	-400,00	-382,93	-385,37	-389
10,00	-409,76	-404,88	-395,12	-403
11,00	-414,63	-404,88	-400,00	-407
12,00	-419,51	-419,51	-407,32	-415
13,00	-429,27	-429,27	-414,63	-424
14,00	-434,15	-443,90	-421,95	-433
15,00	-443,90	-448,78	-431,71	-441
16,00	-443,90	-448,78	-436,59	-443
17,00	-453,66	-453,66	-439,02	-449
18,00	-456,10	-458,54	-448,78	-454
19,00	-462,44	-475,61	-463,41	-467
20,00	-475,61	-497,56	-480,49	-485
21,00	-482,93	-497,56	-482,93	-488
22,00	-492,68	-497,56	-487,80	-493
23,00	-502,44	-504,88	-487,80	-498
24,00	-507,32	-512,20	-490,24	-503
25,00	-512,20	-517,07	-492,68	-507
26,00	-529,27	-529,27	-507,32	-522
27,00	-536,59	-531,71	-507,32	-525
28,00	-536,59	-531,71	-509,76	-526

Tabela A.2 – Resultados individuais de retração autógena do microconcreto com teor de 0,3% de PSA (PSA_0,3)

Tempo (dias)	ΔL - CP1 (μm)	ΔL - CP2 (μm)	ΔL - CP3 (μm)	ΔL - Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0
1,00	14,63	24,39	21,95	20
2,00	-117,07	-102,44	-97,56	-106
3,00	-160,98	-136,59	-143,90	-147
4,00	-204,88	-170,73	-190,24	-189
5,00	-214,63	-180,49	-195,12	-197
6,00	-248,78	-209,76	-219,51	-226
7,00	-258,54	-219,51	-226,83	-235
8,00	-278,05	-239,02	-248,78	-255
9,00	-287,80	-246,34	-258,54	-264
10,00	-297,56	-253,66	-268,29	-273
11,00	-307,32	-263,41	-278,05	-283
12,00	-307,32	-273,17	-287,80	-289
13,00	-329,27	-295,12	-307,32	-311
14,00	-336,59	-297,56	-312,20	-315
15,00	-346,34	-307,32	-321,95	-325
16,00	-356,10	-309,76	-331,71	-333
17,00	-365,85	-317,07	-339,02	-341
18,00	-375,61	-326,83	-346,34	-350
19,00	-385,37	-336,59	-353,66	-359
20,00	-390,24	-341,46	-360,98	-364
21,00	-390,24	-341,46	-365,85	-366
22,00	-390,24	-341,46	-365,85	-366
23,00	-390,24	-348,78	-365,85	-368
24,00	-395,12	-351,22	-368,29	-372
25,00	-395,12	-356,10	-370,73	-374
26,00	-404,88	-360,98	-373,17	-380
27,00	-404,88	-365,85	-378,05	-383
28,00	-404,88	-365,85	-378,05	-383

Tabela A.3 – Resultados individuais de retração autógena do microconcreto com teor de 0,4% de PSA (PSA_0,4)

Tempo (dias)	ΔL - CP1 ($\mu\text{m/m}$)	ΔL - CP2 ($\mu\text{m/m}$)	ΔL - CP3 ($\mu\text{m/m}$)	ΔL - Média
0	0,00	0,00	0,00	0
1	24,39	34,15	36,59	32
2	4,88	7,32	19,51	11
3	-29,27	-29,27	-19,51	-26
4	-63,41	-65,85	-73,17	-67
5	-136,59	-126,83	-121,95	-128
6	-141,46	-126,83	-126,83	-132
7	-160,98	-156,10	-156,10	-158
8	-185,37	-190,24	-180,49	-185
9	-214,63	-209,76	-214,63	-213
10	-243,90	-229,27	-248,78	-241
11	-243,90	-234,15	-268,29	-249
12	-243,90	-234,15	-263,41	-247
13	-253,66	-234,15	-263,41	-250
14	-268,29	-253,66	-263,41	-262
15	-273,17	-263,41	-270,73	-269
16	-282,93	-282,93	-297,56	-288
17	-297,56	-258,54	-297,56	-285
18	-297,56	-268,29	-302,44	-289
19	-307,32	-268,29	-307,32	-294
20	-317,07	-278,05	-317,07	-304
21	-326,83	-302,44	-321,95	-317
22	-331,71	-292,68	-326,83	-317
23	-331,71	-300,00	-334,15	-322
24	-339,02	-307,32	-339,02	-328
25	-341,46	-312,20	-346,34	-333
26	-341,46	-321,95	-351,22	-338
27	-343,90	-331,71	-356,10	-344
28	-343,90	-331,71	-356,10	-344

Tabela A.4 – Resultados individuais de retração autógena do microconcreto com teor de 0,6% de PSA (PSA_0,6)

Tempo (dias)	ΔL - CP1 (μm)	ΔL - CP2 (μm)	ΔL - CP3 (μm)	ΔL - Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0
1,00	68,29	78,05	85,37	77
2,00	43,90	58,54	56,10	53
3,00	29,27	43,90	41,46	38
4,00	14,63	29,27	21,95	22
5,00	-2,44	-9,76	0,00	-4
6,00	-19,51	-39,02	-12,20	-24
7,00	-43,90	-68,29	-31,71	-48
8,00	-48,78	-78,05	-41,46	-56
9,00	-63,41	-90,24	-56,10	-70
10,00	-82,93	-102,44	-75,61	-87
11,00	-102,44	-107,32	-95,12	-102
12,00	-121,95	-126,83	-114,63	-121
13,00	-131,71	-139,02	-124,39	-132
14,00	-141,46	-146,34	-139,02	-142
15,00	-151,22	-146,34	-139,02	-146
16,00	-151,22	-146,34	-146,34	-148
17,00	-156,10	-151,22	-146,34	-151
18,00	-156,10	-156,10	-146,34	-153
19,00	-160,98	-163,41	-151,22	-159
20,00	-160,98	-173,17	-153,66	-163
21,00	-165,85	-180,49	-153,66	-167
22,00	-178,05	-187,80	-168,29	-178
23,00	-190,24	-195,12	-173,17	-186
24,00	-197,56	-195,12	-182,93	-192
25,00	-204,88	-200,00	-197,56	-201
26,00	-209,76	-200,00	-197,56	-202
27,00	-209,76	-209,76	-202,44	-207
28,00	-209,76	-209,76	-202,44	-207

Tabela A.5 – Resultados individuais de retração autógena do microconcreto com teor de 1% de ARR (ARR_1)

Tempo (dias)	ΔL - CP1 (μm)	ΔL - CP2 (μm)	ΔL - CP3 (μm)	ΔL - Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0
1,00	14,63	34,15	21,95	24
2,00	-63,41	-24,39	-87,80	-59
3,00	-141,46	-90,24	-151,22	-128
4,00	-180,49	-131,71	-187,80	-167
5,00	-224,39	-178,05	-221,95	-208
6,00	-239,02	-187,80	-243,90	-224
7,00	-256,10	-204,88	-256,10	-239
8,00	-263,41	-219,51	-265,85	-250
9,00	-275,61	-229,27	-270,73	-259
10,00	-280,49	-234,15	-282,93	-266
11,00	-295,12	-246,34	-290,24	-277
12,00	-302,44	-260,98	-297,56	-287
13,00	-307,32	-265,85	-304,39	-293
14,00	-317,07	-273,17	-317,07	-302
15,00	-324,39	-280,49	-321,95	-309
16,00	-329,27	-282,93	-329,27	-314
17,00	-336,59	-285,37	-331,71	-318
18,00	-339,02	-287,80	-336,59	-321
19,00	-346,34	-295,12	-339,02	-327
20,00	-356,10	-297,56	-339,02	-331
21,00	-358,54	-302,44	-339,02	-333
22,00	-365,85	-309,76	-346,34	-341
23,00	-372,20	-321,95	-356,10	-350
24,00	-373,17	-326,83	-363,41	-354
25,00	-375,61	-329,27	-363,41	-356
26,00	-378,05	-336,59	-365,85	-360
27,00	-380,49	-336,59	-368,29	-362
28,00	-380,49	-341,46	-368,29	-363

Tabela A.6 – Resultados individuais de retração autógena do microconcreto com teor de 2% de ARR (ARR_2)

Tempo (dias)	ΔL - CP1 (μm)	ΔL - CP2 (μm)	ΔL - CP3 (μm)	ΔL - Média
0,00	0,00	0,00	0,00	0
1,00	29,27	34,15	19,51	28
2,00	-34,15	24,39	-29,27	-13
3,00	-87,80	-78,05	-117,07	-94
4,00	-151,22	-112,20	-160,98	-141
5,00	-212,20	-165,85	-212,20	-197
6,00	-221,95	-187,80	-224,39	-211
7,00	-224,39	-200,00	-239,02	-221
8,00	-258,54	-229,27	-260,98	-250
9,00	-263,41	-234,15	-268,29	-255
10,00	-265,85	-243,90	-278,05	-263
11,00	-275,61	-229,27	-273,17	-259
12,00	-278,05	-248,78	-281,46	-269
13,00	-290,24	-258,54	-287,80	-279
14,00	-292,68	-268,29	-300,00	-287
15,00	-304,88	-268,29	-307,32	-293
16,00	-304,88	-268,29	-307,32	-293
17,00	-309,76	-270,73	-309,76	-297
18,00	-309,76	-270,73	-309,76	-297
19,00	-312,20	-273,17	-312,20	-299
20,00	-312,20	-273,17	-314,63	-300
21,00	-312,20	-273,17	-314,63	-300
22,00	-314,63	-275,61	-314,63	-302
23,00	-314,63	-275,61	-317,07	-302
24,00	-319,51	-280,49	-319,51	-307
25,00	-319,51	-280,49	-321,95	-307
26,00	-326,83	-285,37	-324,39	-312
27,00	-326,83	-285,37	-324,39	-312
28,00	-324,39	-285,37	-326,83	-312

Tabela A.7 – Resultados individuais de retração autógena do microconcreto com relação a/c=0,5 (REF 2)

Tempo (dias)	ΔL - CP1 (μm)	ΔL - CP2 (μm)	ΔL - CP3 (μm)	ΔL - Média
0	0,00	0,00	0,00	0
1	102,44	87,80	97,56	96
2	70,73	68,29	80,49	73
3	65,85	73,17	78,05	72
4	60,98	63,41	70,73	65
5	51,22	53,66	68,29	58
6	46,34	48,78	60,98	52
7	36,59	43,90	56,10	46
8	34,15	34,15	53,66	41
9	21,95	21,95	41,46	28
10	19,51	9,76	34,15	21
11	17,07	-7,32	31,71	14
12	17,07	-9,76	26,83	11
13	14,63	-12,20	24,39	9
14	12,20	-14,63	19,51	6
15	2,44	-21,95	14,63	-2
16	2,44	-24,39	9,76	-4
17	-2,44	-24,39	4,88	-7
18	-2,44	-29,27	-2,44	-11
19	-2,44	-31,71	-9,76	-15
20	-7,32	-34,15	-14,63	-19
21	-7,32	-36,59	-39,02	-28
22	-12,20	-39,02	-34,15	-28
23	-14,63	-41,46	-39,02	-32
24	-14,63	-41,46	-43,90	-33
25	-19,51	-41,46	-43,90	-35
26	-19,51	-43,90	-43,90	-36
27	-19,51	-46,34	-43,90	-37
28	-19,51	-46,34	-43,90	-37

**APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CUBOS E CILINDROS E DE
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO**

Tabela B.1 – Resultados de resistência à compressão nos cubos na idade de 7 e 28 dias do microconcreto de referência (REF 1)

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	7	16	15780	986,30	98,60
1B		16	16180	1011,30	101,10
2A		16	16430	1026,90	102,70
2B		16	17090	1068,10	
3A		16	16015	1000,90	100,10
3B		16	15490	968,10	96,80
4A		16	15680	980,00	98,00
4B		16	16240	1015,00	101,50
5A		16	16095	1005,90	100,60
5B		16	16410	1025,60	102,60
6A		16	16080	1005,00	100,50
6B		16	16095	1005,90	100,60
7A		16	16295	1018,40	101,80
7B		16	16200	1012,50	101,30
8A		16	16225	1014,10	101,40
8B		16	15795	987,20	98,70
9A		16	16135	1008,40	100,80
9B		16	16190	1011,90	101,20

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	28	16	19100	1193,80	119,40
1B		16	19840	1240,00	124,00
2A		16	20060	1253,80	125,40
2B		16	20725	1295,30	129,50
3A		16	19420	1213,80	121,40
3B		16	19520	1220,00	122,00
4A		16	18810	1175,60	117,60
4B		16	20075	1254,70	125,50
5A		16	19850	1240,60	124,10
5B		16	20175	1260,90	126,10
6A		16	19955	1247,20	124,70
6B		16	19860	1241,30	124,10
7A		16	19770	1235,60	123,60
7B		16	19685	1230,30	123,00
8A		16	20490	1280,60	128,10
8B		16	19250	1203,10	120,30
9A		16	20095	1255,90	125,60
9B		16	17915	1119,70	

Tabela B.2 – Resultados de resistência à compressão nos cubos na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,3% de PSA(PSA_0,3)

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	7	16	16125	1007,80	100,80
1B		16	15500	968,80	96,90
2A		16	15280	955,00	95,50
2B		16	16190	1011,90	101,20
3A		16	15660	978,80	97,90
3B		16	15810	988,10	98,80
4A		16	14995	937,20	93,70
4B		16	14935	933,40	93,30
5A		16	15830	989,40	98,90
5B		16	16540	1033,80	
6A		16	15990	999,40	99,90
6B		16	15300	956,30	95,60
7A		16	15075	942,20	94,20
7B		16	15120	945,00	94,50
8A		16	16225	1014,10	101,40
8B		16	15300	956,30	95,60
9A		16	14905	931,60	93,20
9B		16	16110	1006,90	100,70

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	28	16	16915	1057,20	
1B		16	19300	1206,30	120,60
2A		16	18825	1176,60	117,70
2B		16	19485	1217,80	121,80
3A		16	16610	1038,10	
3B		16	18810	1175,60	117,60
4A		16	18985	1186,60	118,70
4B		16	20035	1252,20	125,20
5A		16	20475	1279,70	
5B		16	19475	1217,20	121,70
6A		16	19175	1198,40	119,80
6B		16	19040	1190,00	119,00
7A		16	18865	1179,10	117,90
7B		16	18985	1186,60	118,70
8A		16	19006	1187,90	118,80
8B		16	19340	1208,80	120,90
9A		16	19770	1235,60	123,60
9B		16	19770	1235,60	123,60

Tabela B.3 – Resultados de resistência à compressão nos cubos na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,4% de PSA(PSA_0,4).

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	7	16	15915	994,70	99,50
1B		16	15745	984,10	98,40
2A		16	15755	984,70	98,50
2B		16	15075	942,20	94,20
3A		16	16020	1001,30	100,10
3B		16	15835	989,70	99,00
4A		16	15055	940,90	94,10
4B		16	15030	939,40	93,90
5A		16	14990	936,90	93,70
5B		16	15545	971,60	97,20
6A		16	15065	941,60	94,20
6B		16	14440	902,50	90,30
7A		16	14740	921,30	92,10
7B		16	14950	934,40	93,40
8A		16	14995	937,20	93,70
8B		16	15990	999,40	99,90
9A		16	15615	975,90	97,60
9B		16	14325	895,30	89,50

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	28	16	19000	1187,50	118,80
1B		16	19120	1195,00	119,50
2A		16	19310	1206,90	120,70
2B		16	19215	1200,90	120,10
3A		16	19590	1224,40	122,40
3B		16	18770	1173,10	117,30
4A		16	18415	1150,90	115,10
4B		16	18660	1166,30	116,60
5A		16	19350	1209,40	120,90
5B		16	20185	1261,60	126,20
6A		16	18725	1170,30	117,00
6B		16	19065	1191,60	119,20
7A		16	19140	1196,30	119,60
7B		16	18335	1145,90	114,60
8A		16	18275	1142,20	114,20
8B		16	18940	1183,80	118,40
9A		16	19470	1216,90	121,70
9B		16	17155	1072,20	

Tabela B.4 – Resultados de resistência à compressão nos cubos na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,6% de PSA(PSA_0,6).

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	7	16	14985	936,60	93,70
1B		16	14105	881,60	88,20
2A		16	15835	989,70	99,00
2B		16	14455	903,40	90,30
3A		16	15315	957,20	95,70
3B		16	14860	928,80	92,90
4A		16	14840	927,50	92,80
4B		16	15350	959,40	95,90
5A		16	15585	974,10	97,40
5B		16	14405	900,30	90,00
6A		16	14310	894,40	89,40
6B		16	14975	935,90	93,60
7A		16	16110	1006,90	100,70
7B		16	15400	962,50	96,30
8A		16	15795	987,20	98,70
8B		16	15700	981,30	98,10
9A		16	15075	942,20	94,20
9B		16	15955	997,20	99,70

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	28	16	19935	1245,90	124,60
1B		16	19015	1188,40	118,80
2A		16	19280	1205,00	120,50
2B		16	19655	1228,40	122,80
3A		16	18915	1182,20	118,20
3B		16	17450	1090,60	109,10
4A		16	19420	1213,80	121,40
4B		16	18390	1149,40	114,90
5A		16	17850	1115,60	111,60
5B		16	17595	1099,70	110,00
6A		16	19385	1211,60	121,20
6B		16	18215	1138,40	113,80
7A		16	18700	1168,80	116,90
7B		16	17405	1087,80	108,80
8A		16	19045	1190,30	119,00
8B		16	18195	1137,20	113,70
9A		16	18670	1166,90	116,70
9B		16	18900	1181,30	118,10

Tabela B.5 – Resultados de resistência à compressão nos cubos na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 1% de ARR(ARR_1).

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	7	16	15745	984,10	98,40
1B		16	16980	1061,30	106,10
2A		16	15395	962,20	96,20
2B		16	17755		
3A		16	15750	984,40	98,40
3B		16	16895	1055,90	105,60
4A		16	15200	950,00	95,00
4B		16	15285	955,30	95,50
5A		16	15855	990,90	99,10
5B		16	15545	971,60	97,20
6A		16	15495	968,40	96,80
6B		16	16440	1027,50	102,80
7A		16	16615	1038,40	103,80
7B		16	15275	954,70	95,50
8A		16	16325	1020,30	102,00
8B		16	16380	1023,80	102,40
9A		16	16328	1020,50	102,10
9B		16	15205	950,30	95,00

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc kgf/cm ²	fc MPa
1A	28	16	18320	1145,00	114,50
1B		16	18590	1161,90	116,20
2A		16	19135	1195,90	119,60
2B		16	19280	1205,00	120,50
3A		16	18410	1150,60	115,10
3B		16	19335	1208,40	120,80
4A		16	18630	1164,40	116,40
4B		16	18875	1179,70	118,00
5A		16	19635	1227,20	122,70
5B		16	18640	1165,00	116,50
6A		16	18985	1186,60	118,70
6B		16	18305	1144,10	114,40
7A		16	17830	1114,40	111,40
7B		16	19105	1194,10	119,40
8A		16	18015	1125,90	112,60
8B		16	18395	1149,70	115,00
9A		16	19245	1202,80	120,30
9B		16	18650	1165,60	116,60

Tabela B.6 – Resultados de resistência à compressão nos cubos na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 2% de ARR(ARR_2).

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1A	7	16	16055	1003,40	100,30
1B		16	15765	985,30	98,50
2A		16	15765	985,30	98,50
2B		16	15155	947,20	94,70
3A		16	15345	959,10	95,90
3B		16	16195	1012,20	101,20
4A		16	13360		
4B		16	16235	1014,70	101,50
5A		16	15830	989,40	98,90
5B		16	14100		
6A		16	15680	980,00	98,00
6B		16	16135	1008,40	100,80
7A		16	15025	939,10	93,90
7B		16	16600	1037,50	103,80
8A		16	15195	949,70	95,00
8B		16	16715	1044,70	104,50
9A		16	16095	1005,90	100,60
9B		16	15045	940,30	94,00

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1A	28	16	15525		
1B		16	18710	1169,40	116,90
2A		16	17520	1095,00	109,50
2B		16	17875	1117,20	111,70
3A		16	18440	1152,50	115,30
3B		16	18010	1125,60	112,60
4A		16	15905		
4B		16	16830	1051,90	105,20
5A		16	18635	1164,70	116,50
5B		16	18125	1132,80	113,30
6A		16	18765	1172,80	117,30
6B		16	18905	1181,60	118,20
7A		16	20390		
7B		16	20445		
8A		16	18545	1159,10	115,90
8B		16	19145	1196,60	119,70
9A		16	18345	1146,60	114,70
9B		16	18575	1160,90	116,10

Tabela B.7 – Resultados de resistência à compressão nos cubos na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com relação a/c=0,5 (REF 2).

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1A	7	16	15745	984,10	98,40
1B		16	16980	1061,30	106,10
2A		16	15395	962,20	96,20
2B		16	17755		
3A		16	15750	984,40	98,40
3B		16	16895	1055,90	105,60
4A		16	15200	950,00	95,00
4B		16	15285	955,30	95,50
5A		16	15855	990,90	99,10
5B		16	15545	971,60	97,20
6A		16	15495	968,40	96,80
6B		16	16440	1027,50	102,80
7A		16	16615	1038,40	103,80
7B		16	15275	954,70	95,50
8A		16	16325	1020,30	102,00
8B		16	16380	1023,80	102,40
9A		16	16328	1020,50	102,10
9B		16	15205	950,30	95,00

CP	Idade (dias)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1A	28	16	18320	1145,00	114,50
1B		16	18590	1161,90	116,20
2A		16	19135	1195,90	119,60
2B		16	19280	1205,00	120,50
3A		16	18410	1150,60	115,10
3B		16	19335	1208,40	120,80
4A		16	18630	1164,40	116,40
4B		16	18875	1179,70	118,00
5A		16	19635	1227,20	122,70
5B		16	18640	1165,00	116,50
6A		16	18985	1186,60	118,70
6B		16	18305	1144,10	114,40
7A		16	17830	1114,40	111,40
7B		16	19105	1194,10	119,40
8A		16	18015	1125,90	112,60
8B		16	18395	1149,70	115,00
9A		16	19245	1202,80	120,30
9B		16	18650	1165,60	116,60

Tabela B.8 – Resultados de resistência à compressão nos cilindros na idade de 7 e 28 dias do microconcreto de referência (REF 1).

CP	Idade (dias)	Peso (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1	7	455,04	4,979	9,955	19,474	17805	914,30	91,40
2		463,38	4,993	10,09	19,584	17375	887,20	88,70
3		459,29	4,973	10,061	19,424	16645	857,00	85,70
4		459,9	4,984	10,08	19,513	17290	886,10	88,60
5		455,82	4,960	10,012	19,322	16540	856,00	85,60
6		457,36	4,991	10,035	19,564	17195	878,90	87,90
7		456,45	4,997	10,027	19,611	17340	884,20	88,40
1	28	456,22	4,9555	10,12	19,287	20240	1049,40	104,90
2		452,48	4,9535	10,012	19,271	20345	1055,70	105,60
3		449,43	4,9615	10,023	19,334	20550	1062,90	106,30
4		452,32	5,048	10,012	20,014	18940		
5		452,18	4,959	10,003	19,314	19770	1023,60	102,40
6		450,13	4,961	10,039	19,330	16800		
7		449,01	4,959	10,033	19,314	20575	1065,30	106,50

Tabela B.9 – Resultados de resistência à compressão nos cilindros na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,3% de PSA (PSA_0,3).

CP	Idade (dias)	Peso (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1	7	449,18	4,9665	10,047	19,373	16565	855,10	85,50
2		450,36	4,980	10,05	19,478	16890	867,10	86,70
3		451,12	4,955	10,038	19,287	17975		
4		441,66	4,974	9,982	19,431	15935	820,10	82,00
5		441,76	4,974	9,922	19,435	16610	854,60	85,50
6		447,15	4,971	10,04	19,412	16460	847,90	84,80
7		446,13	4,960	10,051	19,326	17060	882,70	88,30
1	28	441,3	4,961	10	19,330	18815	973,40	97,30
2		439,6	4,989	9,991	19,553	18875	965,30	96,50
3		438,73	4,992	9,92	19,572	18620	951,30	95,10
4		442,9	4,982	9,996	19,494	18615	954,90	95,50
5		452,9	5,054	10,033	20,065	19050	949,40	94,90
6		445	4,957	10,027	19,303	19330	1001,40	100,10
7		448	4,960	10,077	19,322	19440	1006,10	100,60

Tabela B.10 – Resultados de resistência à compressão nos cilindros na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,4% de PSA (PSA_0,4).

CP	Idade (dias)	Peso (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1	7	447,1	4,959	10,065	19,314	16395	848,90	84,90
2		441,4	4,951	10,081	19,256	15475	803,60	80,40
3		445,4	5,017	10,092	19,769	15830	800,80	80,10
4		444,9	5,022	10,112	19,812	15520	783,40	78,30
5		443,6	4,956	10,1	19,295	15860	822,00	82,20
6		441,9	4,973	10,106	19,424	15920	819,60	82,00
7		444,1	4,962	10,051	19,342	16180	836,50	83,70
1	28	445,7	4,969	100,54	19,396	18900	974,40	97,40
2		441,7	4,977	99,23	19,455	17905	920,30	92,00
3		442,1	4,980	100,4	19,478	18365	942,80	94,30
4		446,1	4,985	100,48	19,521	18805	963,30	96,30
5		442,1	4,983	100,28	19,506	18795	963,60	96,40
6		441,4	5,002	99,77	19,651	18785	955,90	95,60
7		435	4,974	99,4	19,435	16905		

Tabela B.11 – Resultados de resistência à compressão nos cilindros na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,6% de PSA (PSA_0,6).

CP	Idade (dias)	Peso (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1	7	432	4,960	96,23	19,322	14700	760,80	76,10
2		445,64	4,987	97,55	19,533	14145	724,20	72,40
3		438,47	4,952	97,17	19,264	14055	729,60	73,00
4		444,8	4,917	97,56	18,992	14935	786,40	78,60
5		445,1	4,981	98	19,490	14855	762,20	76,20
6		444,78	4,969	97,6	19,392	14750	760,60	76,10
7		438,43	4,946	96,64	19,217	13865	721,50	72,20
1	28	440,01	4,973	100	19,427	17545	903,10	90,30
2		448,95	5,056	100,29	20,077	17705	881,80	88,20
3		438,85	4,958	99,58	19,307	18340	949,90	95,00
4		442,2	4,950	99,43	19,244	17695	919,50	92,00
5		441,18	4,968	99,6	19,384	20295		
6		441,84	4,955	100	19,283	17145	889,10	88,90
7		438,81	4,984	100	19,510	17545	899,30	89,90

Tabela B.12 – Resultados de resistência à compressão nos cilindros na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 1% de ARR (ARR_1).

CP	Idade (dias)	Peso (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1	7	445,1	4,971	96,23	19,408	16070	828,00	82,80
2		48,1	4,965	97,55	19,361	15875	819,90	82,00
3		444,9	4,95	97,17	19,244	15485	804,70	80,50
4		445,7	4,937	97,56	19,143	16565	865,30	86,50
5		447,4	4,983	98	19,502	15670	803,50	80,40
6		451	4,9615	97,6	19,334	15930	823,90	82,40
7		450,1	4,979	96,64	19,470	15760	809,40	80,90
1	28	447,24	4,9505	9,941	19,248	19360	1005,80	100,60
2		444,28	4,966	9,926	19,369	19075	984,80	98,50
3		457,64	4,98	9,835	19,478	20080	1030,90	103,10
4		446,39	4,99	9,924	19,557	18855	964,10	96,40
5		450,2	4,972	9,801	19,416	19540	1006,40	100,60
6		449,58	4,97	9,854	19,400	20280	1045,40	104,50
7		452,45	4,979	9,986	19,470	19305	991,50	99,20

Tabela B.13 – Resultados de resistência à compressão nos cilindros na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 2% de ARR (ARR_2).

CP	Idade (dias)	Peso (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1	7	447,55	4,969	99,21	19,392	15090	778,10	77,80
2		452,89	4,9605	99,75	19,326	15245	788,80	78,90
3		450,22	4,981	99,68	19,486	15200	780,00	78,00
4		451,1	4,961	99,97	19,330	15545	804,20	80,40
5		450,27	4,985	99,86	19,517	14545	745,20	74,50
6		449,14	4,963	99,56	19,345	15015	776,20	77,60
7		449,73	4,9685	99,9	19,388	16260		
1	28	440,01	4,9735	100	19,427	18545	954,60	95,50
2		448,95	5,056	100,29	20,077	17905	891,80	89,20
3		438,85	4,958	99,58	19,307	18240	944,80	94,50
4		442,2	4,95	99,43	19,244	18695	971,50	97,20
5		441,18	4,968	99,6	19,384	17895	923,20	92,30
6		441,84	4,955	100	19,283	18445	956,50	95,70
7		438,81	4,984	100	19,510	18545	950,60	95,10

Tabela B.14 – Resultados de resistência à compressão nos cilindros na idade de 7 e 28 dias do microconcreto relação a/c=0,5 (REF 2).

CP	Idade (dias)	Peso (g)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	CARGA (kgf)	fc (kgf/cm ²)	fc (MPa)
1	7	439,2	4,96	96,23	19,322	9525	493,00	49,30
2		441,1	4,981	97,55	19,486	9555	490,40	49,00
3		442,9	5,0215	97,17	19,804	9875	498,60	49,90
4		445,9	4,479	97,56	15,756	10085	640,10	
5		443,4	4,972	98	19,416	9825	506,00	50,60
6		446,7	4,947	97,6	19,221	9710	505,20	50,50
1	28	442,9	4,965	100	19,361	13205		
2		449,5	4,97	100,29	19,400	12360	637,10	63,70
3		446,6	4,97	99,58	19,400	12290	633,50	63,40
4		448,6	4,967	99,43	19,377	12270	633,20	63,30
5		44,2	4,97	99,6	19,400	12435	641,00	64,10
6		446	4,974	100	19,431	12437	640,00	64,00

Tabela B.15 – Resultados de resistência à tração a flexão na idade de 7 e 28 dias do microconcreto referência (REF 1).

CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ct} ,f (MPa)	CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ct} ,f (MPa)
1	7	4740	11,11	1	28	4680	10,97
2		4560	10,69	2		4830	11,32
3		4640	10,88	3		4640	10,88
4		4830	11,32	4		4320	
5		4210		5		4610	10,80
6		4510	10,57	6		4800	11,25
7		4620	10,83	7		4740	11,11
8		4580	10,73	8		4670	10,95
9		4870	11,41	9		4720	11,06

Tabela B.16 – Resultados de resistência à tração a flexão na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,3% de PSA (PSA_0,3).

CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)
1	7	4590	10,76	1	28	4620	10,83
2		4510	10,57	2		4520	10,59
3		4700	11,02	3		4750	11,13
4		4590	10,76	4		4660	10,92
5		4620	10,83	5		4680	10,97
6		4580	10,73	6		4550	10,66
7		4580	10,73	7		4540	10,64
8		4780	11,20	8		4730	11,09
9		4530	10,62	9		4590	10,76

Tabela B.17 – Resultados de resistência à tração a flexão na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,4% de PSA (PSA_0,4).

CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)
1	7	4350	10,20	1	28	4470	10,48
2		4270	10,01	2		4540	10,64
3		4500	10,55	3		4230	
4		4520	10,59	4		4390	10,29
5		4370	10,24	5		4500	10,55
6		4420	10,36	6		4410	10,34
7		4400	10,31	7		4500	10,55
8		4280	10,03	8		4470	10,48
9		4500	10,55	9		4390	10,29

Tabela B.18 – Resultados de resistência à tração a flexão na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 0,6% de PSA (PSA_0,6).

CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)
1	7	4030	9,45	1	28	4190	9,82
2		3890	9,10	2		4030	9,45
3		3790	8,90	3		4020	9,42
4		3950	9,30	4		4140	9,70
5		3830	8,98	5		4070	9,54
6		3970	9,30	6		3860	9,05
7		3840	9,00	7		4000	9,38
8		4100	9,60	8		3920	9,19
9		3790	8,90	9		3910	9,16

Tabela B.19 – Resultados de resistência à tração a flexão na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 1% de ARR (ARR_1)

CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)
1	7	4450	10,40	1	28	4320	10,13
2		4500	10,50	2		4380	10,27
3		4270	10,00	3		4580	10,73
4		4450	10,40	4		4680	10,97
5		3920		5		4420	10,36
6		4460	10,50	6		4490	10,52
7		4420	10,40	7		4590	10,76
8		4510	10,60	8		4350	10,20
9		5200		9		4570	10,71

Tabela B.19 – Resultados de resistência à tração a flexão na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com teor de 2% de ARR (ARR_2)

CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)
1	7	4460	10,50	1	28	4320	10,13
2		4350	10,20	2		4170	9,77
3		4900		3		4260	9,98
4		5020		4		5460	
5		4130	9,70	5		4460	10,45
6		4550	10,70	6		4620	10,83
7		4220	9,90	7		4630	10,85
8		4180	9,80	8		5000	
9		4510	10,60	9		5000	

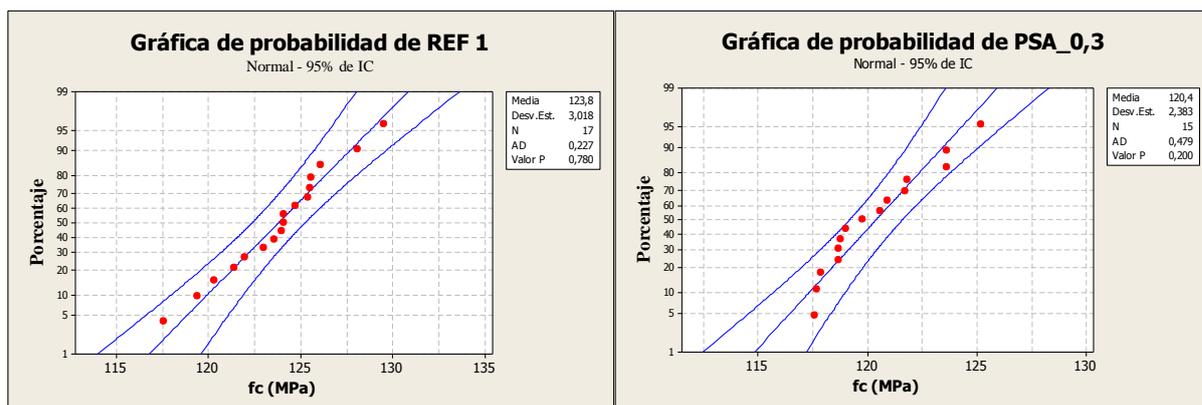
Tabela B.19 – Resultados de resistência à tração a flexão na idade de 7 e 28 dias do microconcreto com relação $a/c=0,5$ (REF 2)

CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CP	Idade (dias)	Carga (kgf)	$f_{ct,f}$ (MPa)
1	7	3640	8,50	1	28	3970	9,30
2		3680	8,60	2		3820	8,95
3		3870	9,10	3		3920	9,19
4		3730	8,70	4		4070	9,54
5		3780	8,90	5		3720	8,72
6		3640	8,50	6		3620	

APÊNDICE C – TESTE DE NORMALIDADE DE ANDERSON-DARLING

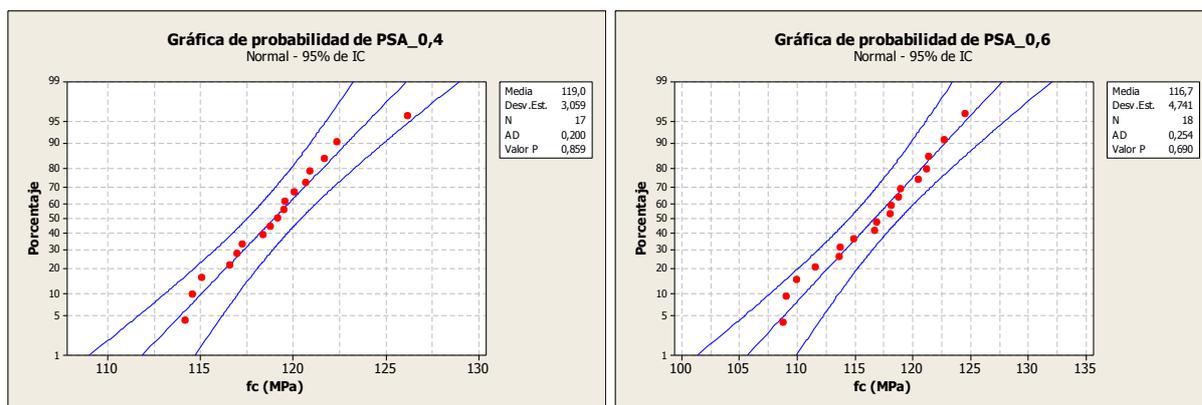
APÊNDICE D–TESTE DE NORMALIDADE DE ANDERSON-DARLING

Na sequência se apresenta graficamente o teste realizado nos resultados de resistência a compressão (cubos e cilindros) e resistência à tração na flexão na idade de 28 dias.



(a)

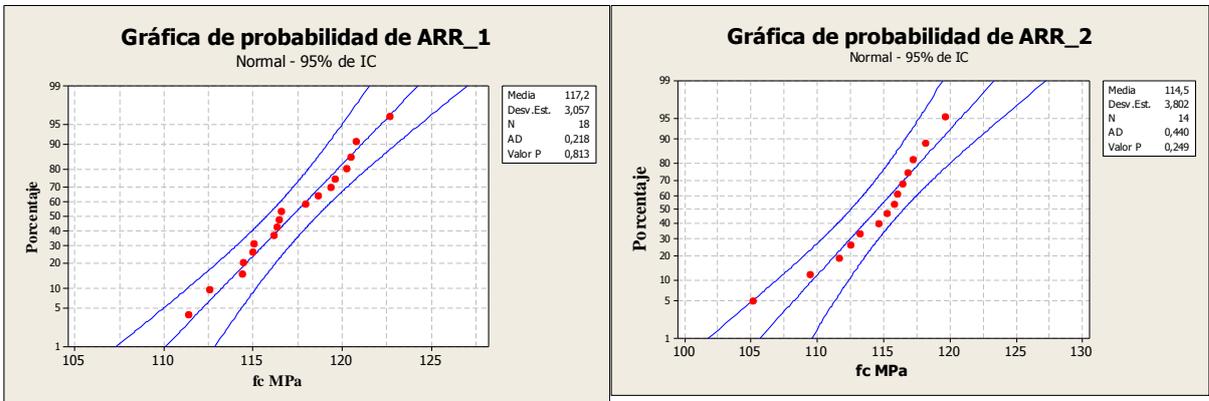
(b)



(c)

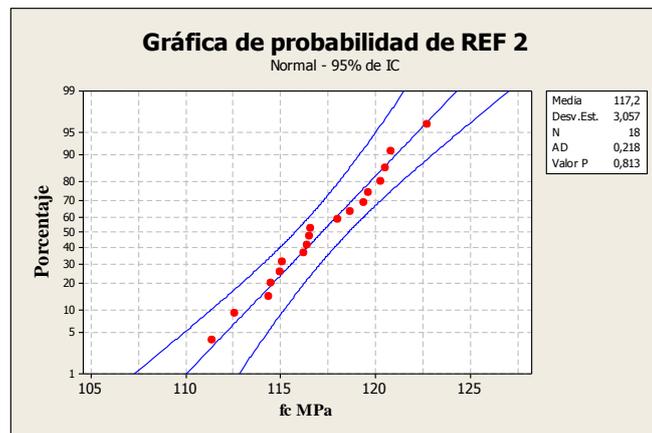
(d)

Figura C.1 – Gráfico de probabilidade normal dos resultados de resistência à compressão nos cubos dos microconcretos (a) REF 1, (b) PSA_0,3 (c) PSA_0,4 e (d) PSA_0,6



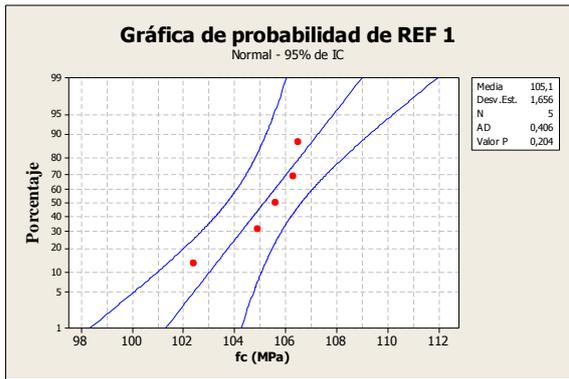
(a)

(b)

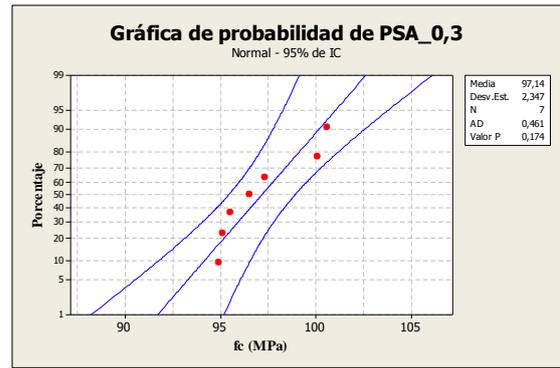


(c)

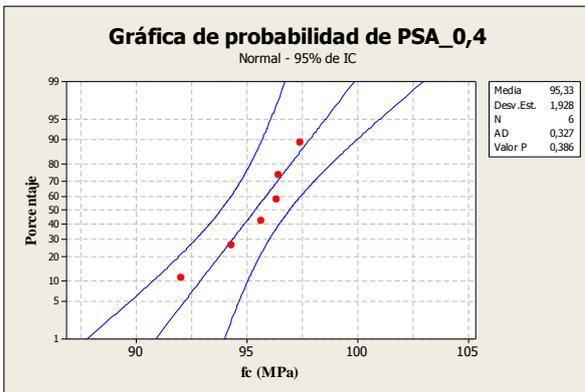
Figura C.2 – Gráfico de probabilidade normal dos resultados de resistência à compressão nos cubos dos microconcretos (a)ARR_1, (b) ARR_2 e(c) REF 1



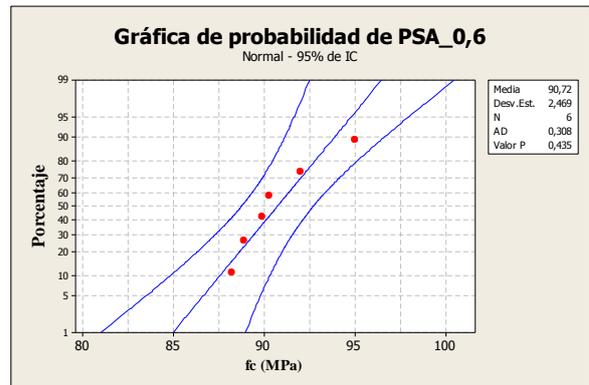
(a)



(b)

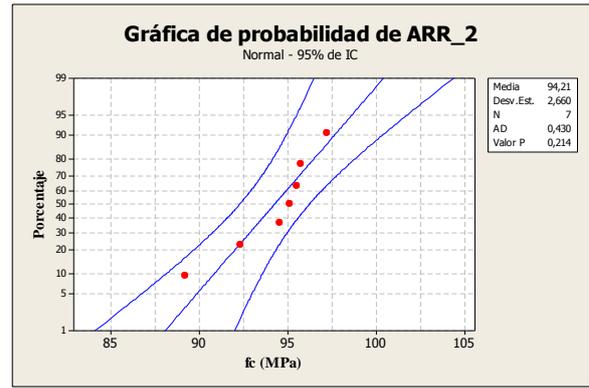
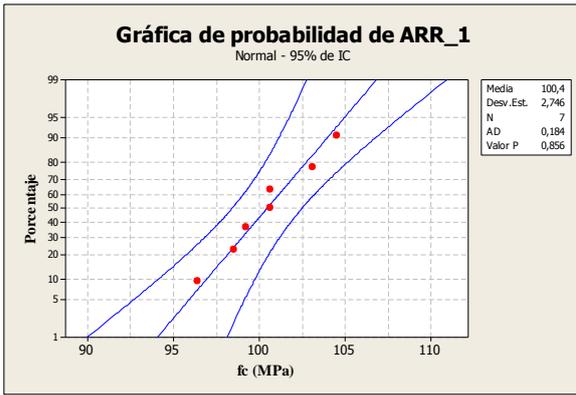


(c)



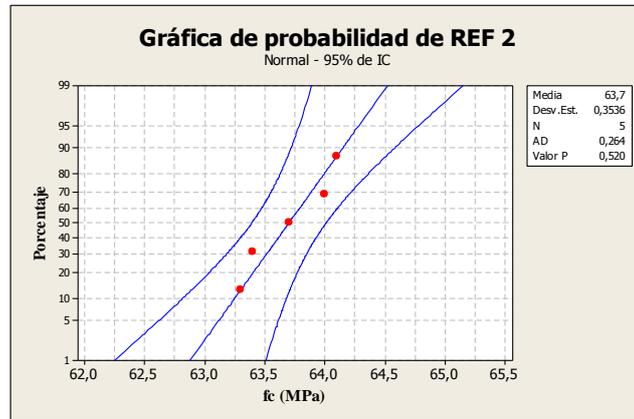
(d)

Figura C.3 – Gráfico de probabilidade normal dos resultados de resistência à compressão nos cilindros dos microconcretos (a) REF 1, (b) PSA_0,3 (c) PSA_0,4 e (d) PSA_0,6



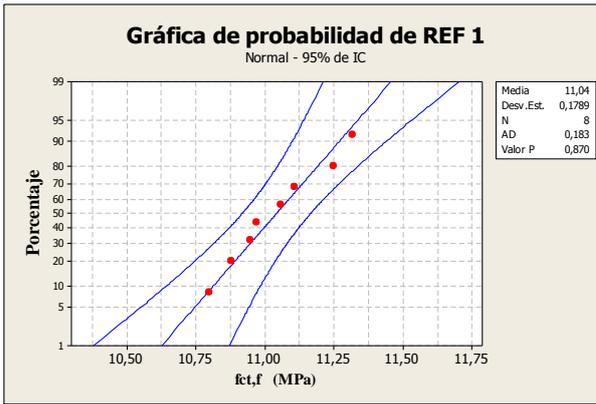
(a)

(b)

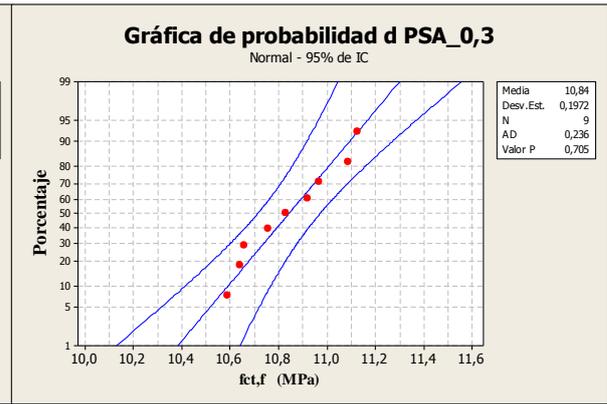


(c)

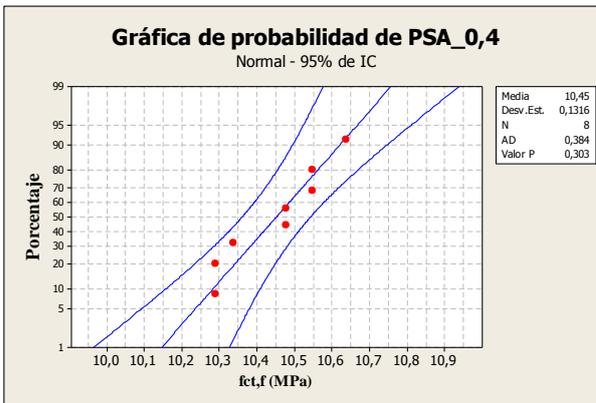
Figura C.4 – Gráfico de probabilidade normal dos resultados de resistência à compressão nos cubos dos microconcretos (a)ARR_1, (b) ARR_2 e(c) REF 1



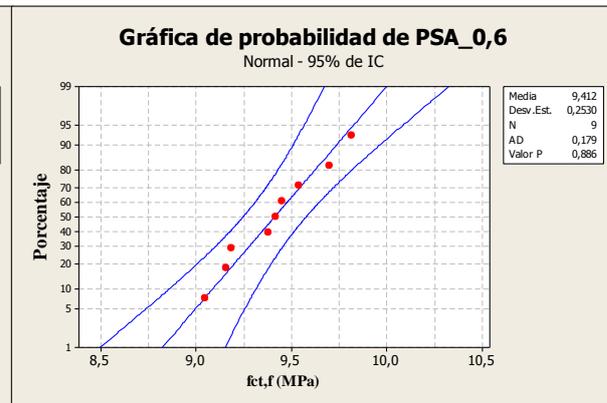
(a)



(b)

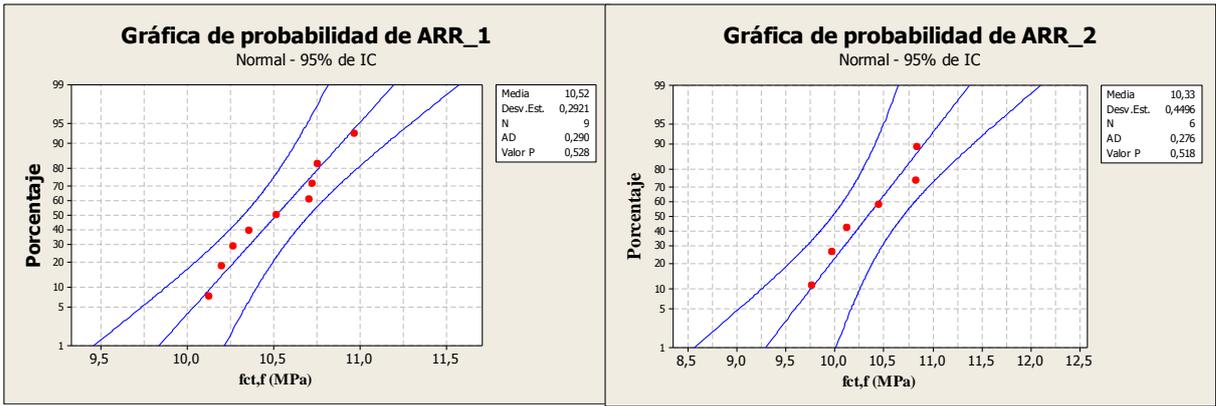


(c)



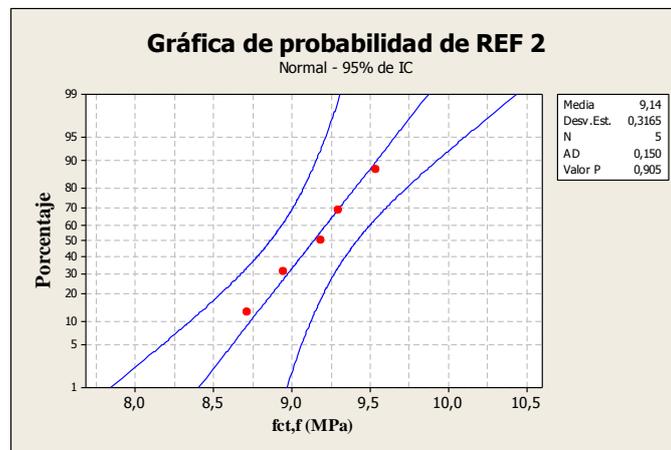
(d)

Figura C.5 – Gráfico de probabilidade normal dos resultados de resistência à tração na flexão (a) REF 1, (b) PSA_0,3 (c) PSA_0,4 e (d) PSA_0,6



(a)

(b)



(c)

Figura C.6 – Gráfico de probabilidade normal dos resultados de resistência à tração na flexão dos microconcretos (a)ARR_1, (b) ARR_2 e(c) REF 1

**APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE
ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE E ABSORÇÃO POR IMERSÃO**

Tabela D.1 – Resultados do ensaio absorção por capilaridade do microconcreto REF 1

CP	Mi (g)	Mt (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
		10 (min)	90 (min)	24 (horas)	48 (horas)	72 (horas)	10 (min)	90 (min)	72 (horas)	
1	584,06	584,38	584,80	586,49	587,89	588,13	0,02	0,05	0,25	0,42
2	590,08	590,41	590,91	592,74	593,57	594,46	0,02	0,05	0,27	0,50
3	578,27	578,74	579,17	581,06	581,88	582,79	0,03	0,06	0,28	0,43
4	585,85	586,04	586,47	588,06	588,68	589,34	0,01	0,04	0,22	0,43

Tabela D.2 – Resultados do ensaio absorção por capilaridade do microconcreto PSA_0,3

CP	Mi (g)	Mt (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
		10 (min)	90 (min)	24 (horas)	48 (horas)	72 (horas)	10 (min)	90 (min)	72 (horas)	
1	563,8	564,14	564,66	566,07	566,62	566,98	0,02	0,05	0,20	0,52
2	560,96	561,29	561,79	563,16	563,78	564,32	0,02	0,05	0,21	0,50
3	572,55	573,02	573,47	574,82	575,42	575,76	0,03	0,06	0,20	0,45
4	565,45	566,56	567,07	568,57	569,24	569,54	0,07	0,10	0,26	0,51

Tabela D.3 – Resultados do ensaio absorção por capilaridade do microconcreto PSA_0,4

CP	Mi (g)	Mt (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
		10 (min)	90 (min)	24 (horas)	48 (horas)	72 (horas)	10 (min)	90 (min)	72 (horas)	
1	578,78	579,43	580,17	582,33	583,3	583,96	0,04	0,09	0,32	0,74
2										
3	577,36	577,99	578,65	580,66	581,53	582,15	0,04	0,08	0,30	0,66
4	590,16	590,61	591,35	593,39	594,13	594,67	0,03	0,07	0,28	0,74

Tabela D.4 – Resultados do ensaio absorção por capilaridade do microconcreto PSA_0,6

CP	Mi (g)	Mt (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
		10 (min)	90 (min)	24 (horas)	48 (horas)	72 (horas)	10 (min)	90 (min)	72 (horas)	
1	588,87	589,52	590,34	592,98	593,99	594,78	0,04	0,09	0,37	0,82
2	574,77	575,57	576,4	579,1	580,28	580,99	0,05	0,10	0,39	0,83
3	563,93	564,55	565,33	567,85	569	569,64	0,04	0,09	0,36	0,78
4	579,53	580,15	580,98	583,31	584,27	584,82	0,04	0,09	0,33	0,83

Tabela D.5 – Resultados do ensaio absorção por capilaridade do microconcreto ARR_1

CP	Mi (g)	Mt (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
		10 (min)	90 (min)	24 (horas)	48 (horas)	72 (horas)	10 (min)	90 (min)	72 (horas)	
1	595,25	596,1	596,79	598,4	599,2	599,8	0,05	0,10	0,28	0,69
2	601,5	602,2	602,88	604,6	605,2	606	0,04	0,09	0,28	0,68
3	602,7	603,3	604	605,9	606,9	607,1	0,04	0,08	0,27	0,70
4	589,5	590,28	590,95	593,9	594,7	595,4	0,05	0,09	0,37	0,67

Tabela D.6 – Resultados do ensaio absorção por capilaridade do microconcreto ARR_2

CP	Mi (g)	Mt (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
		10 (min)	90 (min)	24 (horas)	48 (horas)	72 (horas)	10 (min)	90 (min)	72 (horas)	
1	594,9	595,43	596,75	597,3	598,08	599	0,03	0,12	0,26	1,32
2	600,98	601,53	602,82	603,4	604,3	605,2	0,03	0,12	0,26	1,29
3	602	602,66	604	605	606	606,6	0,04	0,13	0,29	1,34
4	589	589,55	590,8	592	593	594	0,03	0,11	0,31	1,25

Tabela D.7 – Resultados do ensaio absorção por capilaridade do microconcreto REF 2

CP	Mi (g)	Mt (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)			Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
		10 (min)	90 (min)	24 (horas)	48 (horas)	72 (horas)	10 (min)	90 (min)	72 (horas)	
1	559,5	560,43	563,67	569,7	573,61	574,3	0,06	0,26	0,92	3,24
2	563,3	563,28	567,55	571,9	573,63	574,7	0,00	0,27	0,71	4,27
3	562	563,5	566,75	572,1	573,63	574,1	0,09	0,30	0,76	3,25
4	560,7	562,4	564,66	570,8	574,1	575,4	0,11	0,25	0,92	2,26

Tabela D.8 – Resultados do ensaio absorção por imersão do microconcreto REF 1

ABSORÇÃO DE AGUA OR IMERSÃO						
Microconcreto	CP	Mo(g)	Ms24h (g)	Ms48h (g)	Ms72h (g)	Abs %
REF 1	1	290,47	295,94	296,52	296,91	2,22
	2	308,24	313,85	314,57	314,81	2,13
	3	289,63	296,21	297,54	298,32	3,00
	4	303,04	309,14	310,42	310,99	2,62
					média	2,49

Tabela D.9 – Resultados do ensaio absorção por imersão do microconcreto PSA_0,3

ABSORÇÃO DE AGUA POR IMERSÃO						
Microconcreto	CP	Mo(g)	Ms24h (g)	Ms48h (g)	Ms72h (g)	Abs %
PSA_0,3	1	279,27	284,87	285,18	285,36	2,18
	2	270,72	276,21	276,50	276,64	2,19
	3	273,70	279,20	279,51	279,55	2,14
	4	299,98	306,03	306,31	306,41	2,14
					média	2,16

Tabela D.10 – Resultados do ensaio absorção por imersão do microconcreto PSA_0,4

ABSORÇÃO DE AGUA POR IMERSÃO						
Microconcreto	CP	Mo(g)	Ms24h (g)	Ms48h (g)	Ms72h (g)	Abs %
PSA_0,4	1	307,38	315,20	315,71	315,91	2,78
	2	291,65	299,15	299,60	299,69	2,76
	3	306,59	314,58	315,14	315,23	2,82
	4	297,71	305,60	306,09	306,14	2,83
					média	2,80

Tabela D.11 – Resultados do ensaio absorção por imersão do microconcreto PSA_0,6

ABSORÇÃO DE AGUA POR IMERSÃO						
Microconcreto	CP	Mo(g)	Ms24h (g)	Ms48h (g)	Ms72h (g)	Abs %
PSA_0,6	1	262,45	272,57	273,71	274,27	4,50
	2	309,29	320,94	322,27	322,84	4,38
	3	286,62	297,82	299,32	299,84	4,61
	4	298,76	309,62	310,98	311,49	4,26
					média	4,44

Tabela D.12 – Resultados do ensaio absorção por imersão do microconcreto ARR_1

ABSORÇÃO DE AGUA POR IMERSÃO						
Microconcreto	CP	Mo(g)	Ms24h (g)	Ms48h (g)	Ms72h (g)	Abs %
ARR_1	1	282,50	287,89	287,99	288,00	1,95
	2	317,20	322,94	322,17	323,20	1,89
	3	281,00	285,49	285,62	285,70	1,67
	4	308,20	312,96	313,07	313,10	1,59
média						1,78

Tabela D.13 – Resultados do ensaio absorção por imersão do microconcreto ARR_2

ABSORÇÃO DE AGUA POR IMERSÃO						
Microconcreto	CP	Mo(g)	Ms24h (g)	Ms48h (g)	Ms72h (g)	Abs %
ARR_2	1	314,90	322,20	323,20	324,90	3,18
	2	286,31	293,60	294,50	295,40	3,17
	3	304,60	312,60	313,20	314,10	3,12
	4	320,00	327,80	328,90	330,20	3,19
média						3,16

Tabela D.14 – Resultados do ensaio absorção por imersão do microconcreto REF 2

ABSORÇÃO DE AGUA POR IMERSÃO						
Microconcreto	CP	Mo(g)	Ms24h (g)	Ms48h (g)	Ms72h (g)	Abs %
REF 2	1	256,90	271,72	272,60	273,20	6,34
	2	296,40	312,38	313,50	315,10	6,31
	3	285,40	302,40	303,10	303,51	6,35
	4	291,80	308,68	309,70	310,20	6,31
média						6,33