

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

**POLÍMEROS SUPERABSORVENTES (PSA) COMO
AGENTE DE CURA INTERNA PARA PREVENIR
FISSURAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA.**

MARTA LILIANA GONZÁLEZ SUAREZ

ORIENTADORA: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA

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

PUBLICAÇÃO: E.DM-012A/15

BRASÍLIA/DF: MAIO - 2015

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

**POLÍMEROS SUPER ABSORVENTES (PSA) COMO AGENTE DE
CURA INTERNA PARA PREVENIR FISSURAÇÃO EM
CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA.**

MARTA LILIANA GONZÁLEZ SUAREZ

**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^ª Eugênia Fonseca da Silva, D.Sc. (ENC - UnB)
(Orientadora)**

**Prof. João Henrique da Silva Rêgo, D.Sc. (ENC - UnB)
(Examinador Interno)**

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

BRASÍLIA/DF, 15 DE MAIO DE 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

SUAREZ, MARTA LILIANA GONZÁLEZ

Polímeros Super Absorventes (PSA) como Agente de Cura Interna para Prevenir Fissuração em Concretos de Alta Resistência. [Distrito Federal] 2015.

x, 75p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2015).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Retração Autógena

2. Polímeros Superabsorventes

3. Concreto

4. Tempo zero

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SUAREZ., M. L. G. (2015). Polímeros Super Absorventes (PSA) como Agente de Cura Interna para Prevenir Fissuração em Concretos de Alta Resistência. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-012A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Marta Liliana González Suarez

TÍTULO: Polímeros Super Absorventes (PSA) como Agente de Cura Interna para Prevenir Fissuração em Concretos de Alta Resistência.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

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.

Marta Liliana González Suarez
CLN 208, BL C, SL 109.
Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade de estar.

À minha família: Sami, Lya, Norie, Abe, Gabriel, Andre, Diego, Sergio e Pao pelo apoio incondicional.

À minha orientadora, a professora Eugênia, pelo incentivo, disponibilidade, por toda a dedicação, apoio e carinho.

Aos técnicos, estagiários e pessoal do LEM/UnB, ao Elier e ao grupo de pesquisa sobre polímeros superabsorventes pela disponibilidade e apoio na realização dos ensaios.

A todo o pessoal de Furnas Centrais Elétricas S.A., por fornecerem a ajuda para realização dos ensaios do tempo zero e caracterização dos materiais.

E a todos os amigos, que compartilharam das dificuldades e sempre estiveram lá para ajudar.

RESUMO

POLÍMEROS SUPER ABSORVENTES (PSA) COMO AGENTE DE CURA INTERNA PARA PREVENIR FISSURAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA.

Autora: Marta Liliana González Suarez

Orientadora: Eugênia Fonseca da Silva

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Maio de 2015.

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a influência da adição de polímeros superabsorventes (PSA) na mitigação da retração autógena e seu efeito nas propriedades mecânicas, em microconcretos de alta resistência com diferentes relações água/cimento. O programa experimental é desenvolvido com oito misturas de microconcretos distribuídas da seguinte forma: uma mistura de referência com relação $a/c=0,30$ e mais três misturas com teores de PSA de 0,1%, 0,2% e 0,3% (em relação à massa do cimento), duas misturas de referência com relações água/cimento iguais a 0,35 e 0,40 respectivamente e mais duas misturas com 0,2% de PSA, uma para cada referência. A retração autógena foi determinada, segundo a metodologia proposta por TAZAWA (1999), desde o tempo zero até a idade de 28 dias. Para determinar a transição suspensão - sólido, ou tempo zero dos microconcretos, para balizar o início da determinação experimental da retração autógena foi utilizada a técnica do ultrassom, desenvolvida por SILVA (2007). Os resultados experimentais mostraram que a adição de polímeros superabsorventes constitui uma solução promissora na mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência. O efeito do polímero foi mais acentuado no microconcreto com menor relação água/cimento ($a/c= 0,30$), principalmente nos primeiros 7 dias de idade. Foi observada uma diminuição na eficiência do PSA à medida que aumenta a idade dos microconcretos. As adições de PSA nos teores de 0,2% e 0,3% foram as mais eficientes na mitigação da retração autógena, no entanto, foi observado que quanto maior o teor de PSA maior foi a diminuição das propriedades mecânicas dos microconcretos estudados, em comparação com os microconcretos de referência.

ABSTRACT

SUPER ABSORBENT POLYMERS (SAP) AS INTERNAL CURING AGENT TO PREVENT CRACKING ON HIGH STRENGTH CONCRETE.

Author: Marta Liliana Gonzalez Suarez.

Supervisor: Eugenia Fonseca da Silva.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasilia, May 2015.

This research aims to analyze the influence of the addition of superabsorbent polymers (SAP) in the mitigation of autogenous shrinkage and its effect on the mechanical properties of high strength concretes with different water/cement ratios. The experimental program is developed with eight mixtures distributed as follows: A mixture of reference with w/c ratio = 0.30 and three mixtures with SAP levels of 0.1% , 0.2% and 0.3% (in relation to the mass of cement), two mixtures of reference with w/c ratios equal to 0.35 and 0.40 respectively and two mixtures with 0.2% of SAP, one for each reference. The autogenous shrinkage was determined from time zero until the age of 28 days. To determine the suspension – solid transition, or zero time of the concrete, to mark the beginning of the experimental determination of autogenous shrinkage was used the technique of ultrasound. The experimental results showed that the addition of superabsorbent polymers constitute a promissory solution for mitigating autogenous shrinkage in high strength concrete. The effect of the polymer was more pronounced in the mixture with lower water / cement ratio ($w / c = 0.30$), particularly during the first 7 days of age. A decrease was observed in the SAP efficiency as it increases the age of the concrete. The additions of SAP in levels of 0.2% and 0.3% were the most effective in mitigating the autogenous shrinkage, however, it was observed that the higher level of SAP had greater decrease of the mechanical properties of the studied mixtures compared with the mixture of reference.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2. JUSTIFICATIVA	1
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo geral.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. RETRAÇÃO AUTÓGENA	4
2.1.1. Conceito	4
2.1.2. Mecanismos	4
2.1.3. Estratégias de mitigação	6
2.2. A ESTRATÉGIA DA CURA INTERNA PARA MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA.	6
2.3. POLÍMEROS SUPER ABSORVENTES (PSA).....	8
2.3.1. Cinética da migração da água nos sistemas cimentícios contendo polímeros superabsorventes.....	8
2.3.2. Produção.....	10
2.3.3. Ensaio de caracterização	11
2.4. A REDUÇÃO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA DEVIDA AO USO DO PSA.....	13
2.4.1. Determinação da transição suspensão - sólido poroso (tempo-zero).	13
2.4.2. Determinação da retração autóloga.	15
2.4.3. Redução da retração autóloga	16
2.5. EFEITO DOS POLÍMEROS SUPERABSORVENTES NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.	18
2.5.1. Trabalhabilidade.	18
2.5.2. Endurecimento e desenvolvimento da microestrutura	19
2.5.3. Propriedades mecânicas.....	20
2.5.4. Durabilidade.	22
2.5.5. Aplicações práticas dos polímeros superabsorventes.....	23

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	25
3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	26
3.1.1. Definição de variáveis	26
3.2. MATERIAIS CONSTITUINTES	27
3.2.1. Cimento	27
3.2.2. Sílica ativa	29
3.2.3. Agregado miúdo.....	30
3.2.4. Aditivo Superplastificante	30
3.2.5. Polímero superabsorvente (PSA)	31
3.3. COMPOSIÇÃO DOS MICROCONCRETOS	33
3.3.1. Microconcretos de referência.	33
3.3.2. Microconcretos com adição de polímeros superabsorventes	34
3.4. METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	35
3.4.1. Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.....	35
3.4.2. Ensaio no estado fresco.....	36
3.4.3. Ensaio no estado endurecido.....	39
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	43
4.1. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	43
4.1.1. Determinação do espalhamento pelo tronco de cone	43
4.1.2. Penetração de cone	44
4.1.3. Teor de ar aprisionado.....	44
4.1.4. Determinação da densidade de massa no estado fresco.	47
4.1.5. Determinação do tempo zero método do pulso ultrassônico.	49
4.2. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	53
4.2.1. Retração Autógena	53
4.2.2. Resistência à tração na flexão.....	58
4.2.3. Resistência à compressão em cubos	61
4.2.4. Resistência à compressão em cilindros	63
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
5.1. CONCLUSÕES.....	66
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características físicas e mecânicas do cimento.....	28
Tabela 3.2 - Características químicas do cimento	28
Tabela 3.3 - Caracterização física da sílica ativa.....	29
Tabela 3.4 – Caracterização química da sílica ativa.....	29
Tabela 3.5 - Dados técnicos do aditivo superplastificante.	31
Tabela 3.6 - Caracterização do PSA (NETO; 2014).	32
Tabela 3.7 - Composição dos microconcretos de referência	34
Tabela 3.8 - Composição e nomenclatura dos microconcretos estudados.	35
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de espalhamento e penetração de cone..	43
Tabela 4.2 Resultados do ensaio de Teor de ar aprisionado (%).	45
Tabela 4.3 Resultados do ensaio de densidade no estado fresco (g/ml).	47
Tabela 4.4 - Resultados da determinação do tempo zero dos microconcretos.	50
Tabela 4.5 - Resultados da deformação autógena e percentagem de redução da retração autógena dos microconcretos com adição de PSA em relação à sua mistura referência. ...	53
Tabela 4.6 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de resistência à tração na flexão (MPa).	58
Tabela 4.7 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de resistência à compressão em cubos (MPa).	61
Tabela 4.8 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de resistência à compressão em cilindros (MPa).	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução da microestrutura do concreto em função do tempo de hidratação (TRALDI e AGUIRRE, 2013)..	5
Figura 2.2 - Microscopia do processo de inchamento dos Polímeros Superabsorventes, no tempo zero, antes e durante o contato com água.	9
Figura 2.3 - PSA baseado em ácido poli acrílico. (FRIEDRICH S., 2012).	10
Figura 2.4 - Microscopia eletrônica de varredura de diferentes tipos de PSA	12
Figura 2.5 - Estágios da curva típica de velocidade de propagação da onda ultrassônica. (SILVA et. al., 2011)..	15
Figura 2.6 - Determinação da variação relativa de comprimento. SILVA (2007)	16
Figura 2.7 - Equipamento para determinação das deformações autógenas. a) Dilatômetro com moldes corrugados. b) Configuração do ensaio convencional de acordo com a norma alemão (MECHTCHERINE e DUDZIAK; 2012)	16
Figura 3.1 - Esquema dos microconcretos da pesquisa	25
Figura 3.2 - Organograma dos ensaios.	26
Figura 3.3 - Caracterização do agregado miúdo.	30
Figura 3.4 - Resultados do ensaio de absorção do PSA.	32
Figura 3.5 - Distribuição granulométrica do PSA (NETO; 2014).	33
Figura 3.6 - Imagem do PSA obtida por microscopia óptica, (NETO; 2014).	33
Figura 3.7 - Roteiro para mistura dos microconcretos.	34
Figura 3.8 - Determinação do espalhamento com cone de HAGERMANN.	36
Figura 3.9 - Determinação da densidade no estado fresco.	37
Figura 3.10 - Ensaio de penetração de cone	37
Figura 3.11 – Esquema da determinação experimental do tempo zero pelo ensaio do pulso ultrassônico. (SILVA et. al. 2011)	38
Figura 3.12 – Moldagem do corpo de prova e determinação experimental do tempo zero pelo ensaio do pulso ultrassônico.	39
Figura 3.13 - Determinação experimental da retração autógena.	40
Figura 3.14 – Esquema da determinação experimental da retração autógena (SILVA, 2007).	40
Figura 3.15 - Ensaio de resistência à tração na flexão.	41
Figura 3.16 - Ensaio de resistência à compressão em cubos	42
Figura 3.17 - Ensaio de resistência à compressão em cilindros (50 mm x 100 mm).	42

Figura 4.1 Resultados do ensaio de teor de ar aprisionado (%) ($a/c = 0,30$)..	45
Figura 4.2 Resultados do ensaio de teor de ar aprisionado (%).	46
Figura 4.3 Resultados do ensaio de densidade no estado fresco ($a/c = 0,30$).	47
Figura 4.4 Resultados do ensaio de densidade no estado fresco...	48
Figura 4.5 - Tempo zero dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$	50
Figura 4.6 -- Resultados da determinação da transição suspensão- sólido ou tempo zero dos microconcretos com relações $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$.	51
Figura 4.7. Deformação autógena dos microconcretos estudados de 0 - 28 dias de idade..	54
Figura 4.8 - Deformação autógena de 0 a 28 dias dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$	54
Figura 4.9. Deformação autógena dos microconcretos de referência com relações $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$	57
Figura 4.10. Deformação autógena dos microconcretos de referência com relações $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$	58
Figura 4.11. Resistência à tração na flexão (MPa) dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$	59
Figura 4.12. Resistência à tração na flexão (MPa) dos microconcretos com relações $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$	60
Figura 4.13. Resistência à compressão em cubos (MPa) dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$	61
Figura 4.14. Resistência à compressão em cubos (MPa) dos microconcretos com relações $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$	62
Figura 4.15. Resistência à compressão em cilindros (MPa) dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$	64
Figura 4.16. Resistência à compressão em cilindros (MPa) dos microconcretos com relações $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$	65

LISTA DE SIMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
MPa	Megapascais
μm	Microstrength
m	Metro
R.A.	Retração Autógena
L_{pi}	Leitura da deformação medida no pico de expansão para o traço estudado
L_{di}	Leitura da deformação medida na idade requerida para o traço estudado
L_{pRef}	Leitura da deformação medida no pico de expansão para o traço de referência
L_{dRef}	Leitura da deformação medida na idade requerida para o traço de referência
min	Minutos
%	Porcentagem
g	Gramas
ml	Mililitro
SP	Aditivo Superplastificante
mm	Milímetros
cm	Centímetros
kg	Quilogramas
V_1	Volumes molares iniciais do cimento anidro mais o da água
V_2	Volume molar dos hidratos formados

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA

O concreto de alta resistência (CAR) apresenta numerosas vantagens e permite solucionar uma série de requisitos que o concreto de resistência normal não atende. Dentre as vantagens, destacam-se a alta resistência à compressão, a alta durabilidade, a trabalhabilidade adequada, a construção de elementos estruturais mais resistentes e com menor secção, estruturas com grandes vãos e menor permeabilidade pela sua microestrutura mais densa (DUDZIAK e MECHTCHERINE; 2008).

A microestrutura mais refinada se deve ao fato do CAR ter baixa relação água/cimento, conter adições minerais e apresentar um elevado consumo de cimento. Como o CAR é menos permeável do que o concreto de resistência normal, também é mais resistente aos ataques de agentes agressivos como cloretos, sulfatos e CO₂ e apresenta maior resistência à abrasão. Entretanto, apresenta desvantagem em sua microestrutura refinada: a elevada retração autógena que pode levar à fissuração do CAR.

A utilização de concretos de alta resistência é uma realidade. A versão da norma NBR 6118: 2014 inclui concretos com resistência de até 90 MPa. A utilização dos polímeros superabsorventes em sistemas cimentícios é uma proposta nova e tão importante que em 2009 foi criado o comitê técnico TC 225 SAP da RILEM (MECHTCHERINE e REINHARDT; 2012) especificamente para estudar o uso de polímeros superabsorventes no concreto. Por estas razões é de grande importância utilizar uma alternativa que permita mitigar a elevada retração autógena do CAR para aproveitar todas as suas vantagens.

1.2. JUSTIFICATIVA

Diversos pesquisadores têm desenvolvido diferentes estratégias para mitigar a retração autógena, uma das quais é a cura interna. O processo da cura interna consiste na utilização de materiais porosos, saturados em água e adicionados ao concreto. Assim, é fornecida água aos capilares à medida que avança a hidratação do cimento (BENTZ e JENSEN, 2004).

JENSEN e LURA (2006) explicam que os agregados normais utilizados no concreto podem conter água que pode ser usada como água de cura interna, a qual é mantida

fisicamente na porosidade natural dos agregados. No caso das rochas densas, utilizadas nos concretos de alta resistência, a água de cura interna pode ser induzida por meio de aditivos especiais, ou seja, substâncias químicas que contém água quimicamente ligada, mantida dentro da estrutura molecular por ligações químicas. Existem materiais naturais ou produzidos artificialmente que tem uso potencial como agentes de cura interna devido a sua significativa porosidade aberta. Muitos destes materiais são utilizados como agregados leves no concreto, saturados em água, armazenando-a pelas suas forças capilares.

Uma alternativa para realizar a cura interna é proposta por JENSEN e HANSEN (2001) e consiste na utilização de partículas poliméricas superabsorventes e finas (PSA) como aditivo para o concreto, permitindo a formação de macro poros cheios de água na pasta de cimento.

Segundo JENSEN (2011), a propriedade fundamental dos Polímeros Super Absorventes (PSAs) é a sua habilidade de absorver grandes quantidades de líquidos do ambiente de exposição e retê-los dentro de sua estrutura.

Esta pesquisa se justifica por estudar a alternativa mais moderna e eficiente para mitigar a retração autógena entre as estratégias de cura interna constantes na literatura técnica (JENSEN e HANSEN, 2001). É importante determinar qual é o teor mais adequado para cada tipo de polímero, já que em seu uso (custo/benefício) existe um limiar, porque uma adição elevada de PSA pode reduzir as propriedades mecânicas do concreto, embora seja muito eficiente para mitigar a retração autógena. O teor mais adequado depende do tipo de PSA e da sua aplicação. A quantidade de água absorvida por um PSA depende das propriedades do próprio PSA e do seu ambiente de exposição. A forma geométrica do PSA influencia a taxa de intercâmbio de água com o ambiente, enquanto a composição química do PSA influencia tanto a taxa de intercâmbio de água como a capacidade de absorção, parâmetros no ambiente de exposição que influenciam a absorção de água do PSA incluem a temperatura, a pressão e a composição iônica específica do líquido em exposição (JENSEN e LURA, 2006). O PSA é um material novo e espera-se, com esta pesquisa, contribuir para seu conhecimento para que possa ser utilizado com mais segurança onde ele for mais adequado.

O presente trabalho faz parte do projeto de pesquisa sobre mitigação da retração autógena em CAR e está inserido na linha de pesquisa de “Sistemas construtivos e desempenho de materiais e componentes” do programa de pós-graduação em estruturas e construção civil da Universidade de Brasília.

Sobre este tema foram desenvolvidas pesquisas anteriores na UnB, as quais apresentaram resultados consistentes, comprovando a eficácia da cura interna utilizando polímeros superabsorventes para a redução da retração autógena em CAR, tais como PEREIRA e MATOS (2011), CLARO e SARAIVA (2012), ORDÓÑEZ (2013), TRALDI e AGUIRRE (2013), NETO (2014), MORAES e CERQUEIRA (2014) e MANZANO (2014). Esta pesquisa de mestrado foi desenvolvida paralelamente à pesquisa de doutorado de Alejandro Rojas Manzano, em cuja tese serão incorporados os resultados deste estudo.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Analisar a influência da adição de polímeros superabsorventes na mitigação da retração autógena e seu efeito em propriedades no estado fresco e endurecido, determinadas em microconcretos de alta resistência, com diferentes relações água/cimento.

1.3.2. Objetivos específicos

- ❖ Avaliar a influência da adição de diferentes teores de PSA (0,1%, 0,2% e 0,3%) para uma mesma relação a/c, nas propriedades no estado fresco (espalhamento, teor de ar aprisionado, densidade de massa e tempo zero) e no estado endurecido (retração autógena, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.) em microconcretos de alta resistência.

- ❖ Avaliar a influência da adição de um mesmo teor de PSA para diferentes relações a/c (0,30, 0,35 e 0,40), nas propriedades no estado fresco (espalhamento, teor de ar aprisionado, densidade de massa e tempo zero) e no estado endurecido (retração autógena, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.) em microconcretos de alta resistência.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RETRAÇÃO AUTÓGENA

2.1.1. Conceito

A Retração Autógena é definida como a mudança de volume e massa do concreto pela hidratação do cimento em um sistema isotérmico selado não submetido à forças externas JENSEN e HANSEN (2001). Segundo SILVA (2007), em termodinâmica, o universo é dividido em duas partes: o sistema e sua vizinhança, separadas por uma fronteira. Em sistemas isolados, podem ocorrer apenas deformações autógenas. Nestes sistemas, nem energia nem massa podem ser trocados entre o sistema e sua vizinhança. Em sistemas abertos (quando matéria e energia são trocados entre o sistema e sua vizinhança, pela fronteira) e em sistemas fechados (quando energia é trocada, mas existe conservação de massa), além das deformações autógenas, podem ocorrer também deformações não autógenas. Segundo LURA et al. (2001), na maioria das estruturas de concreto de resistência normal, a retração é mais afetada pela secagem que por mudanças autógenas de volume. Porém no CAR ocorre o inverso, a retração autógena é mais danosa e a fissuração microscópica causada por ela pode afetar a durabilidade das estruturas de concreto a longo prazo.

2.1.2. Mecanismos

Segundo SILVA (2007) a autodessecação e a secagem são mecanismos responsáveis pela retração autógena e pela retração por secagem, respectivamente. Tanto a autodessecação como a secagem correspondem a uma diminuição da umidade relativa interna do material. A diferença reside na origem desta diminuição. Na autodessecação é devido ao consumo de água evaporável pelas reações químicas de hidratação enquanto na secagem é pela evaporação da água dos poros, devido à diferença existente entre a UR interna e a UR do ambiente externo. Devido às reações químicas de hidratação, ocorrem deformações volumétricas no concreto. As deformações volumétricas químicas têm início minutos após o contato da água com o cimento e apresentam dois estágios bem distintos, provocados por mecanismos diferentes. O primeiro estágio ocorre antes do tempo-zero (transição suspensão-sólido), quando o material apresenta comportamento de fluido e sugere-se a terminologia “contração Le Chatelier” para diferenciar da terminologia “retração”, que está sendo empregada posteriormente, quando o material apresenta um esqueleto mineral, rígido o suficiente para se opor às variações de volume, podendo levá-lo à fissuração. O

segundo estágio ocorre depois de atingido o tempo-zero, quando o material apresenta comportamento de sólido, acontecendo a retração autógena e, também, podendo acontecer inicialmente uma deformação de expansão. Na Figura 2.1 é apresentada a evolução da microestrutura do concreto em função do tempo de hidratação em três estágios.

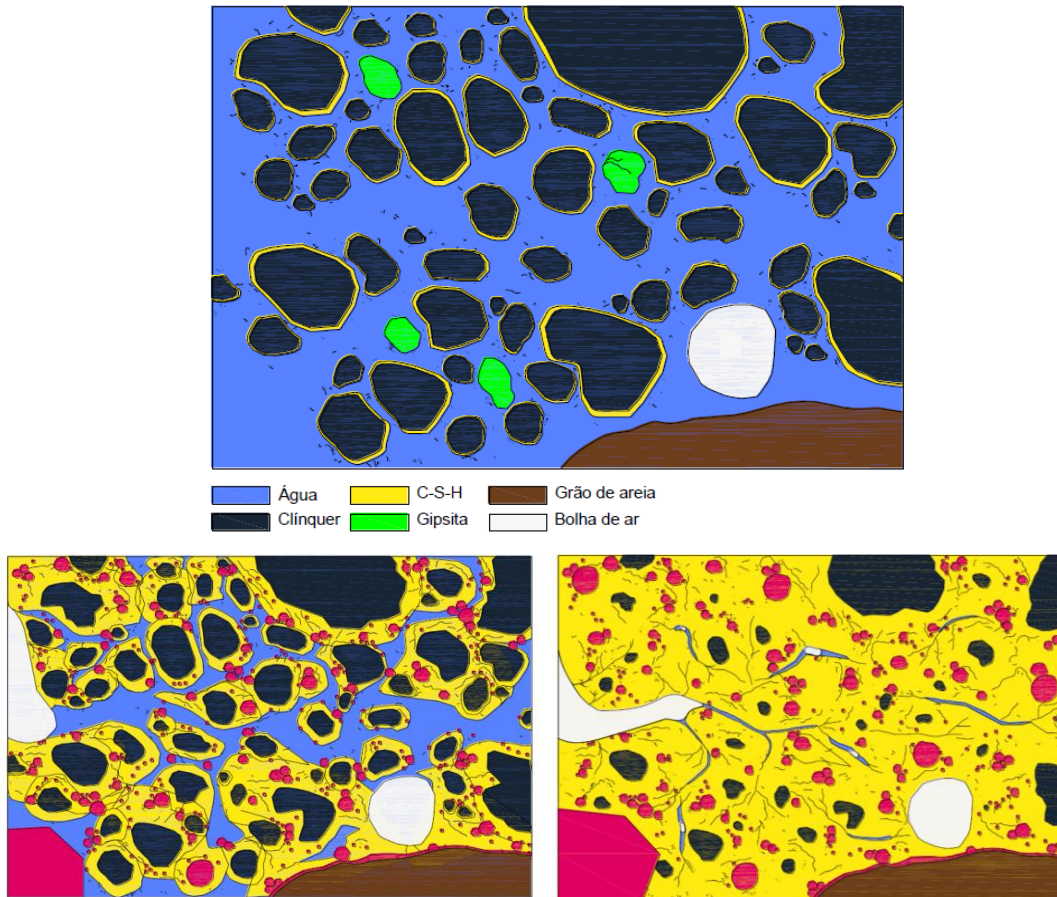


Figura 2.1 - Evolução da microestrutura do concreto em função do tempo de hidratação, com 1 hora, 9 horas e 28 dias de idade (TRALDI e AGUIRRE, 2013).

Citando SILVA (2007) “as deformações volumétricas químicas no concreto são fenômenos considerados macroscópicos, embora a redução de volume ocorra numa escala mais baixa, mais precisamente, na escala molecular dos reagentes e produtos. O balanço volumétrico da reação de hidratação se traduz, a maior parte do tempo, por uma diminuição do volume molar, porque o volume molar dos hidratos formados (V_2) é inferior à soma dos volumes molares iniciais do cimento anidro mais o da água (V_1)”. A retração autógena foi reconhecida e descrita pela primeira vez há mais de setenta anos por LYMAN (1934) quando uma diminuição no volume do concreto foi observada sem nenhuma mudança notável na sua massa ou temperatura. Contudo, como a retração autógena do concreto de resistência usual é consideravelmente menor do que a retração por secagem, não foi dada muita atenção a este assunto até o início da aplicação do concreto de alta resistência na

construção. Entretanto, no CAR observou-se que era mais propenso à fissuração causada pela retração autógena. Nas últimas duas décadas o fenômeno da retração autógena tem sido estudado com intensidade crescente.

2.1.3. Estratégias de mitigação

Diferentes estratégias têm sido desenvolvidas para mitigação da retração autógena. As estratégias sugeridas por BENTZ e JENSEN (2004), para mitigar a retração autógena incluem: o uso de materiais porosos, adicionados ao concreto, saturados em água, para fornecer água aos capilares, à medida que a hidratação avança (processo conhecido como cura interna); o uso de fibras, combatendo a retração autógena, por restrição mecânica; a modificação da composição mineralógica do cimento; o controle do tamanho e distribuição das partículas de cimento; a redução do volume de pastas, substituindo-se parte do cimento por outros materiais cimentantes que modifiquem a cinética da reação de hidratação; uso de aditivo químico compensador de retração, cujos agentes expansivos atuam aumentando o volume do concreto, para compensar a redução de volume causada pela retração; uso de aditivo químico redutor de retração (ARR), desenvolvido para diminuir a retração por secagem, que atua reduzindo a tensão superficial da água, diminuindo assim a tensão no capilar, e uso combinado de mais de uma estratégia.

Em 2001, foi proposta uma nova técnica de cura interna, chamada de “água incorporada” (JENSEN e HANSEN, 2001; JENSEN e HANSEN, 2002). O conceito consiste em usar partículas poliméricas super absorventes e finas (diâmetro de décimas de milímetro) como um aditivo ao concreto. Isso leva à formação de macro poros cheios de água na pasta de cimento. A “água incorporada” reduz a retração autógena com base no mesmo princípio do uso de agregado leve saturado, porém, a técnica é mais simples e produz uma microestrutura altamente controlada. Além disso, é possível que os pequenos vazios esféricos deixados, quando a água sai dos macro-poros para a hidratação, possam funcionar como um sistema de vazios, protegendo o concreto da ação do gelo-degelo.

2.2. A ESTRATÉGIA DA CURA INTERNA PARA MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA.

MECHTCHERINE e DUDZIAK (2012) mencionam que os métodos convencionais de cura do concreto podem não contribuir substancialmente para mitigação da retração autógena do concreto com uma baixa relação água/cimento, mesmo se for aplicada cura

úmida intensiva. Em contraste com a retração por secagem que ocorre devido à perda de água na superfície dos elementos de concreto, a retração autógena ocorre sobre o volume inteiro do elemento de concreto e conseqüentemente, um tratamento superficial não é suficiente para resolver o problema. Além disso, como a microestrutura típica do concreto de alta resistência é muito densa, mesmo em idades precoces, isto não permite um transporte suficientemente rápido da água de cura para o interior dos elementos de concreto, especialmente se são de dimensões avantajadas. Tendo isto em vista, tem sido proposta a utilização da cura interna pela adição de materiais com uma alta capacidade de armazenamento de água na mistura de concreto, os quais suprirão água para a matriz circundante enquanto ocorre a autodessecação (MECHTCHERINE e DUDZIAK, 2012).

Segundo JENSEN e LURA (2006) os agregados normais utilizados no concreto podem conter água que pode ser usada como água de cura interna. Esta água é mantida fisicamente na porosidade natural dos agregados. As rochas densas como quartzito, granito ou bauxita, utilizadas nos concretos de alta resistência, podem não conter porosidade. Assim, a água de cura interna não pode ser induzida no concreto através do agregado. Nestes casos, é necessário induzir a água de cura interna pelo uso de aditivos especiais. Um grande número de substâncias químicas contém água quimicamente ligada e esta água é mantida dentro da estrutura molecular por ligações químicas. Também existem substâncias com água fisicamente adsorvida, como a argila bentonítica, ela têm uma superfície específica elevada que permite absorver várias camadas moleculares de água na sua estrutura. Existem materiais naturais ou produzidos artificialmente que tem uso potencial como agentes de cura interna, devido à sua significativa porosidade aberta. Muitos destes materiais são utilizados como agregados leves no concreto, previamente saturados em água, armazenando-a pelas suas forças capilares. Alguns exemplos de agregados leves são a pedra-pome (rocha vulcânica porosa), a perlita (silicoso natural), a argila expandida (que tem marcas registradas como Liapor e Leca), a estalita (é produzida pela transformação de ardósia triturada em fornos rotativos), e a terra diatomácea originada dos esqueletos de algas pré-históricas.

Estudos pioneiros realizados por JENSEN e HANSEN (2001) demonstraram que alguns PSA possuíam uma habilidade muito pronunciada para mitigar a retração autógena em concretos de alta resistência, por isso o polímero Superabsorvente (PSA) foi proposto como agente de cura interna e parece ser o mais apropriado para utilizar como regulador de água na mistura de concreto.

2.3. POLÍMEROS SUPER ABSORVENTES (PSA)

2.3.1. Cinética da migração da água nos sistemas cimentícios contendo polímeros superabsorventes.

Segundo JENSEN (2011), a propriedade fundamental dos Polímeros Superabsorventes (PSAs) é a sua habilidade de absorver grandes quantidades de substâncias específicas do ambiente e retê-las dentro de sua estrutura. A maioria dos PSA são produzidos para absorver água, mas eles também podem ser fabricados para absorver outros líquidos, ou podem ainda, atuar como absorventes eficientes para capturar substâncias dissolvidas específicas. A “água” refere-se a uma solução aquosa inespecífica, não quimicamente água pura. A solução aquosa pode ser água da torneira, solução de hidróxido de cálcio saturada ou podem ser os fluidos dos poros em um concreto. Quando o PSA seco é exposto a este tipo de líquido, ele absorve tanto a água quimicamente pura como algumas das substâncias dissolvidas presentes na solução aquosa e, potencialmente, as acumula internamente.

Segundo JENSEN (2011), tipos específicos de PSAs podem ser capazes de absorver quantidades de água em até 1500 vezes a massa do material seco, mas a capacidade de absorção observada num ambiente cimentício pode ser muito mais baixa, por exemplo, 20 vezes seu próprio peso. Entretanto este valor é ainda muito mais elevado do que a capacidade de absorção de outros materiais relevantes utilizados nos sistemas cimentícios para o armazenamento de água.

JENSEN (2011), menciona que a quantidade de água absorvida por um PSA depende das propriedades do próprio PSA e do seu ambiente de exposição. A forma geométrica do PSA influencia a taxa de intercâmbio de água com o ambiente, enquanto a composição química do PSA influencia tanto a taxa de intercâmbio de água como a capacidade de absorção. Os parâmetros no ambiente de exposição que influenciam a absorção de água do PSA incluem a temperatura, a pressão e a composição iônica específica do líquido em exposição (JENSEN e LURA, 2006).

Segundo LURA et. al, (2012) na maioria das aplicações, os polímeros superabsorventes foram adicionados à mistura de concreto no estado seco. Quando as partículas secas do PSA entram em contato com água, durante a mistura do concreto, elas absorvem rapidamente formando cavidades cheias de água. A cinética da absorção e a quantidade de fluido absorvida pelo PSA dependem tanto da natureza do PSA como da pasta de cimento ou concreto e, em particular, da composição da solução porosa. Uma vez que o PSA atinge

seu tamanho final, ele forma inclusões estáveis cheias de água. Esta água é subsequentemente aspirada para o interior dos poros capilares menores e consumida pela hidratação do cimento. O PSA acaba na forma de poros vazios na pasta de cimento.

Segundo FRIEDRICH (2012) a principal força motriz para o inchamento dos polímeros superabsorventes (Figura 2.2) é a pressão osmótica que é proporcional à concentração de íons na solução aquosa. Como os íons nos PSAs são forçados a ficar juntos intimamente pela rede polimérica, existe uma pressão osmótica muito elevada no interior. A pressão osmótica é reduzida pela absorção de água, diluindo as cargas. A força de reposição da rede polimérica e a pressão osmótica externa estão trabalhando para compensar esta força motriz osmótica. Se o PSA tiver que inchar ou reter água contra forças mecânicas externas, isto reduz sua capacidade de absorção.

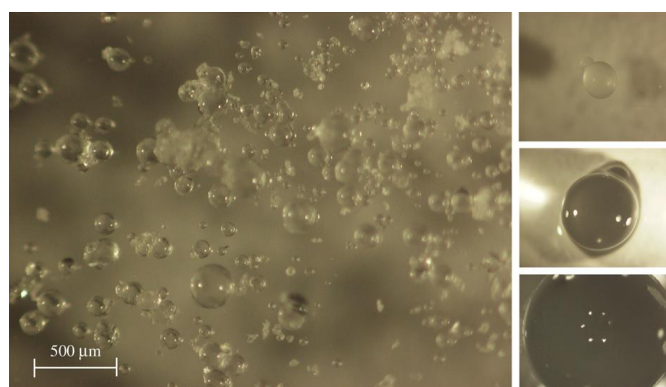


Figura 2.2 - Microscopia do processo de inchamento dos Polímeros Superabsorventes, no tempo zero, antes e durante o contato com água. À esquerda: o tamanho de partícula observado está no intervalo de 0 a 300 micrometros. A morfologia em ambos estados, inchado e seco é caracterizada por partículas esféricas. Na coluna da direita é apresentado o processo de inchamento de uma partícula de PSA em três etapas: a mudança física do estado seco ao inchamento é caracterizada por uma transição rápida do sólido ao gel. Para monitorizar o processo de absorção foi utilizado um microscópio óptico estéreo NIKON SMZ-2T, equipado com uma câmara (ESTEVES, 2011).

Segundo FRIEDRICH (2012) desde a invenção dos PSAs (MEYER, 1989), a idéia foi utilizá-los como aditivos para aplicações na construção civil. As primeiras patentes foram escritas por DOW e HOECHST tratando com argamassas secas contendo superabsorventes (MEYER, 1989). No entanto, tais produtos nunca foram introduzidos no mercado. No final do ultimo século, o foco foi sua utilização como agente de cura interna em concretos de alta resistência (FRIEDRICH, 2012).

Segundo FRIEDRICH (2012), quimicamente falando, os PSAs são polieletrólitos reticulados, os quais começam a inchar mediante o contato com água ou soluções aquosas,

resultando na formação de um hidrogel. Na indústria higiênica somente são utilizados PSAs baseados em poli acrílicos reticulados, os quais são parcialmente neutralizados com hidróxidos de metais alcalinos, normalmente sódio (Figura 2.3). Tradicionalmente o mercado para os PSAs é dividido em duas partes: indústria de higiene e PSAs técnicos. Na indústria de higiene destaca-se o uso em fraldas. Os PSAs técnicos compreendem todas as aplicações não enfocadas nos produtos de higiene. Os PSAs técnicos, cuja base química é acrilamida e ácido acrílico, são utilizados, por exemplo, em paisagismo, isolamento de cabos, combate a incêndios, embalagens de alimentos, e em materiais cimentícios.

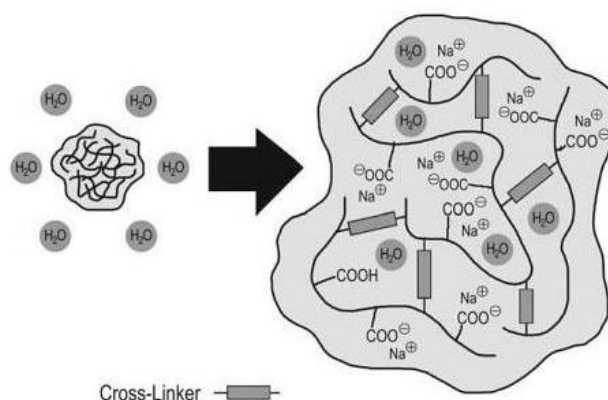


Figura 2.3 - PSA baseado em ácido poliacrílico. (FRIEDRICH, 2012)

2.3.2. Produção

Segundo IRIE et. al, (1996) a produção dos polímeros superabsorventes inicia-se com uma solução aquosa, com uma concentração de 25 a 40% da massa, de monômero. A solução é arrefecida de 0 a 10 °C e transferida para o reator, que pode ser um reator de correia sem fim ou um amassador. No primeiro caso, a solução de monômero é derramada no início da correia e a polimerização é executada adiabaticamente, formando um gel duro como borracha. No fim da correia, uma extrusora corta o gel em pequenos pedaços, que posteriormente são secos. As partículas secas são moídas até atingir o tamanho de partícula desejado. No caso do amassador, a polimerização e o corte do gel são feitos em uma única etapa. Ambos os processos são utilizados em larga escala, produzindo-se até 100.000 toneladas de polímeros super absorventes por ano. As partículas que são feitas utilizando estes processos têm uma forma irregular e parecem ser vidro quebrado, se observadas num microscópio.

Segundo AOKI e YAMASAKI (1978) e NAKAMURA et. al. (1996), uma tecnologia alternativa para a produção é a suspensão de polimerização inversa. Neste processo, a solução aquosa de monômero é suspensa num solvente orgânico como o hexano ou o ciclohexano. A polimerização é iniciada entre 50 e 70 °C e, depois da polimerização, a água pode ser removida por destilação azeotrópica, que é uma técnica de separação de compostos químicos líquidos. O produto é separado por filtração e procede-se à secagem. Os polímeros superabsorventes que são feitos por este processo são esféricos. Eles podem ser partículas esféricas individuais ou aglomerados de partículas esféricas menores, que assemelham à forma de uma framboesa.

2.3.3. Ensaios de caracterização

Existem diferentes métodos de ensaio para a caracterização dos PSA, como distribuição do tamanho de partículas e determinação da capacidade de absorção, que é o mais importante. Segundo JENSEN (2011), uma forma de fazer a determinação da capacidade de absorção de um PSA é o método *tea bag*. Este método consiste no preenchimento de certa quantidade de partículas secas de PSA dentro de um pequeno saco permeável - *tea bag*- o qual é subsequentemente submerso dentro de um líquido. Adicionalmente, o *tea bag* cheio de PSA em submersão pode ser submetido a uma leve pressão. A capacidade de absorção é calculada com base na massa inicial do PSA seco, em relação ao ganho de massa do *tea bag* cheio depois de ser removido do líquido de exposição e a amostra ser drenada do excesso de líquido.

FRIEDRICH (2012) menciona o ensaio de absorção sob pressão externa (*APP - absorption against pressure* ou *AUL - absorption under load*), utilizado por outros pesquisadores para determinação da absorção do PSA. O princípio deste método é baseado no fato do PSA inchar e reter a água, quando submetido a uma pressão externa. ZOHURIAAN-MEHR (2008) explica o funcionamento do ensaio AUL, absorção sob carga. Para este ensaio é utilizado um aparato que inclui um filtro de vidro sinterizado, com porosidade #0, colocado em uma placa de Petri. Uma quantidade de PSA seco com massa de $0,90 \pm 0,01$ g é uniformemente distribuída na superfície de uma gaze de poliéster localizada no vidro sinterizado. Sobre as partículas secas de PSA, é colocada uma carga cilíndrica, ainda podendo escorregar livremente em um cilindro de vidro. A carga desejada é colocada sobre a amostra de PSA, adicionando líquido até o nível do filtro de vidro. Para prevenir contra evaporação e possíveis mudanças na concentração salina, toda a montagem deve ser

coberta. Depois de 60 minutos, é medida a massa das partículas inchadas. A AUL é calculada pela diferença de massa do PSA seco e inchado, dividida pela massa do PSA seco.

Segundo JOY e HSU (2005), para as várias aplicações técnicas, é muito importante conhecer a distribuição do tamanho de partículas do PSA (Figura 2.4), a qual pode ser obtida com a utilização de sistemas laser, que podem determinar a curva de distribuição completa de um produto. Um parâmetro que depende estritamente do tamanho das partículas é a velocidade de inchamento. Um ensaio bastante simples para determinar a velocidade de inchamento é o chamado ensaio de vórtice. Uma quantidade definida de solução para o ensaio é agitada dentro de uma proveta formando um vórtice. É adicionado o PSA e medido o tempo até que o vórtice tenha desaparecido.

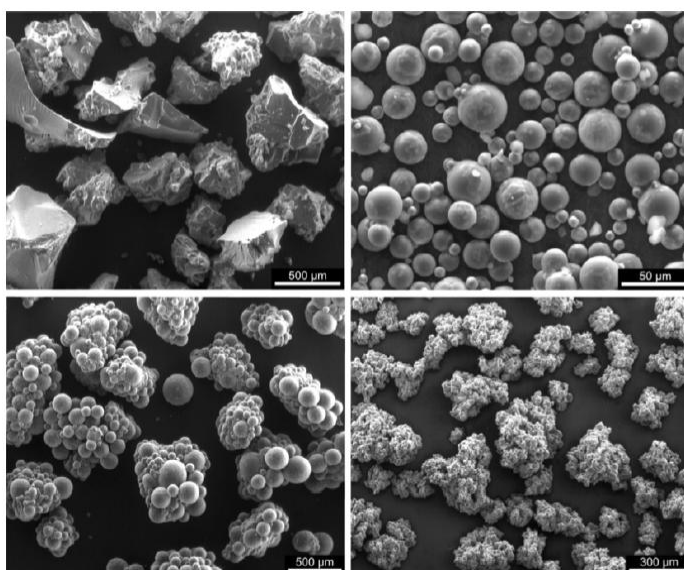


Figura 2.4 - Microscopia eletrônica de varredura de diferentes tipos de PSA. Microscopia óptica pode ser menos adequada para o estudo da morfologia do PSA devido a artefatos visuais criados pela reflexão da luz na superfície do PSA. Superior esquerda: Solução polimerizada de PSA triturado. Superior direita: suspensão polimerizada de PSA em partículas esféricas, sua forma individual mais simples. Inferior esquerda: Suspensão polimerizada de PSA aglomerada intencionalmente para reduzir o empacotamento das partículas e aumentar a fluidez do pó. Inferior direita: Suspensão polimerizada de PSA com uma superfície em forma de brócolis altamente complicada para evitar entupimentos durante sua absorção de água ultra rápida (JENSEN, 2011).

2.4. A REDUÇÃO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA DEVIDA AO USO DO PSA.

2.4.1. Determinação da transição suspensão - sólido poroso (tempo-zero).

Citando SILVA 2007 “a determinação precisa do tempo-zero é de suma importância para compreender o comportamento nas idades iniciais do concreto, especialmente para se determinar experimentalmente as variações de volume e também para calibrar os modelos numéricos, considerando as tensões e a relaxação, desde o tempo que essas propriedades fisicamente se iniciam (WEISS, 2002). As variações dimensionais que acontecem no estágio quando o material cimentício se comporta como um fluido normalmente não tem grande importância do ponto de vista prático, pois o material se deforma plasticamente, sem gerar tensões. A redução de volume externo é uma simples contração plástica (Contração Le Chatelier). Entretanto, quando o material cimentício passa de um fluido para um sólido viscoelástico, são geradas: (I) tensões internas devido às variações volumétricas da pasta contra as inclusões rígidas e sólidas de agregados, e (II) tensões que são geradas por todo o material cimentício se o elemento estrutural estiver externamente restringido (BENTUR, 2001). Estas tensões podem gerar retração no concreto e subsequentemente, aumentar o risco de fissuração precoce”.

Estudos realizados por AÏTCIN (1998) e SILVA (2007), mostram que, se uma atenção especial não for dispensada para assegurar que a determinação experimental dessa propriedade comece no tempo zero, os resultados podem ser substancialmente subestimados, até um 30%. Para solucionar essas dificuldades, organismos normalizadores começaram a modificar as especificações de modo a contemplar as necessidades dos concretos de alto desempenho, fazendo sugestões específicas quanto à terminologia referente ao tempo no qual a determinação da retração autógena deve começar e o respectivo método de ensaio. O JCI (1998) recomenda iniciar a determinação da retração autógena no tempo de início de pega. Também, o desenvolvimento de simulações numéricas precisas, requer que sejam usados graus de hidratação apropriados no ponto de referência inicial (tempo-zero).

Existem diferentes técnicas para determinar a pega e o endurecimento de materiais cimentícios. Os ensaios padrão para determinação dos tempos de pega continuam sendo realizados usando o teste de um parâmetro: penetração de uma agulha. Os métodos mais usuais são o ensaio de penetração padrão normatizado pela ASTM 403 (2000), válido

apenas para argamassa e o da agulha de Vicat NBR NM 65 (2002), válido apenas para pastas. O método da ASTM C 403 (2000) simplesmente descreve uma idade na qual a argamassa, de um dado concreto, desenvolve uma resistência à penetração de aproximadamente 500 psi, ou 3,5 MPa (e resistência à compressão aproximadamente nula). O tempo de fim de pega se refere ao ponto onde a argamassa de um dado concreto atinge uma resistência à penetração de 4000 psi, ou 28 MPa (e resistência à compressão de aproximadamente 0,75 MPa). O ensaio com agulha Vicat mede a resistência de uma pasta de cimento, de consistência normal, à penetração de uma agulha, com massa padrão. Devido à arbitrariedade desses métodos, nem sempre essa metodologia é adequada para determinar diretamente o tempo zero, podendo conduzir a resultados falsos. Mais recentemente têm sido desenvolvidos métodos avançados para determinar processos de pega e endurecimento de pasta de cimento tais como velocidade de pulso ultra-sônico, emissão acústica, adsorção de microondas e técnicas de determinação da condutividade e da resistividade elétrica (SILVA, 2007).

Essa técnica da propagação da onda ultrassônica desenvolvida por SILVA (2007), adaptada a partir do trabalho de REINHARDT et al. (2000) tem se mostrado bastante eficaz para determinar, com precisão, essa transição. Diversos trabalhos já foram realizados na UnB, utilizando esta técnica, tais como SILVA (2007), SILVA et. al. (2011), PEREIRA e MATOS (2011), CLARO e SARAIVA (2012), LOPES (2011), LOPES et al. (2013), ORDOÑEZ et. al. (2013), SILVA et. al. (2013), TRALDI e AGUIRRE (2013) e MORAES e CERQUEIRA (2014), os quais apresentaram resultados consistentes e comprovam sua eficácia para a determinação do tempo zero.

Na Figura 2.5 são apresentados os diferentes estágios da curva típica de velocidade de propagação da onda ultrassônica x tempo decorrido desde a adição da água ao cimento para fabricação do concreto. (SILVA et. al. 2011a). No gráfico podem ser observados quatro estágios distintos de comportamento da curva. No estágio inicial a velocidade de propagação do pulso ultrassônico parte do zero e continua com valores muito baixos. Este comportamento ocorre porque nas primeiras horas de idade os produtos da hidratação e os grãos ainda não apresentam continuidade, fazendo que as ondas não consigam se propagar no microconcreto. No segundo estágio a velocidade de propagação apresenta uma aceleração acentuada devida à transição do microconcreto do estado fluido para o estado sólido, mostrando um crescimento vertical na curva velocidade vs. tempo.

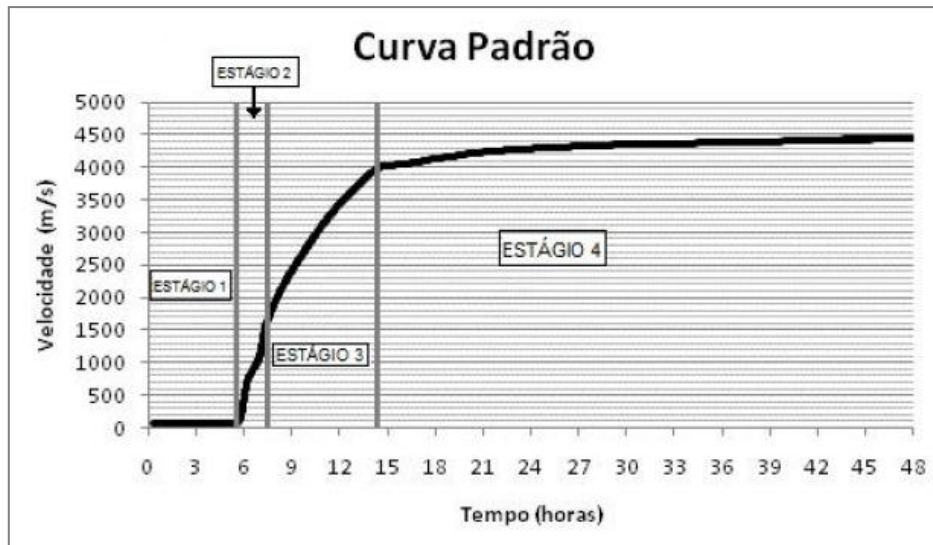


Figura 2.5 - Estágios da curva típica de velocidade de propagação da onda ultrassônica. (SILVA et. al., 2011a).

No terceiro estágio, a desaceleração do processo de hidratação ocasiona uma inflexão no crescimento da velocidade. Finalmente, no último estágio ocorre uma estabilização da curva de velocidade com tendência a um valor constante de propagação do pulso ultrassônico. Assim a transição suspensão - sólido ou tempo zero pode ser definida como aquele momento em que ocorre um aumento considerável da velocidade de propagação, ou seja, no segundo estágio do comportamento da curva velocidade x tempo.

2.4.2. Determinação da retração autógena.

Segundo SILVA (2007), não existe um consenso sobre a metodologia para determinação da retração autógena, dificultando a interpretação e comparação de resultados. O ensaio precisa ser feito sob condições padronizadas para que os resultados não sejam afetados por fatores como perda de umidade, variação de temperatura ou forças externas, ou seja, isolar os fenômenos que acontecem no concreto para que possa ser determinado um fenômeno eminentemente autógeno. Essa determinação pode ser realizada em pasta de cimento. A determinação da retração autógena na pasta de cimento pode ser volumétrica ou linear.

TAZAWA (1999) propõe 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 3 corpos-de-prova prismáticos para cada mistura, 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. Na figura 2.4 é apresentado um esquema desta metodologia.

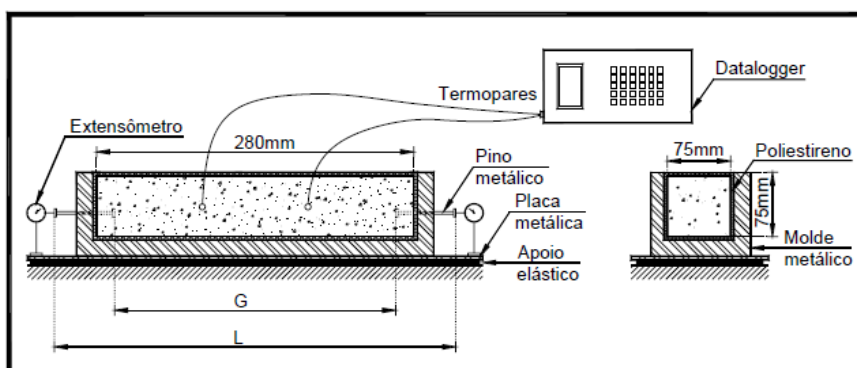


Figura 2.6 - Determinação da variação relativa de comprimento. SILVA (2007)

JENSEN e HANSEN (1995) desenvolveram um dispositivo denominado dilatômetro, constituído de um molde flexível, fixado rigidamente a uma das extremidades e ligado a outra extremidade por um relógio medidor de deslocamento (Figura 2.5). Os autores desenvolveram um molde especial corrugado, capaz de transformar a deformação volumétrica, medida antes da pega, em deformação linear e medir esta deformação linear, após a pega. Essa transformação é possível graças a grande rigidez na direção radial em relação à direção do molde.



Figura 2.7 - Equipamento para determinação das deformações autógenas. a) Dilatômetro com moldes corrugados. b) Configuração do ensaio convencional de acordo com a norma alemão (MECHTCHERINE e DUDZIAK; 2012).

2.4.3. Redução da retração autógena.

O efeito dos Polímeros Super Absorventes na redução da retração autógena foi estudado por vários pesquisadores. Alguns deles são apresentados a seguir. JENSEN e HANSEN (2002) fizeram a determinação das deformações autógenas de pastas de cimento durante a hidratação, contendo diferentes quantidades de PSA (suspensão polimerizada contendo partículas esféricas) em condições isotérmicas, com temperatura ambiente de 20 °C. As

deformações autógenas das amostras de pasta de cimento, feitas com uma relação água/cimento de 0,3 foram determinadas com um dilatômetro, com moldes corrugados de polietileno. Os autores concluíram que adições de 0,3% e 0,6% de PSA, em relação à massa de cimento, levaram a uma expressiva mitigação da retração autógena e até induziram uma expansão inicial de 12% e 24% respectivamente, aos 14 dias de idade.

REINHARDT e MONNIG (2006) pesquisaram o efeito da cura interna na retração total do concreto com uma relação água/cimento de 0,36 (concreto de referência). Numa mistura contendo partículas poliméricas em suspensão com um teor de 0,7% da massa do cimento, foi adicionada água até alcançar uma relação água/cimento de 0,42, a fim de proporcionar água de cura interna. Nos resultados obtidos, a presença do PSA gerou uma diminuição de 35% nos valores da retração, aos 10 dias de idade, em comparação com o concreto de referência.

MECHTCHERINE e DUDZIAK (2012) realizaram pesquisa em concretos de ultra-alta resistência contendo basalto, $D_{max} = 8$ mm e 192 kg de fibras de aço por m^3 de concreto. A mistura de referência continha 650 kg/m^3 de cimento Portland, 177 kg/m^3 de sílica ativa e relação água/aglomerante de 0,21. A adição de PSA (0,3% por kg de cimento) e água adicional (aumento da relação água/aglomerante em 0,04) conduziram a uma redução de 35% na retração autógena, aos 7 dias.

Segundo MECHTCHERINE e DUDZIAK (2012) a cura interna utilizando PSAs e uma quantidade adicional de água, reduz dramaticamente a retração autógena dos concretos com uma baixa relação água/aglomerante. Este efeito torna-se ainda mais pronunciado incrementando as quantidades de PSA e água adicional. A redução da retração autógena é muito alta nas primeiras horas de endurecimento do concreto. No estágio seguinte, quando o concreto atinge aproximadamente 1,5 - 2 dias de idade, o efeito da cura interna no desenvolvimento da deformação autógena somente pode ser observado para proporções mais altas de PSA e água adicional.

ORDOÑEZ et al. (2013) realizaram pesquisa com microconcretos de alta resistência, com traço de referência com $a/c = 0,30$ e mais três misturas contendo PSA de partículas esféricas constituído de acrilamida, nos teores de 0,3% - 0,4% e 0,6%, em relação à massa de cimento. Os resultados mostraram que as adições de PSA proporcionaram uma redução

na retração autógena da ordem de 80%, aos 2-3 dias de idade, em relação à mistura de referência, e de 65% e 50%, aos 7 e 28 dias, respectivamente. A mistura contendo PSA no teor de 0,6% foi a mais eficaz na mitigação da retração autógena.

Vários pesquisadores apresentaram resultados consistentes, comprovando a eficácia da cura interna utilizando polímeros superabsorventes na redução da retração autógena do concreto, com relação às misturas de referência. PEREIRA e MATOS (2011) obtiveram reduções na retração autógena de 92%, 71% e 40%, aos 3, 7 e 28 dias de idade, respectivamente, para um teor de PSA de 0,3% da massa do cimento. CLARO e SARAIVA (2012) e TRALDI e AGUIRRE (2013) apresentaram resultados semelhantes, com reduções de 91%, aos 3 dias de idade, para teores de PSA de 0,3% e 0,6% da massa do cimento e reduções de 84% e 92%, para cada teor de PSA, depois dos 7 dias de idade.

Diversos pesquisadores do comitê técnico da RILEM desenvolveram pesquisa com ensaios interlaboratoriais utilizando dois tipos de PSA, num teor de 0,3% da massa do cimento. A redução na retração autógena, em comparação com a mistura de referência, foi de 100% e 62%, para cada tipo de PSA, no primeiro dia, e de 42% e 33%, respectivamente, aos 28 dias de idade (MECHTCHERINE et al.; 2014). Os dois PSAs utilizados e a dosagem dos concretos, fabricados por cada pesquisador, foram iguais, porém, com materiais locais, comprovando a eficiência do PSA na redução da retração autógena.

2.5. EFEITO DOS POLÍMEROS SUPERABSORVENTES NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.

2.5.1. Trabalhabilidade.

Segundo TOLEDO et. al. (2012), as propriedades reológicas do concreto fresco contendo Polímeros Superabsorventes podem mudar substancialmente, devido à propriedade específica dos PSAs que lhes permite absorver várias vezes seu próprio peso em líquidos, formando um gel. Em muitos casos, têm sido observados ensaios empíricos realizados a fim de se obter propriedades que podem ser associadas com o comportamento reológico do concreto. Por exemplo, quando foram feitos ensaios com concreto auto-adensável, o tempo do fluxo de saída no ensaio de Funil V foi frequentemente relacionado com a viscosidade plástica do concreto. Segundo JENSEN e HANSEN (2002) a adição de 0,4% de PSA, em

relação à massa de cimento, conduz a um abaixamento da relação água/cimento livre de 0,06. Esta mudança na relação água/cimento causa um incremento na viscosidade plástica do concreto.

Com o objetivo de avaliar a capacidade de absorção dos polímeros superabsorventes em condições de mistura, MONNIG (2009) fez um estudo da evolução no tempo do fluxo de espalhamento em misturas de argamassa, com diferentes conteúdos de PSA. As determinações do fluxo de espalhamento coletadas foram expressas como uma função do tempo de mistura adicional, com intervalos regulares de 2 ou 5 minutos. A progressão da trabalhabilidade para misturas contendo PSA assemelha-se à da argamassa de referência com uma quantidade particular de água. Isto é verdade uma vez que a saturação total do PSA foi atingida. As determinações sugerem que alguns PSAs podem controlar a trabalhabilidade de materiais cimentícios por longos períodos de tempo, mesmo depois de ter finalizado o processo de mistura.

Ainda segundo MONNIG (2009), o fluxo de espalhamento não é uma ferramenta suficiente para uma avaliação quantitativa das variáveis reológicas, embora, as mudanças que apareceram entre duas misturas correspondentes sem adição de PSA e com agente de cura, depois da saturação total, foram relativamente baixas. Além disso, a duração do ensaio estava limitada de 12 a 15 minutos, depois da mistura regular, enquanto que os efeitos do PSA podem ser observados por períodos mais longos do que a fase fluida do material cimentício.

Dados sobre o conteúdo de ar e a densidade de numerosas combinações de argamassas e concretos também foram reportados por MONNIG (2009). Os parâmetros de estudo foram a presença de PSA e o tipo, a distribuição do tamanho de partículas, o conteúdo e a magnitude total da relação água/cimento. Embora, as misturas contendo PSA apresentaram, em geral, uma tendência a incrementar o conteúdo de ar e diminuir a densidade, algumas misturas mostraram o efeito contrario. A influência do PSA na reologia dos materiais cimentícios precisa ser melhor estudada.

2.5.2. Endurecimento e desenvolvimento da microestrutura.

Segundo YE et. al. (2012) a microestrutura do concreto com PSA é diferente, se comparado com o concreto de resistência normal ou concreto de alto desempenho. As

principais razões que causam esta mudança na microestrutura, especialmente na estrutura de poros no concreto contendo PSA, provavelmente são: (I) não uniformidade da dispersão do PSA durante a mistura; ou seja, quando o PSA está completamente cheio de água, ele atua como um agregado leve e quando está vazio, ele atua como um vazio de ar no concreto; (II) a absorção de água do PSA muda a relação água/cimento efetiva nas primeiras etapas da hidratação e a liberação de água do PSA afeta a hidratação adicional do cimento; (III) a interface entre o PSA e a matriz da pasta de cimento pode introduzir poros adicionais. O efeito do PSA na estrutura de poros não é só na porosidade total, mas na distribuição do tamanho de poros. As partículas de PSA introduzem vazios aumentando a porosidade total do concreto.

O grau de hidratação de pastas de cimento contendo PSA é maior depois dos 14 dias de idade, se comparadas com a pasta de referência. A mudança do grau de hidratação depende de parâmetros do material como tamanho das partículas e quantidade de PSA na mistura, a relação água/cimento original e o procedimento pelo qual o PSA foi adicionado na mistura: seco ou previamente saturado. A adição do PSA na mistura incrementa o grau de hidratação das partículas de cimento, isto leva a uma redução da porosidade capilar na matriz porque os vazios introduzidos pelo PSA estão distribuídos homogeneamente na mistura (YE et. al., 2012).

2.5.3. Propriedades mecânicas.

A maior parte das publicações relata sobre a redução na resistência à compressão dos concretos contendo Polímeros Superabsorventes, em comparação com o concreto de referência, especialmente nas idades precoces. Entretanto, algumas publicações demonstram quase os mesmos resultados ou maior resistência em idades avançadas para misturas contendo PSA, em relação às misturas de referência. Em geral, a resistência do concreto com PSA depende das condições de cura, idade e composição do material (KOVLER, 2012).

Segundo KOVLER (2012), a maior parte do uso dos PSAs nas construções de concreto baseia-se em seus efeitos positivos como agente de cura interna nos concretos de alta resistência, tendo como objetivos mitigar a retração autógena. Um efeito de acompanhamento que pode ser esperado é alguma redução moderada na resistência, nas primeiras idades do concreto pelo aumento da porosidade e umidade das amostras. Ao

mesmo tempo, os corpos-de-prova ensaiados em idades avançadas, algumas vezes apresentam resistência e módulo de elasticidade mais elevados do que aqueles feitos com as misturas de referência, sem conteúdo de PSA. Este aumento, provavelmente é devido à hidratação avançada do cimento, que pode compensar a redução na resistência causada pela elevada porosidade. Contudo, esse comportamento necessita ser melhor estudado para compreender suas causas, investigando a microestrutura dos concretos contendo PSA. Outra possível aplicação é a introdução do PSA como agente de retenção de água. Como resultado da rápida absorção de água nos primeiros minutos da mistura, a relação água/cimento na matriz cimentícia diminui e a resistência do concreto endurecido aumenta. Em geral, também se esperava um aumento na resistência à tração e o módulo de elasticidade, mas isto não aconteceu.

JENSEN e HANSEN (2002) determinaram a resistência à compressão em argamassas usando cilindros com as seguintes condições de cura: um dia de cura com as amostras seladas, seguido de 27 dias de cura em água, a 20 °C. A média da resistência à compressão foi de 134 MPa, para a argamassa de referência (sem PSA) e 109 MPa para uma argamassa com uma relação água/cimento de 0,3, com conteúdo de PSA de 0,6% com relação à massa do cimento e 0,05% de água adicional de cura interna. Os autores concluíram que a resistência foi reduzida em 19% devido à adição de PSA.

Segundo MONNIG (2005), a resistência à compressão desenvolvida em argamassas preparadas com diferentes relações água/cimento e utilizando diferentes tipos de PSA não apresentou diferenças significativas entre as misturas com e sem polímeros. Segundo KOVLER (2012) o efeito do PSA na resistência à tração, a diferentes tipos de carregamento pode ser diferente do observado na resistência à compressão.

Segundo KOVLER (2012) o uso do PSA como agente retentor de água e sem introduzir água adicional requerida para a cura interna, ajuda a evitar a redução na resistência nas idades precoces do concreto e, algumas vezes fornece uma resistência aos 28 dias de idade um pouco maior do que no concreto com cura interna. Ao mesmo tempo, este uso do PSA não aumenta a resistência do concreto significativamente nas idades avançadas.

SILVA et al. (2013) realizaram ensaios em três microconcretos de alta resistência: duas misturas com adição de polímero superabsorvente nos teores de 0,3% e 0,6% em relação à

massa de cimento e uma mistura de referência. Os materiais utilizados foram cimento Portland CP V ARI, sílica ativa em pó densificada num teor de 10% em relação à massa de cimento, areia natural de rio com módulo de finura de 2,40, superplastificante com base em uma cadeia de policarboxilato para um espalhamento de 190 +-10 mm e PSA em pó seco de partículas esféricas constituído de acrilamida. A quantidade de água para cura interna variou em função da dosagem de PSA adicionado à mistura. A relação água/cimento no traço de referência de 0,3 aumentou para 0,32 e 0,35 com adições de PSA de 0,3% e 0,6% respectivamente.

Na determinação da retração autógena, todas as misturas apresentaram expansão inicial no primeiro dia. A adição do PSA proporcionou uma redução considerável na retração autógena. Enquanto as propriedades mecânicas, com o uso de PSA no teor de 0,3% o microconcreto apresentou uma redução de 2% na resistência à tração quando comparado com o traço de referência. Para a adição de PSA de 0,6%, a redução foi da ordem de 10% aos 7 e 28 dias de idade. Nos ensaios de resistência à compressão, a mistura com teor de PSA de 0,3% apresentou uma redução de 6% tanto aos 7 como aos 28 dias, em relação ao traço de referência. No teor de 0,6% de PSA, a redução foi de 13% e 15%, aos 7 e 28 dias de idade (SILVA et al., 2013).

2.5.4. Durabilidade

Segundo ANTUNES (2010) são diversas as formas de abordagem e conceituação de durabilidade. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), para as estruturas de concreto, durabilidade “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. A ASTM E632-82 (1996), se refere à durabilidade como sendo a capacidade de um produto, componente, montagem ou construção manter-se em serviço ou em utilização, ou de desempenhar as funções para as quais foi projetado durante um determinado período de tempo. Do mesmo modo, o CIB W80/RILEM 71 – PSL (1987) entende durabilidade como “a capacidade que um produto, componente ou construção possui de manter o seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados, de maneira a atender às necessidades dos usuários, em cada situação específica”.

Segundo REINHARDT e ASSMANN (2012) é necessário o transporte de fluidos e de gases para a deterioração das estruturas de concreto, a qual pode ocorrer por corrosão da

armadura, por reações álcali-sílica, por lixiviação, por ciclos de gelo e degelo ou por ataque de sais. Para avaliar a resistência do concreto contra os diferentes tipos de ataques é muito importante conhecer as propriedades de transporte do concreto.

Os pesquisadores REINHARDT e ASSMANN (2009) conduziram ensaios utilizando um PSA do tipo acrílico, dividido em três categorias de diâmetro de partícula, em condição seca: menores do que 63 micrometros (s), de 63 a 125 micrometros (m) e de 125 a 250 micrometros (l). A absorção de água das partículas foi determinada em 24g de água por 1g de polímero. Foram fabricadas três misturas de referência com relações água/cimento de 0,50 - 0,42 e 0,36, respectivamente, e cinco misturas com adição de PSA, variando o conteúdo de PSA e a distribuição do tamanho da partícula. Para avaliar a influência do PSA nas propriedades do concreto, cada mistura com adição de PSA foi comparada com duas misturas de referência: uma com a mesma relação água/cimento e a outra de acordo com a relação água/cimento da mistura com adição de PSA, desconsiderando a água armazenada nos poros do PSA. A quantidade de cimento utilizada foi de 450 kg/m^3 e agregado com um $D_{\text{máx}} = 8 \text{ mm}$. Para atingir a mesma consistência em todas as misturas, foi utilizado superplastificante de base éter policarboxilato. Para avaliar a resistência à compressão, foram ensaiados três cubos de 150 mm de comprimento da aresta, na idade de 28 dias.

REINHARDT e ASSMANN (2009) concluíram que a resistência do concreto com teor baixo de PSA é similar à resistência do concreto de referência com a mesma relação água/cimento, assim, todas as misturas contendo PSA, com relação água/cimento de 0,50 e volume de poros de PSA de 3,7 a 6,5% do volume total, mostraram quase os mesmos valores de resistência à compressão. A diferença no tamanho dos poros não parece ter efeito nenhum, por causa do pequeno volume dos poros poliméricos em comparação com o volume dos poros de ar.

2.5.5. Aplicações práticas dos polímeros superabsorventes.

Segundo CUSSON et. al. (2012) o controle da fissuração devida às mudanças de volume nas idades iniciais do concreto é essencial para se obter durabilidade a longo tempo das estruturas de concreto. Na atualidade, muitas destas estruturas apresentam fissuração por retração em idades precoces. Isto acontece, com maior frequência, em misturas de concreto

com alto teor de cimento e relações água/cimento baixas. Os polímeros superabsorventes podem ser utilizados efetivamente como agentes de cura interna em concretos de alta resistência, fornecendo a água necessária para maximizar a hidratação do cimento e diminuir a retração autógena. A produção de concreto resistente aos efeitos do gelo e degelo precisa de atenção especial de parâmetros específicos do material que incluem o sistema de vazios de ar, o qual é efetivamente controlado pelo teor volumétrico de ar, espaçamento e tamanho dos vazios de ar (CUSSON et. al., 2012). Segundo estudos desenvolvidos por LAUSTSEN et. al. (2008) as misturas de concreto contendo tipos específicos de PSA, apresentaram um aumento na resistência aos ciclos de gelo e degelo. Eles demonstraram as vantagens do uso dos PSAs sobre os químicos incorporadores de ar tradicionais, como estabilidade do sistema de vazios de ar e controle tanto da quantidade de ar incorporado como do tamanho dos vazios de ar.

Para finalizar, cabe mencionar, que é necessário considerar a redução nas propriedades mecânicas e elásticas do concreto, devido à adição de PSA, que deve ser analisada para cada tipo de polímero utilizado e para cada aplicação específica. É preciso se determinar experimentalmente o teor mais adequado de cada tipo de PSA para mitigar a retração autógena e ao mesmo tempo, minimizar o efeito da redução nas propriedades mecânicas.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para atingir os objetivos estabelecidos nesta pesquisa foram fabricados oito microconcretos de alta resistência. O programa experimental consiste em três misturas de referência com relações água/cimento diferentes, a saber; $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$. Para a primeira mistura de referência foram fabricados três microconcretos adicionando-se teores de PSA de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento, com a finalidade de avaliar o efeito de cada teor de PSA na redução da retração autóloga e nas propriedades mecânicas dos microconcretos. Para as misturas de referência com relação $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$, foi fabricado um microconcreto com apenas um teor de PSA (0,2% em relação à massa de cimento), a fim de se avaliar a influência de um mesmo teor de PSA em microconcretos com relações água/cimento diferentes.

O programa experimental desta pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (LEM/UnB) e nos laboratórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia. Nas figuras 3.1 e 3.2 são apresentados o esquema dos microconcretos da pesquisa e o organograma dos ensaios.

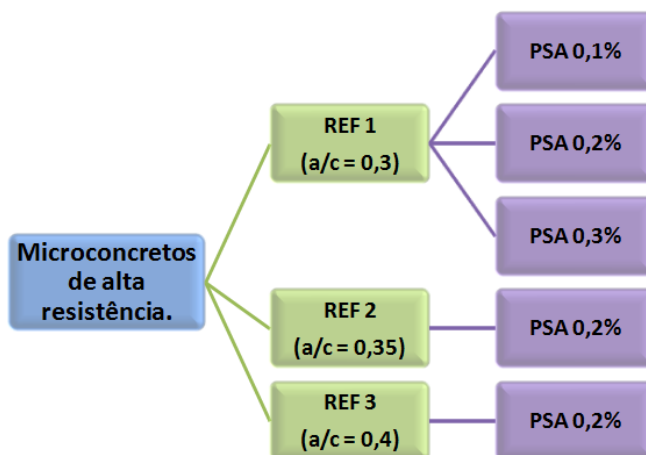


Figura 3.1 - Esquema dos microconcretos da pesquisa.

Inicialmente foram realizados os ensaios do grupo de microconcretos com relação $a/c = 0,30$. Foi observado que o teor de 0,2% de PSA foi eficiente na mitigação da retração autóloga sem reduções consideráveis nas propriedades mecânicas do microconcreto, como

será apresentado no capítulo 4, por essa razão foi o teor escolhido para ser utilizado nos microconcretos com diferentes relações a/c.

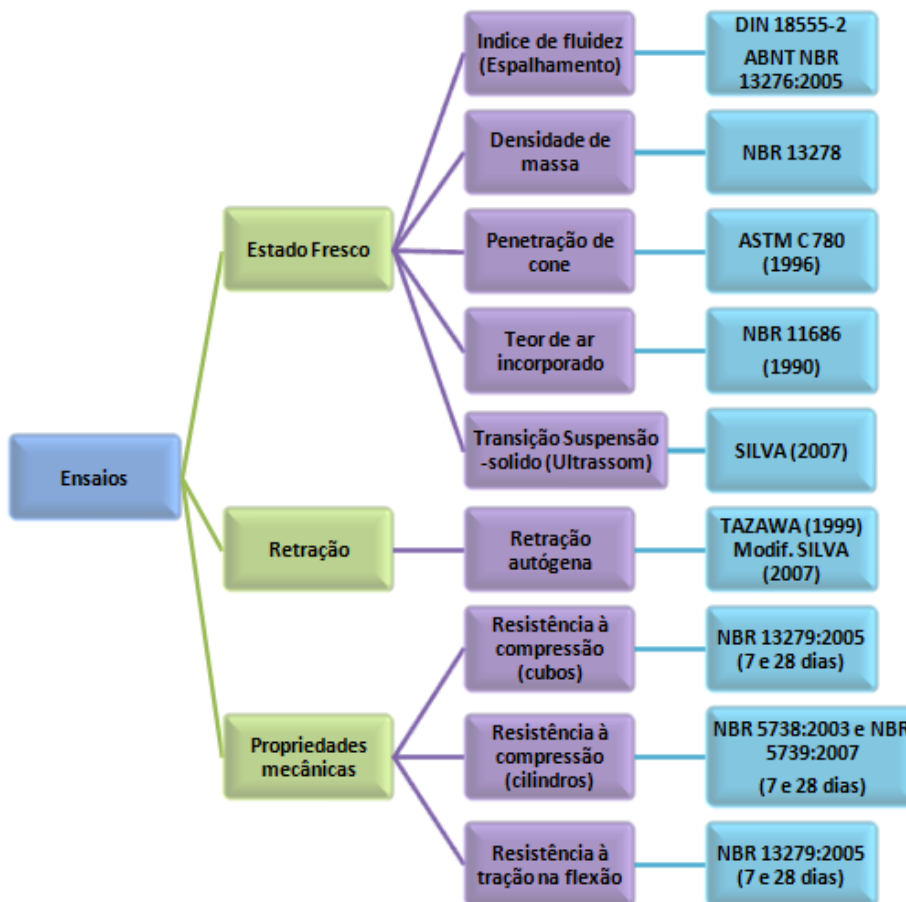


Figura 3.2 - Organograma dos ensaios.

3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A realização de um projeto experimental adequado possibilita ao pesquisador encontrar o ajuste ótimo entre os parâmetros do sistema, maximizando o seu desempenho, reduzindo os custos e tornando-o pouco suscetível aos fatores não controláveis. Os parâmetros do sistema são definidos como os fatores que podem influenciar no desempenho do produto, processo ou serviço (RIBEIRO e TEN CATEN, 2001).

3.1.1. Definição de variáveis

Segundo RIBEIRO e TEN CATEN (2001) os fatores controláveis ou variáveis independentes exercem influência sobre as variáveis de resposta ou variáveis dependentes. As variáveis dependentes são aquelas que possibilitam a quantificação de características e

propriedades relacionadas à qualidade do produto e podem ser determinadas experimentalmente. As variáveis dependentes definidas como objeto de estudo nesta pesquisa com microconcretos de alta resistência são:

- ❖ Retração autógena.
- ❖ Resistência à compressão.
- ❖ Resistência à tração na flexão.

As variáveis independentes ou fatores controláveis são aqueles subconjuntos de parâmetros do sistema, que podem exercer influência sobre as variáveis dependentes. A escolha e controle total destas variáveis são necessários para que possa ser verificada sua influência real nas variáveis dependentes (RIBEIRO e TEN CATEN, 2001).

Como o principal objeto desta pesquisa é o estudo da retração autógena em microconcretos de alta resistência, a definição das variáveis independentes foi realizada procurando conhecer a magnitude da sua influência neste fenômeno. Estas variáveis são:

- ❖ Teor de polímero superabsorvente (PSA) em relação à massa de cimento.
- ❖ Relação água/cimento.
- ❖ Trabalhabilidade (espalhamento de 19 ± 1 cm - DIN 18555-2).
- ❖ Idade das amostras.

3.2. MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram selecionados de acordo com a disponibilidade na região e utilizados da maneira como são fornecidos comercialmente, sem alterações em suas características iniciais.

3.2.1. Cimento

Para esta pesquisa é utilizado cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV - ARI, proveniente da mesma partida de fabricação. Foi selecionado este tipo de cimento porque contém menor teor de adição mineral e elevado teor de clínquer, assim pode ser minimizado o efeito da adição mineral na retração autógena. O material foi armazenado na embalagem original, protegido com sacos plásticos e dentro de bombonas plásticas, no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília. Todo o material utilizado é proveniente de um mesmo lote. Os ensaios de caracterização física, mecânica e química do cimento foram realizados nos laboratórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

em Aparecida de Goiânia. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características físicas e mecânicas do cimento e na Tabela 3.2 as características químicas.

Tabela 3.1 - Características físicas e mecânicas do cimento.

Ensaio	Unidade	Resultado	Limites NBR 5733	Referência normativa	
Massa específica	g/cm ³	3,03	---	NBR NM 23:2001	
Área específica - Blaine	cm ² /g	5.723	≥ 3000	NBR NM 23:2001	
Tempo de início de pega	h:min	03:00	≥ 1:00	NBR NM 65:2003	
Tempo de fim de pega	h:min	04:10	≤ 10:00	NBR NM 65:2003	
Água de consistência – Pasta	(%)	32,8	---	NBR NM 43:2003	
Expansão em Autoclave	(%)	0,1	---	ASTM C151	
Resistência à compressão	1 dia	MPa	22,3	≥ 14,0	NBR 7215:1996
	3 dias	MPa	30,7	≥ 24,0	NBR 7215:1996
	7 dias	MPa	39,5	≥ 34,0	NBR 7215:1996

Tabela 3.2 - Características químicas do cimento.

Composição	Teor (%)	Limites	Referência normativa
Perda ao fogo	2,18	-	NBR 5747:2004
Resíduo insolúvel	0,59	-	NBR 5742:2004
Óxido de Magnésio (MgO)	4,45	-	NBR 5742:2004
Dióxido de silício	24,06	<3,0	NBR 5742:2004
Óxido de ferro	2,98	-	NBR 5742:2004
Óxido de alumínio	7,27	<6,5	NBR 5742:2004
Óxido de Cálcio (CaO)	53,35	<0,75	NBR 5747:2004
Óxido de Cálcio livre (CaO)	1,2	-	NBR 5747:2004
Óxido de Sódio	0,35	<4,5	NBR 5743:2004
Óxido de Potássio	1,16	<1,0	NBR 5744:2004
Equiv. Alcalino	1,11	-	NBR 5742:2004
Sulfato de Cálcio	7,17	<3,5	NBR 5745:2004

De acordo com estes resultados pode-se estabelecer que o cimento utilizado nesta pesquisa cumpre com os requisitos prescritos na norma brasileira. O material não apresenta evidência da presença de material pozzolânico e tem um teor baixo de resíduo insolúvel. Os teores de oxido de cálcio (CaO) e oxido de magnésio (MgO) encontram-se dentro dos níveis aceitáveis para evitar reações expansivas do cimento devido à hidratação tardia destes compostos.

3.2.2. Sílica ativa

Nesta pesquisa é utilizada sílica ativa nacional em pó e do tipo não densificada, proveniente de um mesmo lote de fabricação. O teor de sílica ativa utilizado em todos os microconcretos da pesquisa foi fixado em 10% em relação à massa de cimento, seguindo a recomendação do comitê da RILEM TC 225-SAP (MECHTCHERINE e REINHARDT, 2012). Os ensaios de caracterização física e química da sílica ativa foram realizados nos laboratórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia. Nas Tabelas 3.3 e 3.4 são apresentados os resultados da caracterização da sílica ativa.

Tabela 3.3 - Caracterização física da sílica ativa.

Propriedade	Teor	Referência normativa
Umidade	0,22	NBR 12653:1992
Massa específica	3,33	NBR 9776:1987

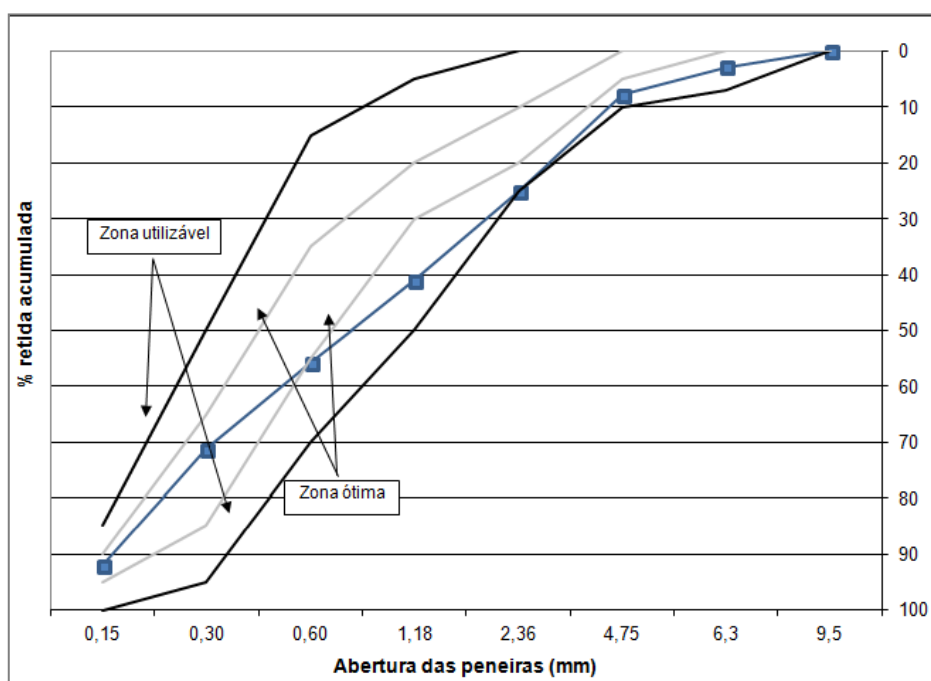
Tabela 3.4 – Caracterização química da sílica ativa.

Propriedade	Teor (%)	Limites	Referência normativa
Perda ao fogo	2,94	<10,0	NBR 12653:1992
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,94	<6,0	NBR NM 15:2012
Dióxido de silício (SiO ₂)	93,95	-	NBR 12653:1992
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,27	-	NBR 12653:1992
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,16	-	NBR 12653:1992
Óxido de cálcio (CaO)	0,74	-	NBR 12653:1992
Óxido de magnésio (MgO)	0,86	-	NBR 12653:1992
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,37	-	NBR 12653:1992
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,84	-	NBR 12653:1992
Equiv. Alcalino	0,91	-	NBR 12653:1992
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	94,38	>70,0	NBR 12653:1992

De acordo com estes resultados, a sílica ativa utilizada na fabricação dos microconcretos para esta pesquisa encontra-se dentro das especificações da norma ABNT NBR 13956:2012, sendo apta para o uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta.

3.2.3. Agregado miúdo

Para esta pesquisa é utilizada areia lavada de rio de origem local, como agregado miúdo. Esta areia é proveniente do depósito aluvial do Rio Corumbá, situado aproximadamente a 200 km de Brasília. O agregado miúdo foi escolhido buscando uma composição contínua na distribuição granulométrica, dentro dos limites da zona utilizável estabelecida na ABNT NBR 7211:2011 e atingindo as sugestões do Comitê da RILEM TC 225-SAP (MECHTCHERINE e REINHARDT, 2012). O ensaio da composição granulométrica do agregado miúdo foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília. Na Figura 3.3 são apresentados os resultados do ensaio.



Módulo de finura	2,73
Dimensão máxima característica (mm)	4,75
Massa específica (kg/dm ³)	26,455

Figura 3.3 - Caracterização do agregado miúdo.

3.2.4. Aditivo Superplastificante

Nesta pesquisa é utilizado um aditivo químico do tipo Redutor de água de grande eficiência, ou seja, um aditivo superplastificante de 3ª geração, de base química éter

policarboxilato e de pega normal (N), segundo a classificação da ABNT NBR 11768:2011. Na Tabela 3.5 são apresentadas as características físico-químicas do aditivo superplastificante, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.5 - Dados técnicos do aditivo superplastificante.

Dados Técnicos		
Teste	Especificação	Unidade
Base Química	Éter policarboxílico	-
Densidade	1,067 - 1,107	g/cm ³

Para selecionar o aditivo superplastificante utilizado na pesquisa, foi realizado um estudo piloto no microconcreto de referência com relação $a/c = 0,30$. O estudo piloto foi desenvolvido com quatro aditivos superplastificantes de 3ª geração, utilizando quatro teores diferentes em relação à massa de cimento. Foi escolhido o aditivo superplastificante com o qual o microconcreto atingiu o intervalo de espalhamento estabelecido (19 ± 1 cm) utilizando um menor teor.

3.2.5. Polímero superabsorvente (PSA)

O polímero superabsorvente utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido e fornecido pelo Prof. Ole Mejlhede Jensen da Universidade Técnica de Dinamarca (DTU). Para este polímero foram realizados os ensaios de caracterização de composição química, microscopia óptica, granulometria a laser, absorção em água e absorção em meio cimentício. (NETO; 2014 e MANZANO; 2014). Esses pesquisadores determinaram a capacidade de absorção do PSA experimentalmente, utilizando a metodologia do slump - flow, proposta por MONNIG S. (2005) fazendo alterações nos tempos de mistura e determinação do espalhamento e utilizando traços de microconcretos fabricados para esta pesquisa. O resultado deste ensaio para o PSA estudado foi de em $15 \text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{polímero}}$.

A metodologia do slump - flow, proposta por MONNIG (2005) e adaptada por NETO (2014) e MANZANO (2014), compara o espalhamento de um microconcreto contendo PSA com o espalhamento de microconcretos de referência com conteúdo de água variável. É levado em consideração que o PSA não influencia no espalhamento. Assim, quando o espalhamento obtido para o traço com PSA estivesse próximo ao obtido para um traço de referência pode ser considerado que esses dois traços tenham a mesma quantidade de água,

sendo possível estimar a quantidade de água que foi absorvida pelo polímero. Na Figura 3.4 são apresentados os resultados do ensaio de absorção.

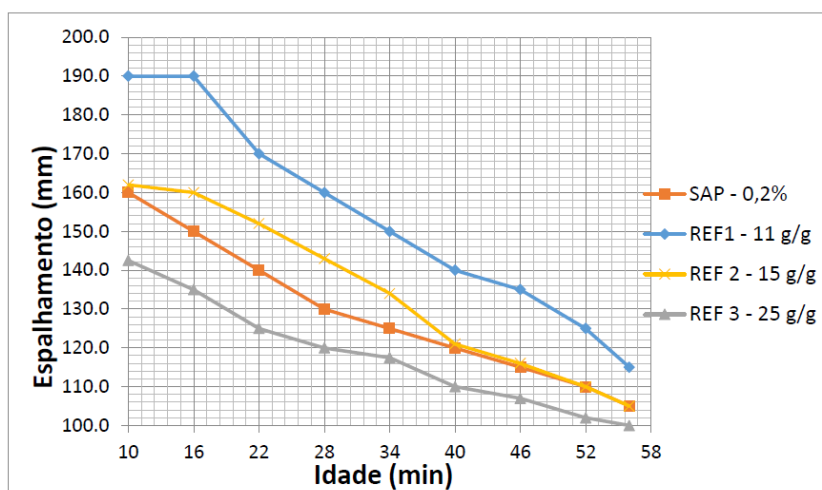


Figura 3.4 - Resultados do ensaio de absorção do PSA.

Para este ensaio foi utilizado o microconcreto com relação $a/c = 0,30$ e 0,2% de PSA em relação à massa de cimento e três microconcretos de referência com relação $a/c = 0,30$, modificando em cada um a quantidade de água, buscando igualar o espalhamento da mistura com 0,2% de PSA. A comparação de valores de espalhamento do microconcreto com PSA e os de referência foi realizada na idade mais avançada, sendo para este ensaio 56 minutos após a adição da água na mistura e seguindo a metodologia proposta por MONNIG (2005) e ASSMANN (2013), pois é considerado que nessa idade o PSA já terá alcançado seu inchamento de equilíbrio. A capacidade de absorção do PSA foi determinada como a diferença na quantidade de água do microconcreto que apresentou o espalhamento mais próximo da mistura com 0,2% de PSA, comparada com a dosagem original do microconcreto de referência com relação $a/c = 0,30$. Na Tabela 3.6 são apresentados os ensaios de caracterização do PSA (NETO; 2014).

Tabela 3.6 - Caracterização do PSA (NETO; 2014).

Característica	Metodologia	Resultado
Massa específica	Analisador automático de densidade	1456 g/ml
Formato das partículas	Microscopia óptica	Formato esférico
d50	Granulometria a laser	66,28 um
Absorção em meio cimentício	Espalhamento de argamassa	15 g/g

A massa específica do PSA utilizado nesta pesquisa foi determinada em 1,456 g/ml, utilizando um analisador automático de densidade. Este ensaio é de aplicação simples para a caracterização de polímeros superabsorventes para uso em meios cimentícios (NETO; 2014). Na Figura 3.5 é apresentada a distribuição granulométrica do PSA e na Figura 3.6 é apresentada uma imagem do PSA obtida por microscopia óptica, NETO (2014).

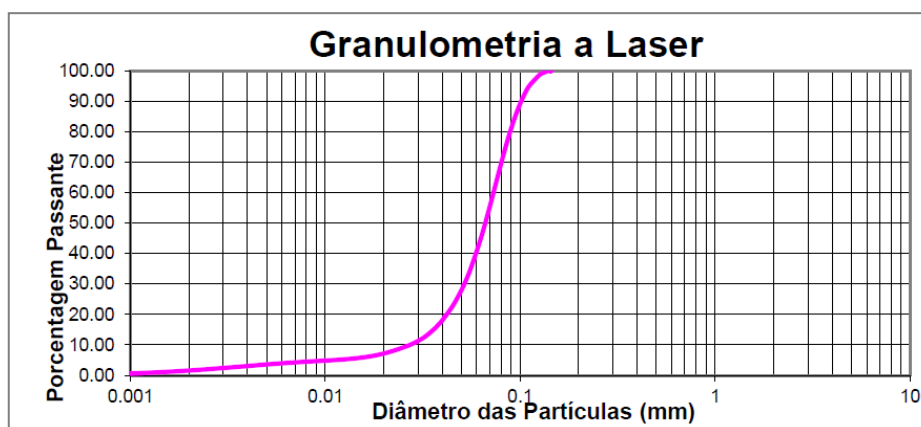


Figura 3.5 - Distribuição granulométrica do PSA (NETO; 2014).

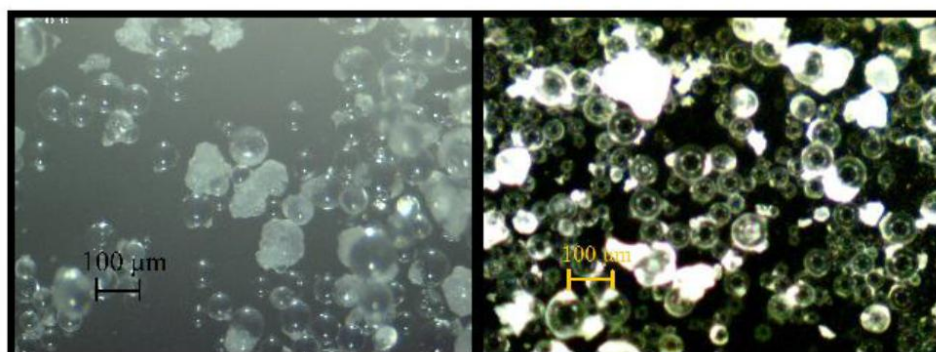


Figura 3.6 - Imagem do PSA obtida por microscopia óptica, (NETO; 2014).

3.3. COMPOSIÇÃO DOS MICROCONCRETOS

3.3.1. Microconcretos de referência.

Os traços dos microconcretos utilizados nesta pesquisa foram ajustados a partir do traço de referência com relação $a/c = 0,30$ proposto pelo comitê da RILEM TC 225 - SAP para realizar ensaios interlaboratoriais (MECHTCHERINE et al. 2014). Para ajustar os traços de referência com relações $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$, foi calculada a quantidade de água necessária para essas relações a/c . Depois foram somados os volumes dos materiais do traço para calcular um fator que relaciona o volume teórico do traço de 1 m^3 com o valor

encontrado na somatória. O volume de cada material foi multiplicado pelo fator de correção calculado. Depois foi utilizada a massa específica de cada material para calcular seu teor em kg por 1 m³ de microconcreto. Na Tabela 3.7 e na Figura 3.7 são apresentadas as dosagens para 1 m³ dos microconcretos de referência com relações a/c= 0,30, a/c= 0,35 e a/c= 0,40, e o roteiro para mistura dos microconcretos, respectivamente.

Tabela 3.7 - Composição dos microconcretos de referência.

Materiais (kg/m ³)	REF a/c= 0,30	REF a/c= 0,35	REF a/c= 0,40
Cimento CPV ARI	700	675	654
Sílica ativa	70	67	65
Aditivo superplastificante	18,2	12,5	8,5
Areia lavada de rio	1340	1306	1298
Água	210	236	228

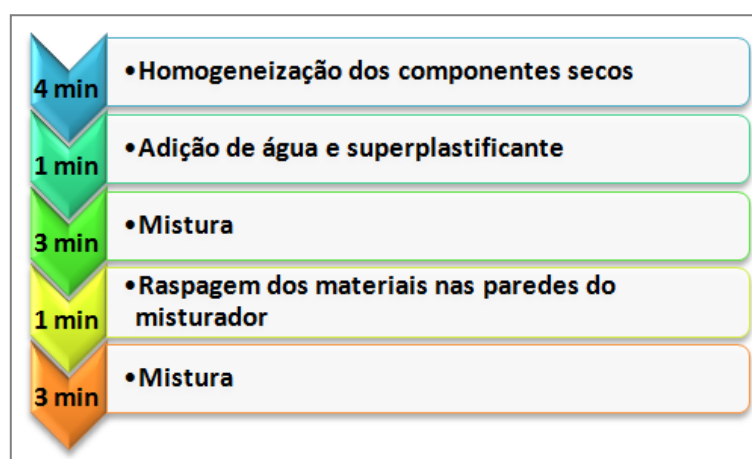


Figura 3.7 - Roteiro para mistura dos microconcretos

Os microconcretos para os ensaios de retração autógena e propriedades mecânicas foram fabricados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília, utilizando uma betoneira de eixo vertical, com capacidade para 100 litros. Todos os traços foram feitos no início do dia para minimizar efeitos de temperatura. Os microconcretos para o ensaio do pulso ultrassônico foram fabricados nos laboratórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia, utilizando uma betoneira de eixo inclinado com capacidade para 320 litros.

3.3.2. Microconcretos com adição de polímeros superabsorventes.

Os traços dos microconcretos com relação a/c= 0,30 e adições de PSA de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento, foram ajustados a partir do traço de referência com

relação $a/c = 0,30$, mantendo as mesmas quantidades de materiais, adicionando a quantidade de PSA e a água de cura interna necessária de acordo com a absorção do PSA, determinada experimentalmente em $15g_{\text{água}}/g_{\text{polímero}}$. Somente foi modificado o teor de aditivo superplastificante, que aumentou proporcionalmente com o teor de PSA, com a finalidade de atingir o intervalo de espalhamento de 19 ± 1 cm com cone DIN, que foi fixado como premissa da pesquisa. Na Tabela 3.8 é apresentada a composição dos microconcretos com adição de PSA.

Tabela 3.8 - Composição e nomenclatura dos microconcretos estudados.

Materiais (kg/m³)	a/c = 0,30 REF	a/c = 0,30 PSA 0,1%	a/c = 0,30 PSA 0,2%	a/c = 0,30 PSA 0,3%	a/c = 0,35 REF	a/c = 0,35 PSA 0,2%	a/c = 0,40 REF	a/c = 0,40 PSA 0,2%
Cimento	700	700	700	700	676	676	654	654
Sílica ativa	70	70	70	70	68	68	65	65
Aditivo SP	18,2	19,6	21,0	22,4	11,2	12,5	8,5	8,8
Teor SP %	2,6%	2,8%	3,0%	3,2%	1,65%	1,85%	1,30%	1,35%
Areia	1340	1340	1340	1340	1307	1307	1298	1298
Água	210	210	210	210	237	237	228	228
Água Cura I.	-	10,50	21,00	31,50	-	20,27	-	19,63
a/c Cura I.		0,02	0,03	0,05		0,03		0,03
PSA	-	0,70	1,40	2,10	-	1,35	-	1,31

O PSA foi adicionado seco e misturado junto com o cimento, a sílica ativa e a areia, posteriormente foi adicionada a água misturada com o aditivo superplastificante, mantendo o mesmo roteiro de mistura dos microconcretos de referência.

3.4. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

3.4.1. Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.

Os corpos de prova prismáticos de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm para o ensaio de retração autógena e os corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm para os ensaios de resistência à compressão, foram moldados em duas camadas iguais e adensados em mesa vibratória durante 5 segundos para cada camada. Os corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm para os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, foram moldados utilizando uma mesa de adensamento e segundo as prescrições da norma ABNT NBR 13279:2005. Todos os corpos de prova foram protegidos com filme PVC após a moldagem, foram desmoldados no dia seguinte e levados para câmara úmida até atingir a idade para os ensaios (7 e 28 dias), à exceção dos corpos de prova prismáticos para o

ensaio de retração autógena, que foram mantidos na forma, selados com filme PVC e fita adesiva e levados para sala climatizada durante 28 dias.

3.4.2. Ensaio no estado fresco

3.4.2.1. Determinação do espalhamento pelo tronco de cone.

Para determinar o espalhamento dos microconcretos foi utilizado o método do tronco de cone de acordo com a norma DIN 18555-2, com cone de HAGERMANN (Figura 3.8) e sem aplicação de golpes na mesa de consistência, atingindo a especificação dos ensaios interlaboratoriais do comitê da RILEM TC 225- SAP (MECHTCHERINE e REINHARDT 2012). O tronco de cone de aço inoxidável de 60 mm de altura, raios internos, inferior e superior, de 100 mm e 70 mm, respectivamente, e a base onde é realizado o ensaio, são limpos com pano úmido. Em seguida, o tronco de cone é preenchido com microconcreto em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, aplicando 10 golpes com soquete normal e homogeneamente distribuídos em cada camada. É feito o rasamento do topo do tronco de cone, utilizando uma espátula, e depois de aproximadamente 15 segundos, é levantado lentamente para fazer a leitura do espalhamento. Para fazer uma comparação dos resultados, também foi realizado o ensaio de espalhamento de acordo com a norma ABNT NBR 13276:2005, sem aplicação de golpes na mesa de consistência.



Figura 3.8 - Determinação do espalhamento com cone de HAGERMANN.

3.4.2.2. Determinação da densidade no estado fresco.

A determinação da densidade no estado fresco dos microconcretos é realizada de acordo com a NBR 13278:2005 e consiste na relação entre a massa do microconcreto e o volume necessário para preencher um recipiente de volume conhecido (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Determinação da densidade no estado fresco.

3.4.2.3. Penetração de cone

Este ensaio é realizado de acordo com a norma ASTM C780:2014. Um recipiente cilíndrico é preenchido com microconcreto em três camadas iguais, aplicando 25 golpes com espátula em cada camada. Logo após, é feito o rasamento do topo do recipiente e colocado no aparelho do ensaio, fazendo coincidir o eixo do recipiente cilíndrico com a ponta do cone. O indicador do aparelho é colocado em zero e depois, o cone é liberado em queda livre (Figura 3.10). A leitura é feita aproximadamente 10 segundos depois da queda.



Figura 3.10 - Ensaio de penetração de cone

3.4.2.4. Teor de ar aprisionado

Este ensaio é realizado pelo método pressométrico, de acordo com a norma ABNT NBR NM 47:2002. O recipiente cilíndrico é preenchido com microconcreto em três camadas iguais, fazendo o adensamento de cada camada. Logo após, o equipamento é fechado

hermeticamente, são fechadas as chaves localizadas na tampa e é aberta a válvula de ar principal. Finalmente é feito um batimento no manômetro para estabilizar a pressão e é realizada a leitura da percentagem de ar.

3.4.2.5. Determinação do tempo zero utilizando o método do pulso ultrassônico.

A determinação experimental da transição suspensão - sólido, ou tempo zero, é realizada de acordo com a metodologia proposta por SILVA (2007), utilizando também como referência a norma ABNT NBR 8802:2013, com corpos de prova prismáticos de 150x150x300 mm, segundo o intervalo proposto pela RILEM NDT 1 (1972) e a ABNT NM 58:1996. Esta metodologia tem sido utilizada em pesquisas anteriores, realizadas sob orientação da professora Eugênia Fonseca da Silva, tais como REGO e AKITAYA (2011), PEREIRA e MATOS (2011), CLARO e SARAIVA (2012), ORDÓÑEZ (2013), TRALDI e AGUIRRE (2013) e MORAES e CERQUEIRA (2014), comprovando a eficácia dessa técnica para determinar o tempo zero do microconcreto (transição suspensão-sólido). O ensaio consiste na determinação do tempo de propagação de uma onda emitida pelo aparelho de ultrassom, que passa através do corpo de prova, por meio de transdutores-receptores acoplados nas extremidades do molde retangular (Figura 3.11)

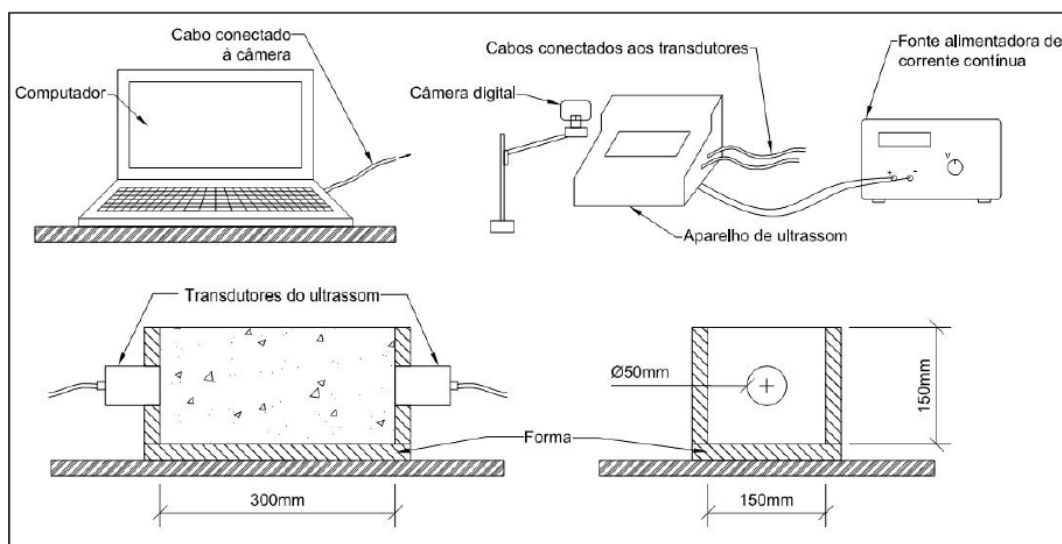


Figura 3.11 – Esquema da determinação experimental do tempo zero pelo ensaio do pulso ultrassônico. (SILVA et. al. 2011b)

Com a leitura do tempo que a onda tarda em propagar-se pelo corpo de prova, pode ser obtida a velocidade de propagação, dividindo o comprimento do corpo de prova pelo tempo de propagação da onda. A determinação experimental da transição suspensão - sólido foi realizada nos laboratórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de

Goiânia. Na Figura 3.12 é apresentada a determinação experimental do tempo zero pelo ensaio do pulso ultrassônico.



Figura 3.12 – Moldagem do corpo de prova e determinação experimental do tempo zero pelo ensaio do pulso ultrassônico.

3.4.3. Ensaio no estado endurecido

3.4.3.1. Determinação da retração autógena com extensômetro.

Para esta pesquisa é utilizada a metodologia proposta por SILVA (2007), a partir dos procedimentos estabelecidos por TAZAWA (1999). Para cada um dos traços são moldados 3 corpos de prova prismáticos de 75x75x285 mm. São utilizadas formas metálicas forradas com material antiaderente em suas fases internas (folha de poliestireno) para permitir a livre movimentação do microconcreto, diminuindo o atrito do corpo de prova com a forma. São inseridos dois pinos metálicos, um em cada extremidade das placas laterais de cada corpo de prova e coincidem com o eixo longitudinal do molde. Antes de preencher cada forma metálica com o microconcreto, deve ser medida com paquímetro digital a distância interna entre as extremidades dos pinos.

As três formas são preenchidas em duas camadas, adensadas com mesa vibratória três vezes durante 5 segundos e utilizando microconcreto proveniente da mesma betonada, mas

tomando cuidado para não mudar a posição dos pinos. Subsequentemente os três corpos de prova são envoltos com filme plástico e reforço nas bordas com fita adesiva para evitar a perda de água e colocados sobre uma placa metálica, disposta sobre uma bancada com borracha e situada numa sala climatizada com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $48 \pm 2\%$ para iniciar a determinação das variações de comprimento dos corpos de prova. (Figuras 3.13 e 3.14)



Figura 3.13 - Determinação experimental da retração autógena.

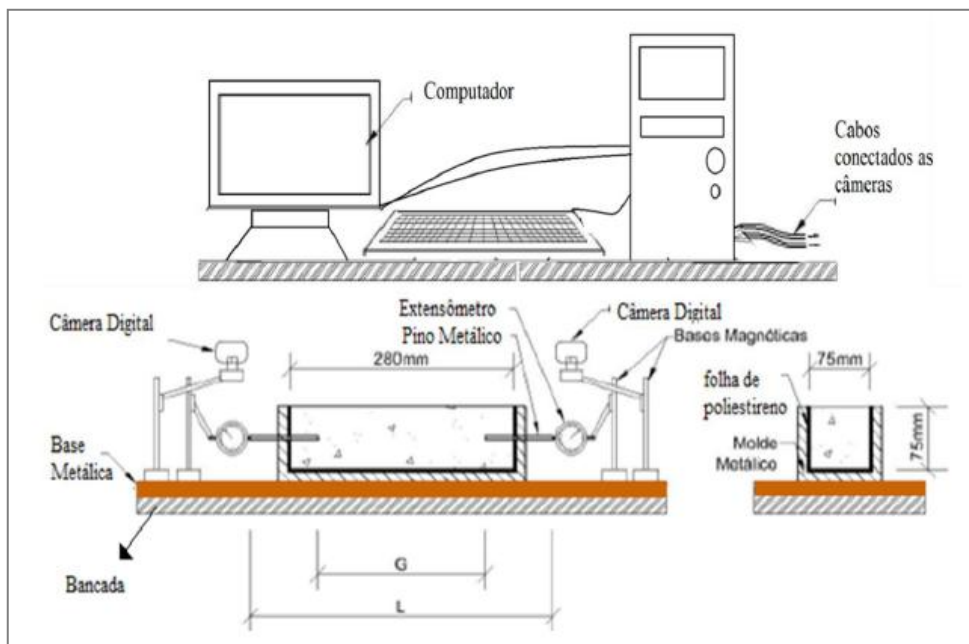


Figura 3.14 – Esquema da determinação experimental da retração autógena (SILVA, 2007).

Para cada corpo de prova são colocados dois extensômetros acoplados aos pinos metálicos e fixados sobre a placa metálica utilizando bases metálicas, para iniciar as leituras no tempo zero determinado com a técnica do ultrassom. Antes de posicionar os extensômetros

devem ser removidas as porcas das fases externas das formas, para permitir a livre movimentação dos pinos metálicos. São realizadas leituras dos extensômetros iniciando no tempo zero e até a idade de 28 dias, utilizando câmeras digitais e o software Yawcam[®] para registrar as leituras. Este software permite capturar imagens automaticamente em intervalos de tempo programáveis e utilizando várias câmeras simultaneamente.

3.4.3.2. Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão (Figura 3.15) foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília, utilizando corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm e de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2005. Os corpos de prova foram moldados em duas camadas, com 30 golpes na mesa de adensamento para cada camada. Depois foi feito o rasamento do topo do molde e protegido com filme PVC. No dia seguinte, os corpos de prova foram desmoldados e levados para câmara úmida até atingir a idade para o ensaio (7 e 28 dias).



Figura 3.15 - Ensaio de resistência à tração na flexão.

3.4.3.3. Resistência à compressão em cubos

Este ensaio foi realizado utilizando as duas metades de cada corpo de prova prismático de 4x4x16 cm, utilizado no ensaio de resistência à tração na flexão. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2005. Para que os corpos de prova recebessem carga axial na prensa, foram utilizadas duas seções de aço de 4 cm x 4 cm (Figura 3.16). Para cada traço de microconcreto foram ensaiadas 12 metades (cubos), aos 7 dias de idade e 12, aos 28 dias de idade, para um total de 24 resultados por cada microconcreto (duas metades por cada corpo de prova).



Figura 3.16 - Ensaio de resistência à compressão em cubos.

3.4.3.4. Resistência à compressão em cilindros

Para este ensaio foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm e foi realizado de acordo com as normas ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007. Os cilindros foram moldados como descrito no item 3.4.1, desmoldados no dia seguinte e levados para câmara úmida até atingir a idade para o ensaio (7 e 28 dias). Para cada um dos microconcretos foram moldados seis cilindros para ensaiar aos 7 dias de idade e seis cilindros para ensaiar aos 28 dias de idade, para um total de 12 corpos de prova por cada traço de microconcreto. Antes do ensaio foi feita a retificação da base e do topo dos cilindros. Para o ensaio de resistência à compressão foi utilizada uma prensa marca Dinateste com capacidade de 100 toneladas (Figura 3.17) e foi utilizada uma célula de carga com indicação digital para a determinação da força aplicada.

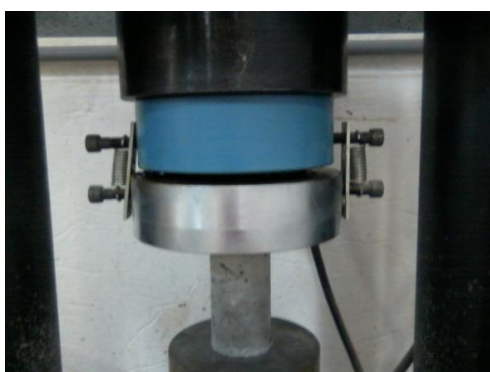


Figura 3.17 - Ensaio de resistência à compressão em cilindros (50 mm x 100 mm).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados na pesquisa, na seguinte ordem: ensaios no estado fresco e ensaios no estado endurecido. Os ensaios no estado fresco são: espalhamento, teor de ar aprisionado, densidade de massa e tempo zero, e os ensaios no estado endurecido são: retração autógena, resistência à tração na flexão, resistência à compressão em cubos e resistência à compressão em cilindros. Para cada ensaio é realizada a análise de resultados sobre o teor de PSA, feita para os microconcretos com relação $a/c = 0,30$, onde foram estudados três teores diferentes de PSA (0,1%, 0,2% e 0,3%) e a análise da influência da relação a/c feita para as relações $a/c = 0,30$, $0,35$ e $0,40$, tanto para misturas sem PSA como para misturas com teor fixo de 0,2% de PSA. Este teor foi escolhido por apresentar melhor desempenho na redução da retração autógena, sem prejuízo expressivo nas propriedades mecânicas dos microconcretos. As avaliações foram realizadas em oito microconcretos.

4.1. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.1.1. Determinação do espalhamento pelo tronco de cone

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados dos ensaios de espalhamento realizados de acordo com as normas DIN 18555-2 e ABNT NBR 13276:2005, respectivamente e de penetração de cone realizados de acordo com a norma ASTM C780:2014. Os ensaios foram feitos imediatamente depois do término da mistura. Foi premissa da pesquisa fixar o espalhamento no intervalo de 190 ± 10 mm, determinado de acordo com a norma DIN para todos os microconcretos estudados.

Tabela 4.1- Resultados dos ensaios de espalhamento e penetração de cone.

	a/c = 0,30 REF	a/c = 0,30 PSA 0,1%	a/c = 0,30 PSA 0,2%	a/c = 0,30 PSA 0,3%	a/c = 0,35 REF	a/c = 0,35 PSA 0,2%	a/c = 0,40 REF	a/c = 0,40 PSA 0,2%
Espalh. DIN 18555-2 (mm)	193,0	195,0	193,0	192,0	183,0	183,0	200,0	197,0
Espalh. ABNT NBR 13276:2005 (mm)	233,0	227,0	225,0	220,0	220,0	220,0	240,0	215,0
P. de Cone ASTM C780:2014 (mm)	83,0	84,0	83,0	80,0	83,0	81,0	84,0	83,0

Os espalhamentos dos microconcretos fabricados nesta pesquisa encontraram-se dentro do intervalo estabelecido (190 ± 10 mm) para a metodologia da Norma DIN 18555-2. O intervalo de espalhamento equivalente foi de 230 ± 10 mm para a metodologia da norma ABNT NBR 13276:2005.

Nos microconcretos contendo polímeros superabsorventes, foi necessário ajustar a quantidade de aditivo superplastificante, com a finalidade de atingir o intervalo de espalhamento estabelecido na pesquisa, como apresentado no item 3.3.2. Esperava-se que, com a água de cura interna adicionada aos microconcretos contendo PSA, seria suficiente para alcançar o espalhamento especificado. Tal fato parece corroborar que o PSA tem influência na reologia dos microconcretos. Este assunto é objeto de estudo de uma tese de doutorado em andamento (MANZANO, 2014).

4.1.2. Penetração de cone

Como esperado e em virtude de ter fixado o espalhamento, os resultados do ensaio de penetração de cone, situaram-se no intervalo de 82 ± 2 mm (Tabela 4.1). Como não se tem uma referência normativa para classificar os resultados do ensaio de penetração de cone em microconcretos de alta resistência, foi adotada a classificação proposta por ANGELIM (2000). Ele realizou uma classificação de argamassas na qual estabeleceu um limite de 69 mm como valor máximo no ensaio de penetração de cone para argamassas muito fluidas. Assim, os microconcretos fabricados para esta pesquisa podem ser classificados como muito fluidos já que ultrapassaram o limite de 69 mm, estabelecido por ANGELIM (2000).

TRALDI e AGUIRRE (2013) obtiveram valores de 67 mm e 70 mm para o microconcreto de referência com relação $a/c = 0,30$ e com adição de 0,3% de PSA, respectivamente, no ensaio de penetração de cone. O intervalo de resultados obtidos nesta pesquisa foi maior. Destaca-se que nas duas pesquisas foram utilizados aditivos superplastificantes diferentes e materiais similares, mas de diferente lote.

4.1.3. Teor de ar aprisionado

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados do ensaio de teor de ar aprisionado, realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 47:2002, para os oito microconcretos estudados.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de Teor de ar aprisionado (%).

a/c = 0,30 REF	a/c = 0,30 PSA 0,1%	a/c = 0,30 PSA 0,2%	a/c = 0,30 PSA 0,3%	a/c = 0,35 REF	a/c = 0,35 PSA 0,2%	a/c = 0,40 REF	a/c = 0,40 PSA 0,2%
1,7	2,3	2,4	2,9	1,6	2,7	1,6	2,9

4.1.3.1. Influência do teor de PSA.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados do ensaio de teor de ar aprisionado.

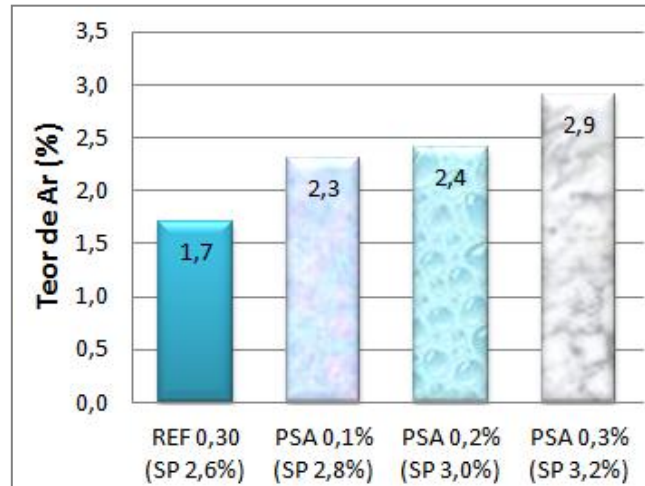


Figura 4.1- Resultados do ensaio de teor de ar aprisionado (%).

Comparando os microconcretos contendo PSA com a mistura de referência, observou-se que a adição do PSA provocou um incremento expressivo no teor de ar aprisionado de até 40%, levando a crer que o PSA tem influência no teor de ar aprisionado, tendo em vista que o teor de aditivo superplastificante não permaneceu fixo, para atender o espalhamento especificado. Esse assunto está sendo investigado em duas pesquisas em andamento no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil.

LAUSTSEN et. al. (2008), concluíram que as misturas de concreto contendo tipos específicos de PSA, apresentaram vantagens do uso dos PSAs sobre os químicos incorporadores de ar tradicionais, como estabilidade do sistema de vazios de ar e controle, tanto da quantidade de ar incorporado, como do tamanho dos vazios de ar. Esses pesquisadores proporcionam informação valiosa sobre o uso potencial do PSA como aditivo incorporador de ar para melhorar o comportamento do concreto nos ciclos de gelo-degelo.

4.1.3.2. Influência da relação a/c.

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados do ensaio de teor de ar aprisionado e o respectivo teor de aditivo superplastificante dos microconcretos de referência e contendo 0,2% de PSA, para relações a/c= 0,30, a/c= 0,35 e a/c= 0,40.

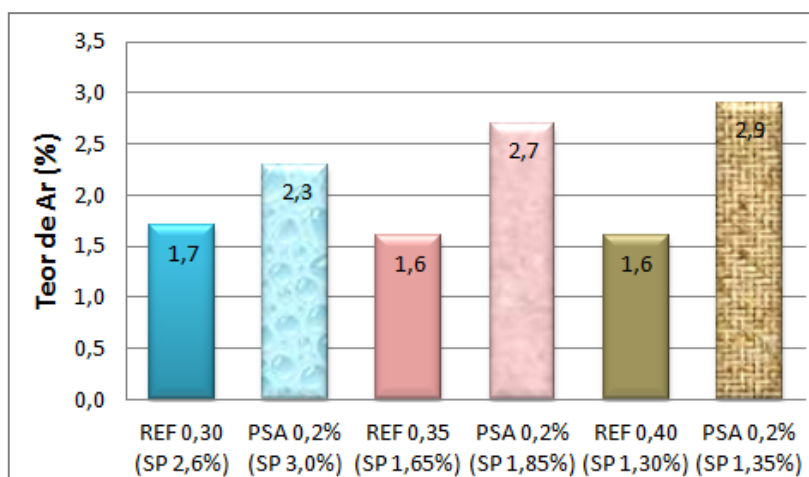


Figura 4.2 - Resultados do ensaio de teor de ar aprisionado.

Analisando os resultados dos microconcretos de referência, ou seja, sem adição de PSA, observou-se que o teor de ar aprisionado foi muito próximo, apesar do teor do aditivo superplastificante não ter se mantido constante. No traço com a/c= 0,30, o teor do aditivo superplastificante foi maior do que nos demais traços de referência, no entanto, o teor de ar aprisionado não foi superior, mostrando que o aditivo superplastificante não teve efeito nessa propriedade, pelo menos no intervalo de dosagem de aditivo estudado.

Comparando-se cada microconcreto de referência com seu respectivo traço contendo PSA (no teor de 0,2%), observou-se que a adição do polímero superabsorvente incrementou o teor de ar aprisionado para todas as relações a/c estudadas, mesma conclusão obtida no item 4.1.3.1. Também foi observado que, à medida que se eleva a relação a/c, o teor de ar aprisionado é aumentado nos microconcretos contendo PSA. Entretanto, nas misturas de referência, ou seja, sem PSA, o teor de ar aprisionado permaneceu praticamente constante, revelando que o aumento no teor de ar nas misturas contendo PSA, para diferentes relações a/c, foi provocado pela adição do polímero superabsorvente.

Esse comportamento está de acordo com o obtido por MECHTCHERINE et al. (2014). Os resultados do ensaio de teor de ar aprisionado foram 2,8% para a mistura de referência com

relação $a/c = 0,30$ e 3,2% para a mistura com adição de 0,3% de PSA. Embora, o resultado obtido nesta pesquisa para o microconcreto de referência tenha sido inferior (1,7%) o resultado para a mistura com 0,3% de PSA foi próximo ao obtido por esses pesquisadores (2,9%). Nas duas pesquisas foi observado um aumento no teor de ar aprisionado com a adição de PSA. De acordo com esses resultados, talvez o PSA possa ser utilizado como aditivo incorporador de ar para melhorar o comportamento do concreto nos ciclos de gelo-degelo.

4.1.4. Determinação da densidade de massa no estado fresco.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados do ensaio de densidade no estado fresco realizado de acordo com a NBR 13278:2005 para os oito microconcretos estudados.

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de densidade no estado fresco (g/ml).

a/c = 0,30	a/c = 0,30	a/c = 0,30	a/c = 0,30	a/c = 0,35	a/c = 0,35	a/c = 0,40	a/c = 0,40
REF	PSA 0,1%	PSA 0,2%	PSA 0,3%	REF	PSA 0,2%	REF	PSA 0,2%
2,32	2,27	2,26	2,24	2,32	2,22	2,27	2,20

4.1.4.1. Influência do teor de PSA.

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados do ensaio de densidade no estado fresco dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$, de referência e com adição de polímeros superabsorventes nos teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento.

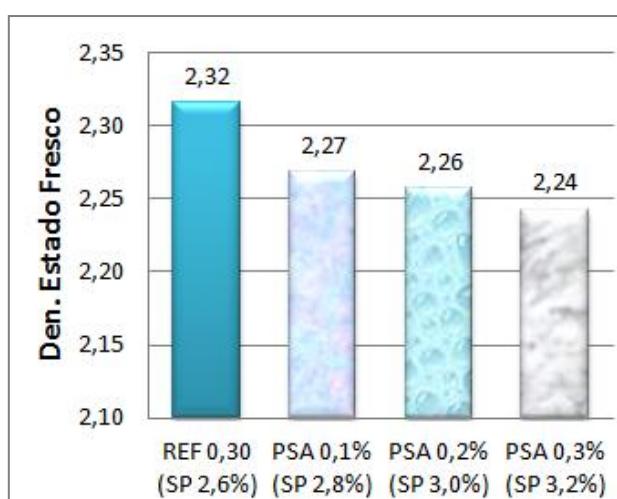


Figura 4.3 - Resultados do ensaio de densidade no estado fresco.

Foi observada uma diminuição na densidade no estado fresco dos microconcretos com o aumento da adição de polímeros superabsorventes, comparados com o microconcreto de referência. Para o maior teor de PSA foi obtida a menor densidade no estado fresco, demonstrando que essa diminuição é proporcional ao teor de PSA utilizado. Este comportamento pode ser explicado pelo maior teor de ar aprisionado e a adição da água para cura interna nos microconcretos contendo PSA, em comparação com o microconcreto de referência.

4.1.4.2. Influência da relação a/c.

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados do ensaio de densidade no estado fresco para os microconcretos de referência e contendo 0,2% de PSA, para relações a/c= 0,30, a/c=0,35 e a/c= 0,40.

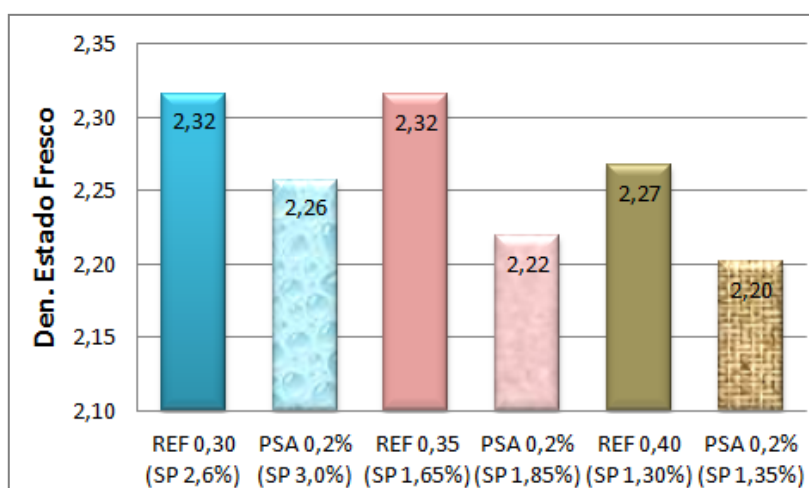


Figura 4.4 - Resultados do ensaio de densidade no estado fresco.

Analisando os resultados dos microconcretos de referência, ou seja, sem adição de PSA, foi observado que, o microconcreto com maior relação água/cimento, por ter menor quantidade de materiais secos na mistura, apresentou menor densidade no estado fresco que os outros microconcretos estudados. Entretanto os resultados deste ensaio dos microconcretos com relações a/c= 0,30 e a/c= 0,35 foram iguais.

Comparando-se cada microconcreto de referência com seu respectivo traço contendo PSA (no teor de 0,2%), observou-se que para todas as relações água/cimento houve um decréscimo na densidade no estado fresco dos microconcretos contendo polímeros

superabsorventes. Isso pode ter acontecido devido à maior quantidade de vazios provocada pela adição de PSA e da água de cura interna.

Os resultados obtidos por TRALDI e AGUIRRE (2013) no ensaio de densidade no estado fresco foram 2,29 g/ml e 2,04 g/ml nos traços com relação a/c= 0,30, de referência e com adição de 0,3% de PSA, respectivamente. Em pesquisa desenvolvida por MECHTCHERINE et al. (2014) foram obtidos valores de densidade no estado fresco de 2,33 g/ml para o microconcreto de referência com relação a/c= 0,30, e 2,31 g/ml para o microconcreto com 0,3% de PSA. Os resultados obtidos nesta pesquisa para o mesmo ensaio foram 2,32 g/ml no microconcreto de referência com relação a/c= 0,30 e 2,24 g/ml no traço com 0,3% de PSA. Estes valores estão próximos aos obtidos por MECHTCHERINE et al. (2014), mostrando o mesmo comportamento de diminuição na densidade no estado fresco dos microconcretos com a adição de PSA.

4.1.5. Determinação do tempo zero utilizando o método do pulso ultrassônico.

O ensaio para a determinação da transição suspensão - sólido ou tempo zero dos microconcretos, utilizando a técnica do pulso ultrassônico, iniciou-se após a moldagem do corpo de prova e a conexão dos transdutores do aparelho de ultrassom nas extremidades do molde. Foi medida a velocidade das ondas ultrassônicas através do microconcreto, em intervalos de propagação da onda de 3 minutos. Com os resultados obtidos, foi traçado o gráfico de velocidade x tempo para cada microconcreto, considerando um período de 48 horas.

O tempo decorrido desde a adição da água na mistura até o início da aquisição dos dados foi de aproximadamente 1 hora. Este tempo foi adicionado ao tempo zero determinado no ensaio de ultrassom.

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados da determinação da transição suspensão - sólido dos oito microconcretos de alta resistência, fabricados para esta pesquisa. O tempo zero é utilizado para balizar o início da determinação experimental da retração autógena, SILVA (2007). Nota-se que o método de propagação da onda ultrassônica é bastante adequado para a determinação do tempo zero. O ponto de elevação brusca da velocidade de propagação da onda é bem perceptível na curva de velocidade x tempo.

Tabela 4.4 - Resultados da determinação do tempo zero dos microconcretos.

a/c = 0,30 REF	a/c = 0,30 PSA 0,1%	a/c = 0,30 PSA 0,2%	a/c = 0,30 PSA 0,3%	a/c = 0,35 REF	a/c = 0,35 PSA 0,2%	a/c = 0,40 REF	a/c = 0,40 PSA 0,2%
7h 55min	8h 20min	8h 10min	8h 50min	5h 30min	6h 5min	5h 20min	6h 25min

4.1.5.1. Influência do teor de PSA.

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados da determinação da transição suspensão-sólido ou tempo zero dos microconcretos com relação $a/c=0,30$, de referência e com adição de polímeros superabsorventes nos teores de 0,1%, 0,2% e 0,3%, em relação à massa de cimento.

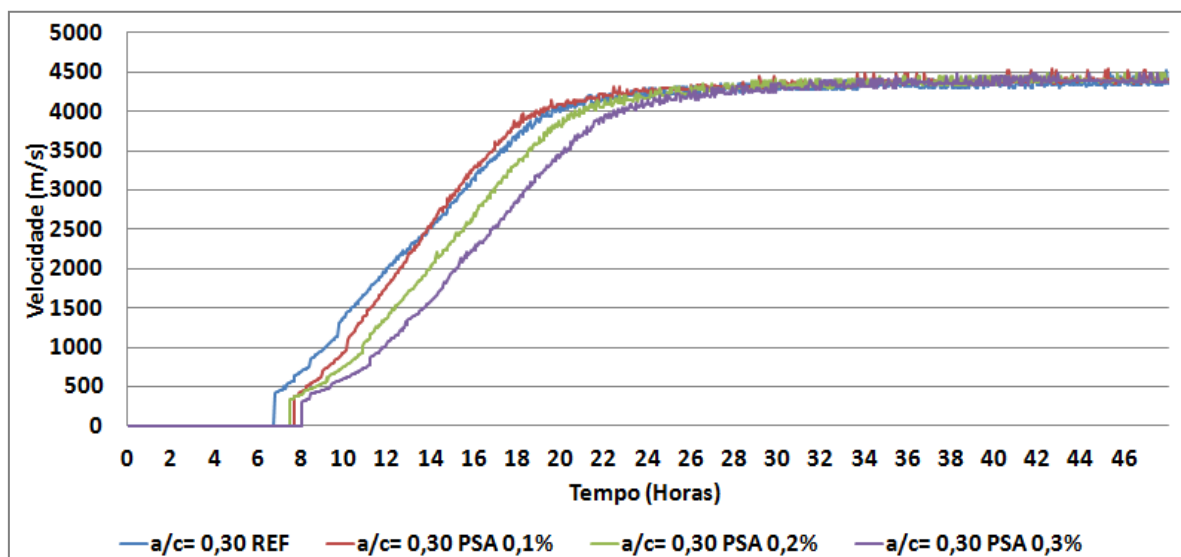


Figura 4.5 - Tempo zero dos microconcretos com relação $a/c=0,30$.

Nesta Figura, observa-se que o comportamento das curvas de propagação da onda ultrassônica dos quatro microconcretos com relação $a/c=0,30$ foi bastante próximo, em consonância com a cinética da curva padrão. Comparando os traços contendo PSA com a mistura de referência, houve um retardo no tempo zero. Uma explicação provável para este comportamento é a maior quantidade de vazios nos microconcretos contendo PSA, que pode retardar a propagação da onda ultrassônica. Estudos de microestrutura podem ajudar a explicar esse comportamento.

Comparando-se os traços contendo PSA entre eles, observou-se que os resultados dos tempos zero foram muito próximos, com tendência de retardamento no tempo zero com o aumento do conteúdo de PSA. Isso revela que, embora a presença de PSA eleve o tempo

zero, o acréscimo do conteúdo de PSA de um traço para outro foi pequeno a ponto de não alterar expressivamente a transição suspensão - sólido (55 minutos no máximo).

ORDOÑEZ (2013) explica que o aumento do tempo zero com a elevação do teor de PSA é devido ao incremento de água para cura interna no microconcreto, ocasionando maior dispersão das partículas floculadas de cimento e melhor lubrificação da pasta e afastando as partículas de cimento entre elas. O PSA altera a relação a/c efetiva, no estágio inicial da hidratação, posteriormente, libera a água absorvida, afetando ainda a hidratação, nos primeiros dias de idade do concreto (MECHTCHERINE e REINHARDT; 2012).

4.1.5.2. Influência da relação a/c .

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados da determinação da transição suspensão - sólido ou tempo zero dos microconcretos de referência e com adição de 0,2% de PSA, para relações $a/c=0,30$, $a/c=0,35$ e $a/c=0,40$.

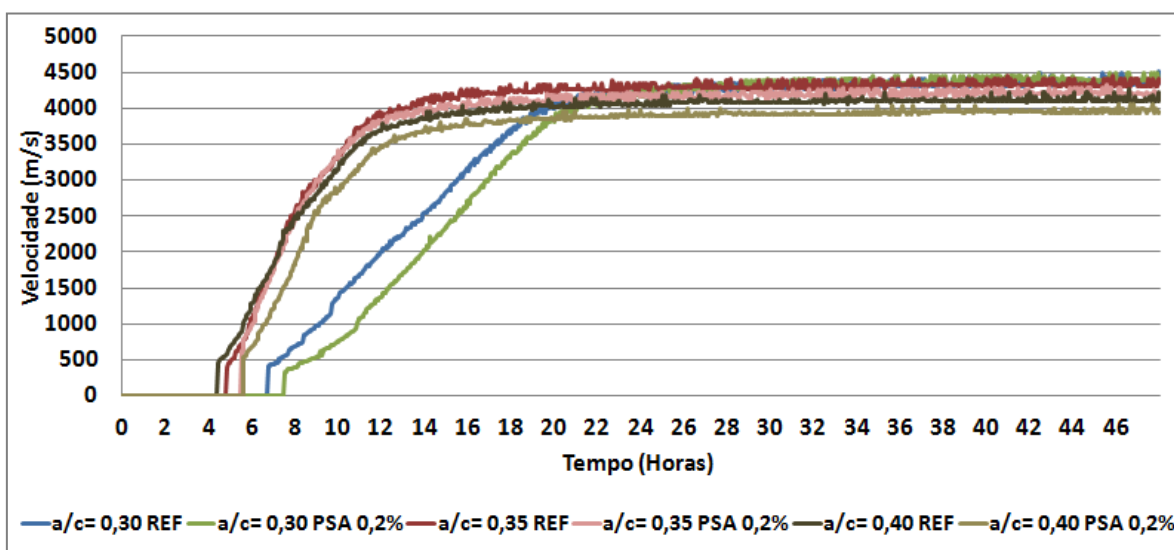


Figura 4.6 - Resultados da determinação da transição suspensão- sólido ou tempo zero dos microconcretos com relações $a/c=0,30$, $a/c=0,35$ e $a/c=0,40$.

Analisando os resultados dos microconcretos de referência, ou seja, sem adição de PSA, (Tabela 4.4) observou-se que, quanto maior foi a relação água/cimento, menor foi o tempo zero dos microconcretos estudados. Esperava-se um comportamento inverso, já que uma relação água/cimento maior representa maior quantidade de água livre na mistura, dificultando a aglomeração das partículas de cimento e aumentando o tempo de pega dos microconcretos, em condições normais. No entanto, para esta pesquisa, pode ser considerado como determinante deste comportamento o teor de aditivo superplastificante

que, mesmo sendo de pega normal, teve um efeito retardador de pega nos microconcretos estudados, principalmente naquele com menor relação água/cimento ($a/c= 0,30$), em função de sua elevada dosagem. Destaca-se que nesta pesquisa foi utilizada uma dosagem acima da recomendada pelo fabricante, com a finalidade de atingir o intervalo de espalhamento, fixado como premissa desta pesquisa. Talvez essa elevada dosagem de aditivo superplastificante influenciou o processo de hidratação dos microconcretos, retardando o tempo zero em aquelas misturas com maior teor de aditivo.

Analisando a fase três de comportamento das curvas de propagação do pulso ultrassônico (Figura 4.6), nota-se que aquela correspondente ao microconcreto de referência com relação $a/c= 0,30$ apresenta uma inclinação menos acentuada em relação às curvas dos outros microconcretos de referência, levando um tempo maior para atingir a sua velocidade máxima estabilizada. Este comportamento parece estar relacionado com o tempo que tardam em acontecer as reações de hidratação, que pode estar influenciado pelo elevado teor de aditivo superplastificante na composição deste microconcreto (2,6% em relação à massa de cimento). Para esta mesma fase, os microconcretos de referência com relações $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$ apresentaram um comportamento similar quanto à inclinação da curva e estabilização da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, tendo em conta que o teor de aditivo superplastificante foi de 1,65% e 1,30%, respectivamente.

Comparando-se cada microconcreto de referência com seu respectivo traço contendo PSA (no teor de 0,2%), e relações $a/c= 0,30$, $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$ observou-se que o resultado de tempo zero foi maior nos traços contendo PSA. Igualmente foi observado que os microconcretos com 0,2% de PSA apresentaram um comportamento bastante próximo ao respectivo microconcreto de referência, tanto no tempo zero como na cinética da curva de propagação do pulso ultrassônico em suas quatro fases, atingindo a estabilização da velocidade em intervalos de tempo similares.

Os resultados desta pesquisa estiveram próximos aos obtidos por TRALDI e AGUIRRE (2013), que obtiveram um tempo zero de 6h 55 min, no microconcreto de referência com relação $a/c= 0,30$. Entretanto, o tempo zero do microconcreto com 0,3% de PSA foi de 15h, valor que se afastou bastante do obtido nesta pesquisa. Destaca-se que nas duas pesquisas foram utilizados aditivos superplastificantes diferentes e em dosagens distintas, podendo influenciar o comportamento do tempo zero dos microconcretos estudados.

4.2. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1. Retração Autógena.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados da deformação autógena dos oito microconcretos estudados e a percentagem de redução da retração autógena dos microconcretos com adição de polímeros superabsorventes. Para esta pesquisa é utilizada a metodologia proposta por SILVA (2007), a partir dos procedimentos de TAZAWA (1999) para a determinação experimental da retração autógena.

Tabela 4.5 - Resultados da deformação autógena e percentagem de redução da retração autógena dos microconcretos com adição de PSA em relação à sua mistura referência.

Deformação Autógena ($\mu\text{m/m}$)								
t (dias)	a/c = 0,30	a/c = 0,30	a/c = 0,30	a/c = 0,30	a/c = 0,35	a/c = 0,35	a/c = 0,40	a/c = 0,40
	REF	PSA 0,1%	PSA 0,2%	PSA 0,3%	REF	PSA 0,2%	REF	PSA 0,2%
Pico exp⁽¹⁾	90	158	198	152	102	225	137	323
1	-189	-2	144	98	-200	102	-179	177
3	-360	-190	24	77	-308	-15	-252	102
7	-458	-318	-64	61	-405	-92	-298	61
28	-542	-439	-279	-45	-431	-276	-292	-32
Redução da Retração Autógena (%)								
1	-	43	80	81	-	43	-	54
3	-	23	61	84	-	42	-	43
7	-	13	52	84	-	37	-	40
28	-	6	24	69	-	6	-	17

⁽¹⁾ Período de tempo em que ocorreu o pico de expansão para cada mistura (entre 6 e 18h).

A percentagem de redução da retração autógena dos microconcretos com adição de polímeros superabsorventes, comparados com sua mistura referência, foi calculada utilizando a Equação 4.1.

$$\% \text{ Redução R.A.} = \left[1 - \left(\frac{L_{pi} - L_{di}}{L_{pRef} - L_{dRef}} \right) \right] \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

L_{pi} : Leitura da deformação medida no pico de expansão para o traço estudado;

L_{di} : Leitura da deformação medida na idade requerida para o traço estudado;

L_{pRef} : Leitura da deformação medida no pico de expansão para o traço de referência;

L_{dRef} : Leitura da deformação medida na idade requerida para o traço de referência.

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados da deformação autógena dos oito microconcretos estudados de 0 até 28 dias de idade. Cada curva corresponde à média aritmética dos três resultados individuais para cada microconcreto.

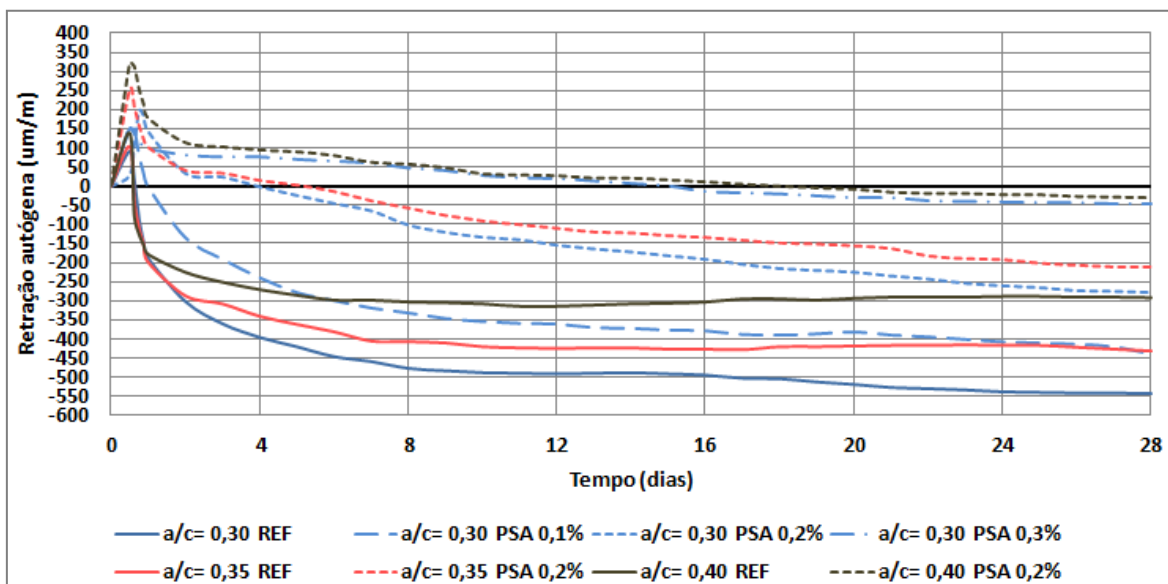


Figura 4.7. Deformação autógena dos microconcretos estudados de 0 até 28 dias de idade.

4.2.1.1. Influência do teor de PSA.

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados da deformação autógena de 0 até 28 dias de idade dos microconcretos com relação $a/c=0,30$, de referência e com adição de polímeros superabsorventes nos teores de 0,1%, 0,2% e 0,3%, em relação à massa de cimento.

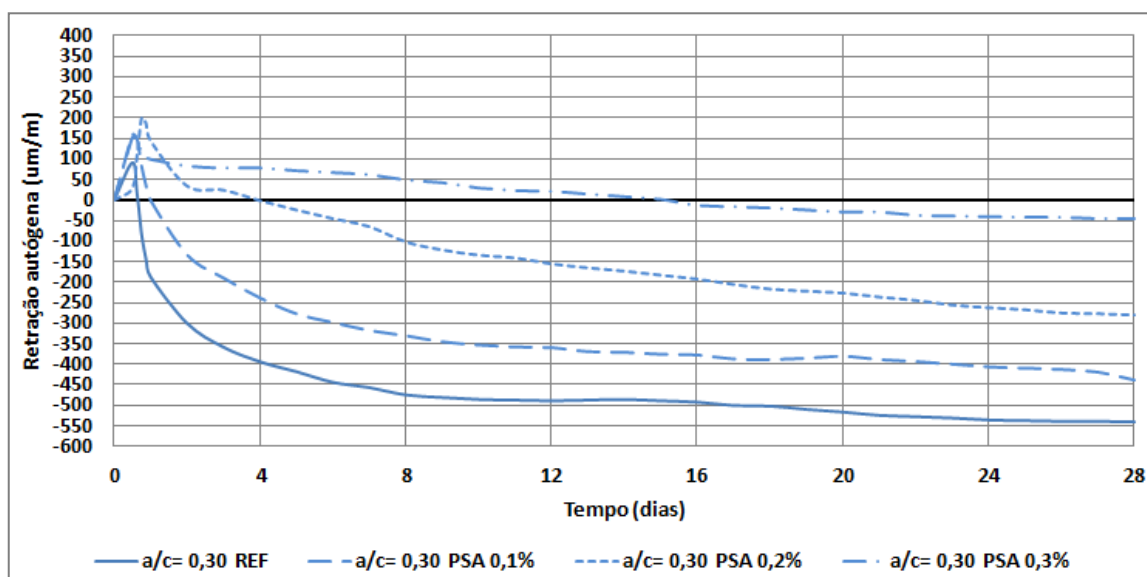


Figura 4.8 - Deformação autógena de 0 a 28 dias dos microconcretos com relação $a/c=0,30$.

Todos os microconcretos apresentaram expansão inicial nas primeiras idades de até $198\mu\text{m/m}$. O microconcreto de referência com relação $a/c= 0,30$ apresentou menor expansão inicial ($90\mu\text{m/m}$) e maior retração final ($-542\mu\text{m/m}$). Todas as misturas contendo PSA reduziram a retração autógena. Porém, o teor de 0,3% foi o mais eficiente. Para fins comparativos com outros teores de PSA, para a idade de 7 dias, houve uma redução de 84%, enquanto para o teor de 0,2% de PSA e 0,1% de PSA a redução na retração autógena foi de 52% e de 13%, respectivamente, para essa idade (Tabela 4.5).

Foi observado que a eficiência da adição de polímeros superabsorventes para mitigar a retração autógena diminui à medida que aumenta a idade dos microconcretos. Esse comportamento ocorreu para todas as misturas. O microconcreto com relação $a/c= 0,30$ e adição de PSA de 0,3% apresentou uma redução da retração autógena de 80% no primeiro dia de idade e de 70% aos 28 dias de idade. Entretanto, apresentou também uma redução expressiva nas propriedades mecânicas do microconcreto, como será apresentado nos próximos itens. Em pesquisa desenvolvida por WANG et al. (2009), sobre concretos contendo polímeros superabsorventes para mitigar a retração autógena, os autores explicam que a água de cura interna está quase esgotada aos 7 dias de idade do concreto e que os vazios deixados pela água liberada pelos polímeros se transformam em poros na estrutura da pasta. Esta pode ser a razão pela qual diminui a eficiência dos PSAs enquanto aumenta a idade dos microconcretos.

LURA et. al, (2012), explicam que, uma vez que o PSA atinge seu tamanho final, ele forma inclusões estáveis cheias de água. Esta água é subsequentemente aspirada para o interior dos poros capilares menores e consumida pela hidratação do cimento. O PSA acaba na forma de poros vazios na pasta de cimento.

Como esperado, o valor máximo da retração autógena, aos 28 dias de idade, ocorreu para o microconcreto de referência com relação $a/c= 0,30$, cuja magnitude foi de $-542\mu\text{m/m}$ (Tabela 4.5). Este valor é muito próximo ao obtido no traço de referência de ORDOÑEZ (2013) que foi de $-526\mu\text{m/m}$, considerando que nos dois trabalhos foi utilizada a mesma dosagem, porém materiais de lotes diferentes e um aditivo superplastificante de outra marca, também de base éter policarboxilato, mantendo o mesmo roteiro de mistura.

Os microconcretos apresentaram expansão inicial de até $323\mu\text{m/m}$ (Tabela 4.5) entre 6 e 18 horas de idade. Como todos os microconcretos fabricados para esta pesquisa são de alta

resistência, o material provavelmente tem condições de suportar os esforços de compressão induzidos devido à expansão.

Foi observado que a adição de 0,3% de PSA gerou uma expansão de 152 $\mu\text{m}/\text{m}$ no microconcreto, e foi somente após os 15 dias de idade que o corpo de prova retornou ao tamanho original. Nos microconcretos com adições de PSA de 0,1% e 0,2% este comportamento ocorreu antes dos 4 dias de idade, que é mais desfavorável, considerando que nessa idade as tensões de origem autógeno podem ser maiores que a resistência do concreto, enquanto aos 15 dias de idade, o concreto já desenvolveu resistência à tração suficiente para suportar as tensões impostas.

No estudo desenvolvido por TRALDI e AGUIRRE (2013) utilizando o mesmo tipo de polímero superabsorvente, outra marca de aditivo superplastificante e materiais constituintes do microconcreto de um lote diferente ao utilizado nesta pesquisa, o valor da retração autógena, aos 28 dias de idade, para o microconcreto com relação $a/c=0,30$ e adição de PSA de 0,3%, foi de 6 $\mu\text{m}/\text{m}$, enquanto o valor obtido para esta pesquisa foi superior, sendo de 45 $\mu\text{m}/\text{m}$. O microconcreto de referência com relação $a/c=0,30$ apresentou uma expansão inicial de 90 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Tabela 4.5). A partir deste momento a cinética da curva tem uma inclinação considerável até atingir um valor de retração autógena de -189 $\mu\text{m}/\text{m}$ no primeiro dia de idade.

A inclinação da curva diminui, mas continua sendo pronunciada até os 7 dias de idade, alcançando um valor de retração autógena de -458 $\mu\text{m}/\text{m}$. A partir desta idade a cinética da curva é mais suave porque o processo de hidratação do material cimentício é mais lento, alcançando um valor de -542 $\mu\text{m}/\text{m}$ aos 28 dias de idade. Este comportamento dos microconcretos pode estar relacionado com que em sua fabricação foi utilizado cimento de alta resistência inicial, fazendo que as reações de hidratação sejam mais intensas nas idades iniciais.

4.2.1.2. Influência da relação a/c .

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados da determinação experimental da retração autógena dos microconcretos de referência com relações $a/c= 0,30$, $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$.

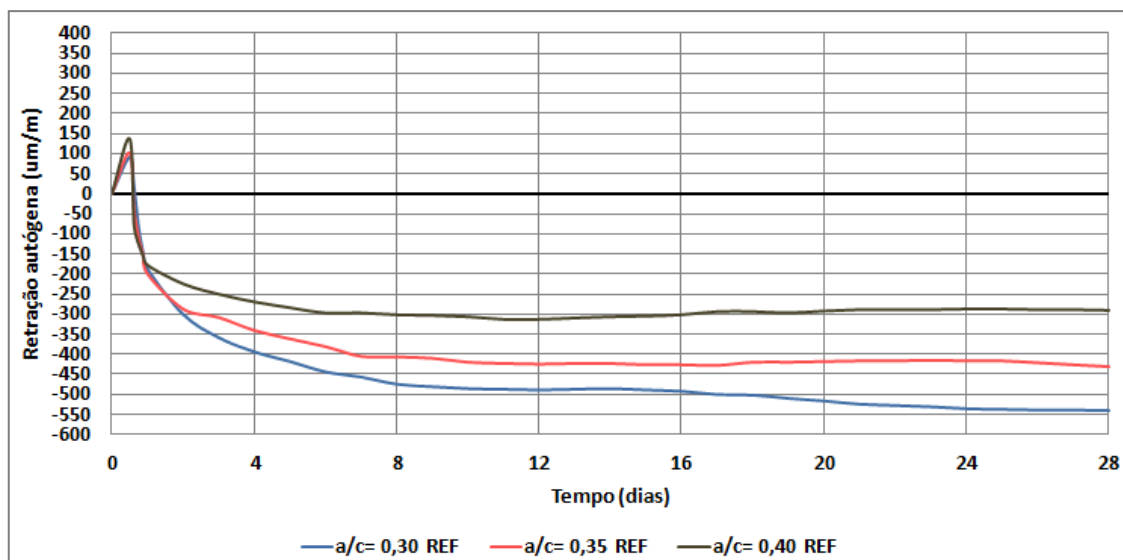


Figura 4.9. Deformação autóloga dos microconcretos de referência com relações $a/c=0,30$, $a/c=0,35$ e $a/c=0,40$.

Analisando os resultados dos microconcretos de referência, ou seja, sem adição de PSA, foi encontrado que houve um incremento na magnitude da retração autóloga com a diminuição da relação a/c . Este comportamento é explicado por TAZAWA (1999) que identifica como sua principal causa a intensidade na diminuição da umidade relativa interna do material cimentício.

Comparando-se cada microconcreto de referência com seu respectivo traço contendo PSA (no teor de 0,2%), foi observado que todos apresentaram expansão nas idades iniciais, sendo o microconcreto com relação $a/c=0,40$ e 0,2% de PSA o que apresentou maior expansão, $322\mu\text{m/m}$ (Tabela 4.5). Esperava-se este comportamento por ser o microconcreto com a maior quantidade de água livre. SILVA (2007), citando BENTZ e STUTZMAN (1994), explica que, a expansão pode ser atribuída à formação e crescimento de grandes cristais de hidróxido de cálcio, que continuam a crescer enquanto avança o processo de hidratação.

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados da deformação autóloga para os microconcretos de referência e com adição de 0,2% de PSA com relações $a/c=0,30$, $a/c=0,35$ e $a/c=0,40$, desde o tempo zero e até 28 dias de idade.

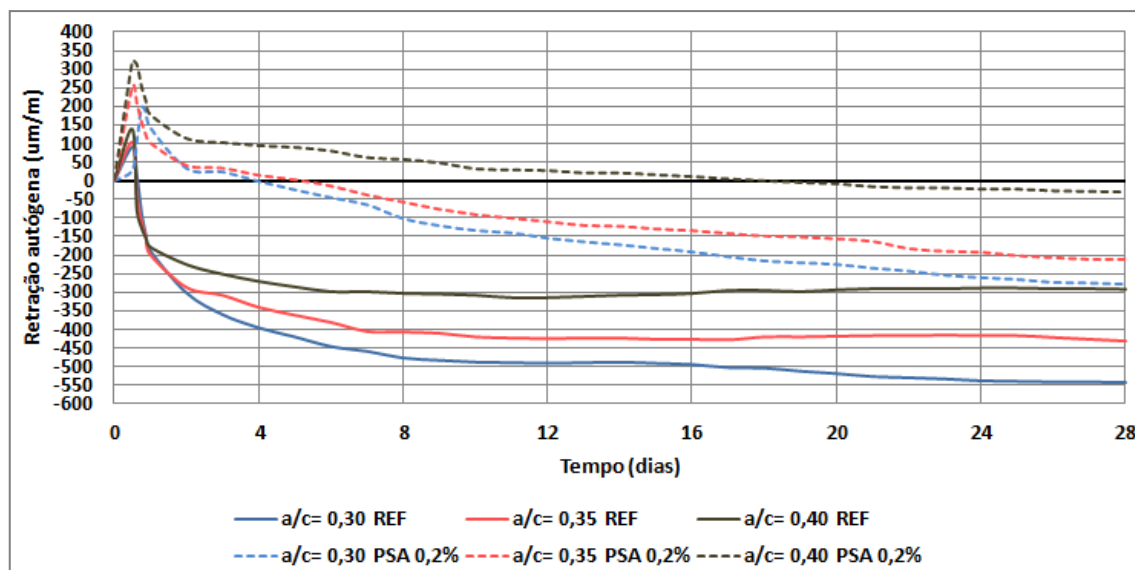


Figura 4.10. Deformação autóloga dos microconcretos de referência e com 0,2% de PSA com relações $a/c=0,30$, $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$.

Nos microconcretos com adição de polímeros superabsorventes foi observada uma redução da retração autóloga se comparados com os microconcretos de referência. O teor de 0,2% de PSA se mostrou eficiente na mitigação da retração autóloga. As reduções na retração autóloga dos microconcretos com relações $a/c= 0,30$, $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$ no primeiro dia de idade foram da ordem de 80%, 40% e 50%, respectivamente e de 20%, 6% e 17% aos 28 dias de idade. Pode ser observado que a eficiência da adição de PSA foi maior para a menor relação água/cimento e também que essa eficiência diminui enquanto aumenta a idade dos microconcretos, para todas as relações a/c estudadas, conforme discutido no item 4.2.1.1.

4.2.2. Resistência à tração na flexão

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados médios de resistência à tração na flexão dos microconcretos estudados, nas idades de 7 e 28 dias. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Tabela 4.6 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de resistência à tração na flexão (MPa).

	a/c = 0,30 REF	a/c = 0,30 PSA 0,1%	a/c = 0,30 PSA 0,2%	a/c = 0,30 PSA 0,3%	a/c = 0,35 REF	a/c = 0,35 PSA 0,2%	a/c = 0,40 REF	a/c = 0,40 PSA 0,2%
7 dias	14,0 (±0,6)	12,8 (±0,7)	11,8 (±0,5)	10,9 (±0,8)	11,1 (±0,6)	10,2 (±0,6)	8,2 (±0,5)	8,5 (±0,4)
28 dias	14,4 (±0,6)	12,5 (±0,2)	12,3 (±0,5)	12,5 (±0,7)	12,4 (±1,0)	10,9 (±1,2)	10,3 (±0,3)	9,9 (±0,4)

4.2.2.1. Influência do teor de PSA.

Para este ensaio foram moldados 12 corpos de prova prismáticos para cada um dos oito microconcretos estudados, sendo 6 para cada idade ensaiada (7 e 28 dias). Na Figura 4.11 é apresentada a média dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos microconcretos com relação $a/c=0,30$, de referência e com adição de polímeros superabsorventes nos teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento, para 7 (tracejado) e 28 dias de idade.

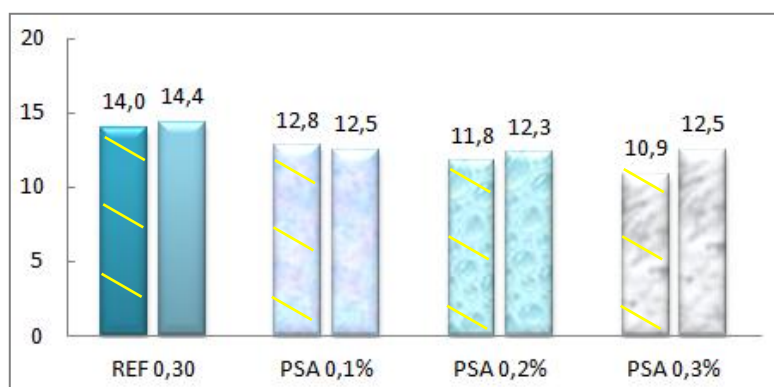


Figura 4.11. Resistência à tração na flexão (MPa) dos microconcretos com relação $a/c=0,30$.

Pode ser observada uma diminuição da resistência à tração na flexão com a adição de polímero superabsorvente nos microconcretos, se comparados com a mistura de referência. No entanto, com o aumento do teor de PSA não foram observadas grandes diferenças na resistência à tração na flexão dos microconcretos.

A redução na resistência para os microconcretos com diferentes teores de PSA foi da ordem de 13% aos 28 dias de idade, para todas as misturas contendo PSA, em comparação com o microconcreto de referência. O crescimento na resistência à tração na flexão de 7 para 28 dias de idade é desprezível, por ter utilizado cimento CPV na fabricação dos microconcretos. Este comportamento está de acordo com os resultados obtidos por TRALDI e AGUIRRE (2013) que obtiveram uma redução de 15% aos 28 dias de idade na resistência à tração na flexão do microconcreto com $a/c=0,30$ e 0,3% de PSA.

Em pesquisa desenvolvida por CLARO e SARAIVA (2012) e utilizando microconcretos similares aos fabricados para esta pesquisa, não foi encontrada uma redução na resistência

à tração na flexão para o microconcreto com relação $a/c= 0,30$ contendo 0,3% de PSA em relação à massa de cimento. Esse mesmo comportamento foi encontrado por ORDOÑEZ (2013) que não observou redução na resistência à tração na flexão para o microconcreto com adição de 0,3% de PSA.

Praticamente não houve crescimento da resistência à tração na flexão de 7 para 28 dias de idade. Esperava-se este comportamento, pois a resistência à tração do concreto é atingida aproximadamente aos 7 dias de idade e a partir daí o crescimento é desprezível, devido à utilização de cimento CPV de alta resistência inicial na fabricação dos microconcretos.

4.2.2.2. Influência da relação a/c .

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos microconcretos de referência e com adição de 0,2% de PSA com relações $a/c= 0,30$, $a/c=0,35$ e $a/c= 0,40$, aos 7 e 28 dias de idade.

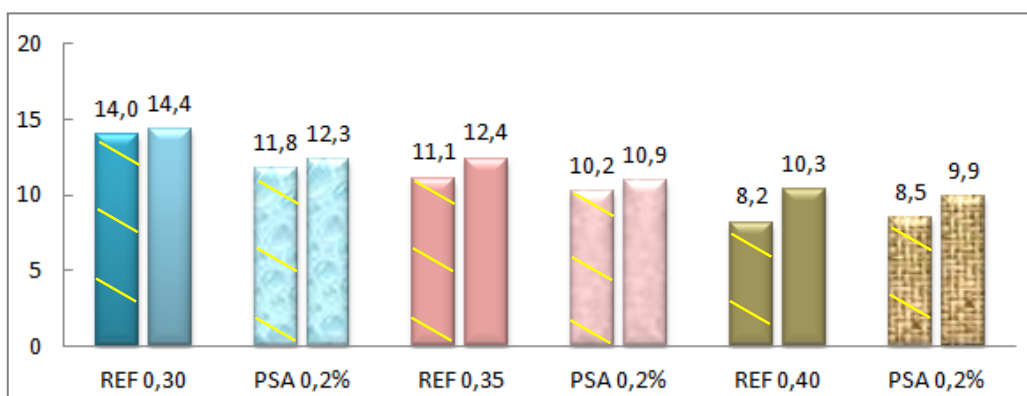


Figura 4.12. Resistência à tração na flexão (MPa) dos microconcretos com relações $a/c= 0,30$, $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$.

Analisando os resultados dos microconcretos de referência, ou seja, sem adição de PSA, como esperado, com o incremento da relação água/cimento foi observada uma diminuição na resistência à tração na flexão dos microconcretos da ordem de 30% aos 28 dias de idade (para relação $a/c= 0,40$).

Comparando-se cada microconcreto de referência com seu respectivo traço contendo PSA (no teor de 0,2%), foi observado que a adição de polímero superabsorvente provocou uma redução na resistência à tração na flexão da ordem de 13% aos 28 dias de idade.

4.2.3. Resistência à compressão em cubos

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados médios de resistência à compressão em cubos dos microconcretos estudados, nas idades de 7 e 28 dias. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. Para este ensaio foram utilizadas as duas metades de cada corpo de prova utilizado no ensaio de resistência à tração na flexão, portanto, 12 metades para 7 dias e 12 para 28 dias de idade.

Tabela 4.7 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de resistência à compressão em cubos (MPa).

	a/c = 0,30 REF	a/c = 0,30 PSA 0,1%	a/c = 0,30 PSA 0,2%	a/c = 0,30 PSA 0,3%	a/c = 0,35 REF	a/c = 0,35 PSA 0,2%	a/c = 0,40 REF	a/c = 0,40 PSA 0,2%
7 dias	95,9 (±3,5)	87,8 (±3,9)	81,9 (±4,2)	77,6 (±2,7)	83,1 (±1,7)	74,9 (±3,1)	73,5 (±2,2)	58,6 (±2,6)
28 dias	109,9 (±6,3)	106,9 (±4,1)	101,7 (±5,1)	94,4 (±3,1)	104,6 (±4,4)	88,6 (±2,7)	90,4 (±4,3)	72,0 (±3,4)

4.2.3.1. Influência do teor de PSA.

Na Figura 4.13 são apresentados os resultados da resistência média à compressão em cubos dos microconcretos com relação a/c= 0,30, de referência e com adição de polímeros superabsorventes nos teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento, aos 7 e 28 dias de idade.

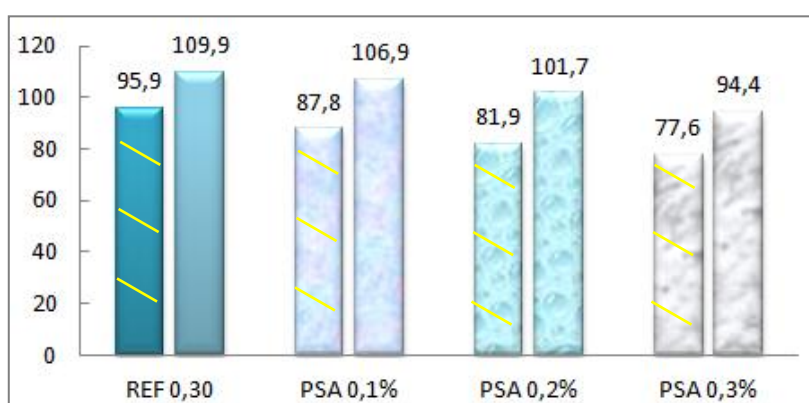


Figura 4.13. Resistência à compressão em cubos (MPa) dos microconcretos com relação a/c= 0,30.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão em cubos situaram-se no intervalo de 94 a 109 MPa aos 28 dias de idade, sendo o maior valor correspondente ao microconcreto de referência com a/c= 0,30. Estes valores são considerados satisfatórios. O desvio padrão

dos resultados mostra bom controle das atividades do ensaio, pois foi mantido em valores baixos. Nos microconcretos com relação $a/c= 0,30$ foi observada uma redução na resistência à compressão em cubos de 3%, 7% e 14% aos 28 dias de idade, para adições de 0,1%, 0,2% e 0,3% de PSA, respectivamente. Assim para o maior teor de polímero foi observada uma redução maior na resistência do microconcreto. Tanto o microconcreto de referência como aqueles com adição de PSA apresentaram um crescimento na resistência à compressão média de 18% de 7 para 28 dias de idade, considerada satisfatória para cimento CPV de alta resistência inicial.

4.2.3.2. Influência da relação a/c .

Na Figura 4.14 são apresentados os resultados da resistência média à compressão para corpos de prova prismáticos dos microconcretos de referência e com adição de 0,2% de PSA com relações $a/c= 0,30$, $a/c=0,35$ e $a/c= 0,40$, aos 7 e 28 dias de idade.

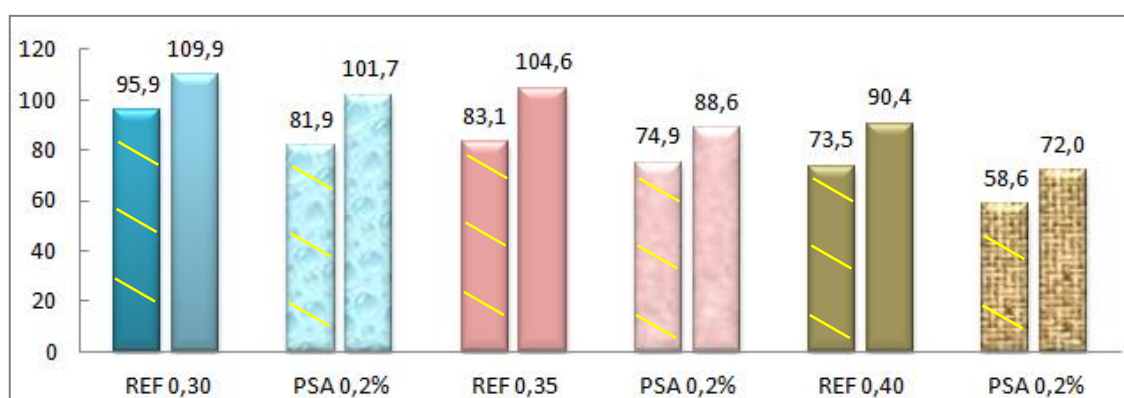


Figura 4.14. Resistência à compressão em cubos (MPa) dos microconcretos com relações $a/c= 0,30$, $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$.

Analisando os resultados dos microconcretos, de referência e com adição de PSA, foi observado um crescimento na resistência à compressão de 18% de 7 para 28 dias de idade. Comparando-se cada microconcreto de referência com seu respectivo traço contendo PSA (no teor de 0,2%), foi observado que a redução na resistência à compressão foi maior para o microconcreto com maior relação água/cimento, sendo de 7% para relação $a/c= 0,30$ e de 20% para relação $a/c= 0,40$ aos 28 dias de idade.

Esperava-se este comportamento, devido a que um incremento na quantidade de água livre no microconcreto leva a uma maior percentagem de vazios na sua estrutura, diminuindo suas propriedades mecânicas. Em pesquisa desenvolvida por CRAEYE et al. (2011), os

autores concluem que a adição de polímero superabsorvente leva a uma expressiva redução da resistência mecânica. Em comparação com o concreto de referência, com uma relação $a/c = 0,30$, a resistência à compressão aos 28 dias de idade das amostras foi reduzida de 15% a 28% nos concretos contendo PSA nos teores de 0,2% e 0,4% em relação à massa de cimento.

Na pesquisa desenvolvida por CRAEYE et al. (2011) são utilizadas relações água/cimento maiores do que 0,30 nos concretos com adição de PSA, devido à absorção do PSA, que foi determinada como aproximadamente 45g de água por g de PSA. Também foi necessário ajustar o teor de superplastificante para obter um intervalo de consistência comparável nas misturas de concreto, utilizando menor teor de superplastificante nos concretos com PSA do que no concreto de referência.

4.2.4. Resistência à compressão em cilindros

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados médios de resistência à compressão em cilindros dos microconcretos estudados, nas idades de 7 e 28 dias. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. Para este ensaio foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos para cada microconcreto, sendo 6 para 7 dias e 6 para 28 dias de idade.

Tabela 4.8 - Resultados médios e desvio padrão do ensaio de resistência à compressão em cilindros (MPa).

	a/c = 0,30 REF	a/c = 0,30 PSA 0,1%	a/c = 0,30 PSA 0,2%	a/c = 0,30 PSA 0,3%	a/c = 0,35 REF	a/c = 0,35 PSA 0,2%	a/c = 0,40 REF	a/c = 0,40 PSA 0,2%
7 dias	80,9 (±3,0)	76,7 (±2,9)	68,7 (±4,3)	62,3 (±6,7)	64,2 (±2,5)	62,1 (±2,5)	57,9 (±2,3)	45,7 (±1,9)
28 dias	100,5 (±4,3)	89,2 (±3,6)	84,5 (±3,2)	70,1 (±3,2)	77,2 (±6,4)	71,0 (±5,1)	70,9 (±2,7)	58,9 (±2,2)

4.2.4.1. Influência do teor de PSA.

Na Figura 4.15 são apresentados os resultados da resistência média à compressão em cilindros dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$, de referência e com adição de polímeros superabsorventes nos teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento, aos 7 e 28 dias de idade.

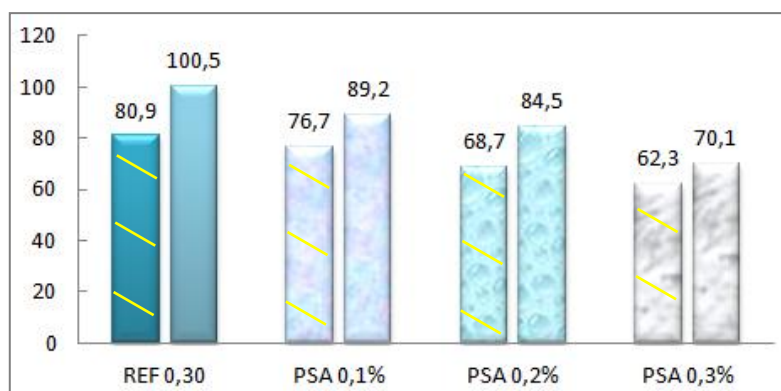


Figura 4.15. Resistência à compressão em cilindros (MPa) dos microconcretos com relação $a/c = 0,30$.

Nos microconcretos com relação $a/c = 0,30$ foi observado que as adições de PSA de 0,1%, 0,2% e 0,3% ocasionaram reduções na resistência à compressão em cilindros de 11%, 16% e 30% respectivamente, aos 28 dias de idade, sendo o teor de 0,3% de PSA o que apresentou o efeito mais negativo na resistência do microconcreto. Pesquisadores como JENSEN e HANSEN (2002) e PEREIRA e MATOS (2011) também encontraram reduções na resistência à compressão dos microconcretos estudados contendo polímeros superabsorventes.

Em pesquisa desenvolvida por CLARO e SARAIVA (2012), utilizando o mesmo traço de referência e outro tipo de polímero superabsorvente no teor de 0,3%, foi encontrada uma redução na resistência à compressão dos microconcretos contendo PSA, quando comparados com o microconcreto de referência. Esta redução foi de 5% tanto aos 7 como aos 28 dias de idade. Diante do exposto, faz-se necessário realizar ensaios para se determinar experimentalmente a dosagem ótima de PSA, para mitigar a retração autógena sem prejuízo considerável nas propriedades mecânicas. Essa dosagem vai depender do tipo de PSA e suas aplicações. Para o PSA estudado nesta pesquisa, o teor que apresentou o melhor comportamento, de acordo com os critérios mencionados, foi 0,2% em relação à massa de cimento.

4.2.4.2. Influência da relação a/c .

Na Figura 4.16 são apresentados os resultados da resistência média à compressão em cilindros dos microconcretos de referência e com adição de 0,2% de PSA com relações $a/c = 0,30$, $a/c = 0,35$ e $a/c = 0,40$, aos 7 e 28 dias de idade.

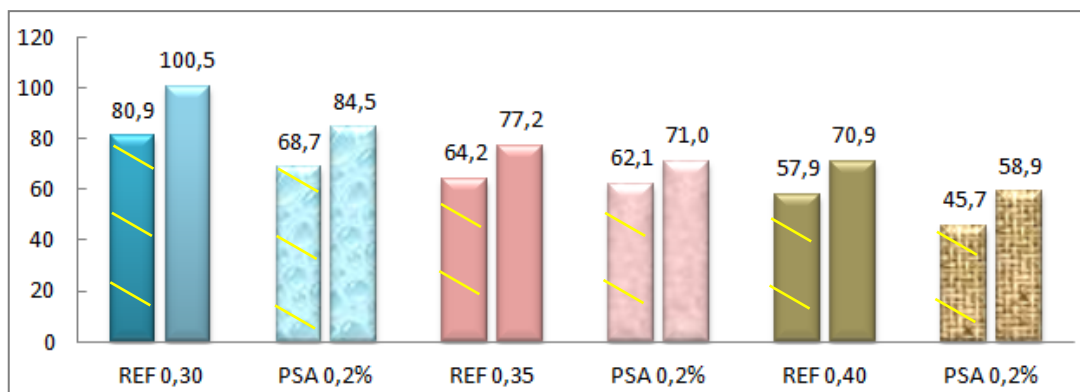


Figura 4.16. Resistência à compressão em cilindros (MPa) dos microconcretos com relações $a/c= 0,30$, $a/c= 0,35$ e $a/c= 0,40$.

Analisando os resultados dos microconcretos de referência, ou seja, sem adição de PSA, como esperado, o aumento na relação água/cimento levou a uma redução na resistência à compressão dos microconcretos estudados, de até 40% aos 28 dias de idade para o microconcreto com relação $a/c= 0,40$. Comparando-se cada microconcreto de referência com seu respectivo traço contendo PSA (no teor de 0,2%) a adição de polímero superabsorvente gerou uma diminuição na resistência à compressão da ordem de 14% aos 28 dias de idade.

Segundo WANG et al. (2009) a adição de PSA mitiga a retração autógena nas idades iniciais do concreto, no entanto, influencia negativamente a estrutura de poros da pasta de cimento. Assim a resistência à compressão do concreto diminui quanto maior é o teor de PSA e a quantidade de água para cura interna. Destaca-se que na pesquisa desenvolvida por WANG et al. (2009), o polímero superabsorvente foi saturado antes de ser adicionado ao concreto.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

A principal motivação para a realização desta pesquisa foi o estudo da retração autógena em microconcretos de alta resistência, que pode levá-los à fissuração nas idades iniciais. Foi estudada a utilização de polímeros superabsorventes como agente de cura interna para mitigar a retração autógena em microconcretos de alta resistência. Também foi investigado o efeito dos PSA nas propriedades mecânicas dos microconcretos. Através do desenvolvimento do programa experimental e da análise dos resultados, podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

A propagação da onda ultrassônica tem-se mostrado como uma metodologia eficiente para a determinação precisa da transição suspensão - sólido ou tempo zero, necessária para balizar o início da determinação experimental da retração autógena, como comprovado nesta pesquisa.

Os resultados experimentais mostraram que a adição de polímeros superabsorventes constitui uma solução promissora na mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência. O efeito do polímero foi mais acentuado no microconcreto com menor relação água/cimento ($a/c = 0,30$), principalmente nos primeiros 7 dias de idade. Foi observada uma diminuição na eficiência do PSA à medida que aumenta a idade dos microconcretos.

As adições de polímero superabsorvente nos teores de 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento foram as mais eficientes na mitigação da retração autógena, no entanto, foi observado que quanto maior o teor de PSA maior foi a diminuição das propriedades mecânicas dos microconcretos estudados, em comparação com os microconcretos de referência. O efeito do teor de 0,1% de PSA na redução da retração autógena e nas propriedades mecânicas dos microconcretos menos expressivo.

É fundamental conhecer as características específicas do polímero superabsorvente para sua utilização adequada em sistemas cimentícios, especialmente sua capacidade de absorção, já que esta determina a quantidade de água para cura interna que deve ser adicionada ao microconcreto para um efeito eficiente na mitigação da retração autógena, sem ter maior influência em suas propriedades mecânicas, que podem ser prejudicadas por

um excesso de água livre no sistema cimentício. Achava-se que com a adição da água de cura interna não seria necessário ajustar o teor de aditivo superplastificante dos microconcretos para atingir o intervalo de espalhamento fixado como premissa da pesquisa, mas parece que o polímero superabsorvente influencia a reologia dos microconcretos.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos posteriores sugere-se investigar outros teores e tipos de polímeros superabsorventes, com a finalidade de identificar o teor ótimo que permita mitigar a retração autógena com o mínimo prejuízo nas propriedades mecânicas do concreto.

Embora, esta pesquisa tenha contribuído para a compreensão do efeito dos polímeros superabsorventes em algumas propriedades do concreto, faz-se necessário um estudo cuidadoso da influência do PSA no teor de ar incorporado e microestrutura do concreto. Sugere-se a realização de ensaios de porosimetria.

Devem ser realizadas pesquisas sobre a influência dos polímeros superabsorventes na reologia do concreto.

Para estudos posteriores sugere-se investigar o efeito do aditivo superplastificante no tempo zero, utilizando diferentes tipos de aditivos e dosagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C., 1998. **Autogenous shrinkage measurement**. In: E. Tazawa (ed), *Autoshrink' 98, Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan June, pp. 245-256.

ANGELIM, R. R. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento das argamassas de revestimento**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 146p. 2000.

ANTUNES, G. R. (2010). **Estudo de Manifestações Patológicas em Revestimentos de Fachada em Brasília – Sistematização da Incidência de Casos**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-001A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 178p.

AOKI, S., YAMASAKI, H. **Process for preparation of spontaneously-crosslinked alkali metal acrylate polymers**, US 4093776. Kao Soap Co, Ltd., Tokyo, Japan, 1978.

ASSMANN, A. (2013). **Physical properties of concrete modified with superabsorbent polymers**. PhD Tesis, Stuttgart University, Stuttgart, Germany.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118, Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 238 p. 2014.

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

_____. **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 ultrassônica**. Rio de Janeiro, 13p.

_____. **NBR NM 65:2002. Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**, Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 13276, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 3p. 2005.

_____. **NBR 13278, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**, Rio de Janeiro, 4p. 2005.

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

_____. **NBR NM 47 Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico.** Rio de Janeiro, 23p. 2002.

_____. **NBR NM 65, 2002, Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega – método de ensaio.** Rio de Janeiro, 4p.

_____. **NBR – 7211: Agregado para Concreto.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8802: Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento portland.** Rio de Janeiro, 2011.

ASTM C403/C403M-08, **Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance,** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.

ASTM C780-14A, **Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry,** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM E632-82(1996), **Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials** (Withdrawn 2005), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1988.

BENTUR, A., 2001, Comprehensive approach to prediction and control of early-age cracking in cementitious materials. 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. 589-597.

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

BENTZ, D. P., STUTZMAN, P. E., **Evolution of Porosity and Calcium Hydroxide in Laboratory Concretes Containing Silica Fume,** Cement and Concrete Research, 24 (6), 1044-50, 1994.

CIB W80/RILEM 71-PSL·Final Report. **Prediction of service life of building materials and components.** RILEM Technical Committees. Materials and Structures, January 1987, Volume 20, Issue 1, pp 55-77

CLARO, G. P. P., SARAIVA, L. M. **Contribuição ao estudo da retração autógena em concretos de alta resistência.** Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 53 p. 2012.

CRAEYE, B., GEIRNAERT, M., DE SCHUTTER, G. **Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age-cracking of high-performance concrete bridge decks.** *Constr Build Mater* 2011; 25:1-13.

CUSSON, D., MECHTCHERINE, V., LURA, P. **Applications of Superabsorbent Polymers in concrete and other building materials.** In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), *Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP*, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

DUDZIAK, L., MECHTCHERINE, V. (2010) Reducing the cracking potential of Ultra-High-Performance Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP). In: Van Zijl GPAG Boshoff WP (eds) **Proceedings of the international conference on Advanced Concrete Materials**, November 2009 (Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa).

DUDZIAK, L., MECHTCHERINE, V., 2008. Mitigation of volume changes of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) by using Super Absorbent Polymers. **Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete**, p. 425-432.

ESTEVEZ, P. **Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid.** *Cement and Concrete Composites* 33 (2011) 717–724.

FRIEDRICH, S. Superabsorbent Polymers (SAP). In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), *Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP*, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

HOLT, E. **Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete.** Technical Research Centre of Finland, VTT Publications, No. 446, 2001.

IRIE, Y., HATSUDA, T., YONEMURA, K., KIMURA, K., **Method of production of particulate hydro-gel polymer and absorbent resin**, EP 508810 B1. Nippon Shokubai Co., Ltd., Osaka, Japan, 1996.

JCI- Committee Report of Japan Concrete Institute, **Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete**, 1998, In: E. Tazawa (ed), *Autoshrink' 98*, Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan June, pp. 3-67.

JENSEN, O. M., LURA, P. **Techniques and materials for internal water curing of concrete.** *Materials and Structures* (2006) 39: 817 - 825.

JENSEN, O. M. Water Absorption of Superabsorbent Polymers in a Cementitious environment, **International RILEM Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering**, 2011, Hong Kong, China.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F., (2001) **Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principle and Theoretical Background**. Cement and Concrete Research 31.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F., (2002) **Water-Entrained Cement-Based Materials: II. Experimental observations**. Cement and Concrete Research 32.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F., **Autogenous Deformation and RH Change in Perspective**, *Cement and Concrete Research*, V. 31, 2001, pp. 1859-1865.

JOY, M. C., HSU, W. **Superabsorbent polymer having increased rate of water absorption**, WO 2005/063313 Al Stockhausen Inc., Greensboro, North Carolina, United States of America, 2005.

KOVLER, K. **Effect of Superabsorbent Polymers on the mechanical properties of concrete**. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

LAUSTSEN, S., HASHOLT, M.T., JENSEN, O. M., (2008) **A new technology for air entrainment of concrete** 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China.

LOPES, A. N. M., SILVA, E. F., DAL MOLIN, D. C. C., TOLEDO FILHO, R. D. (2013), **Shrinkage-Reducing Admixture: Effects on Durability of High-Strength Concrete**. ACI Materials Journal, Title no. 110-M32.

LOPES, A. N. M. 2011. **Mitigação retração autógena em microconcretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e micro estrutura**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, junho. 278p.

LURA, P., FRIEDEMANN, K., STALLMACH, F., MONNIG, S., WYRZYKOWSKI, M. Kinetics of water migration in cement-based systems containing Superabsorbent Polymers. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. **State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP**, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

LURA, P.; VAN BREUGEL, K.; AND MARUYAMA, I. **Effect of Curing Temperature and Type of Cement on Early-Age Shrinkage of High-Performance Concrete**, *Cement and Concrete Research*, V. 31, 2001, pp. 1867-1872.

LYMAN, C. G. **Growth and Movement in Portland Cement Concrete**, Oxford University, Press, London, 1934.

MANZANO, M. A. R. (2014). **Estudo Experimental de Microconcretos de Alta Resistência Modificados com Polímeros Superabsorventes (PSA)**. Exame de Qualificação de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 115 p.

MECHTCHERINE, V., DUDZIAK, L. Effects of Superabsorbent Polymers on Shrinkage of Concrete: Plastic, Autogenous, Drying. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. **State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP**, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

MECHTCHERINE, V., GORGES, M., SCHROEFL, C., ASSMANN, A., BRAMESHUBER, W., RIBEIRO, A. B., CUSSON, D., CUSTODIO, J., SILVA, E. F., ICHIMIYA, K., IGARASHI, S., KLEMM, A., KOVLER, K., LOPES, A. N. M., LURA, P., NGUYEN, V. T., REINHARDT, H. W., TOLEDO FILHO, R. D., WEISS, J., WYRZYKOWSKI, M., YE, G., ZHUTOVSKY, S. **Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test**. Materials and Structures. DOI 10.1617/s11527-013-0078-5, 2014.

MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. **State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP**, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

MEYER, W. C. **A polymeric blend useful in thin-bed mortar compositions**, EP327351 A3, 1989 The Dow Chemical Company, Midland, Michigan, United States of America.

MONNIG, S. (2005) **Water saturated superabsorbent polymers used in high strength concrete**. Otto-Graf-J 16.

MONNIG, S. **Superabsorbing additions in concrete: applications, modeling and comparison of different internal water sources**. PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany, 2009.

MORAES, B. J.; CERQUEIRA, C. M. (2014). Determinação do tempo zero de microconcretos de alta resistência contendo polímeros superabsorventes usando a técnica do ultrassom. Trabalho de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64 p.

NAKAMURA, M., YAMAMOTO, T., TANAKA, H., OZAWA, H., SHIMADA, Y., (1996) **Process for production of water-absorbent resin**, EP 441507 B1. Sumitomo Seika Chemicals Co., Ltd., Hyogo, Japan.

NETO, W. N. A. (2014). Caracterização de polímero superabsorvente para mitigação de retração autógena em microconcretos de alta resistência. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ORDOÑEZ, 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.

ORDOÑEZ S. T. L., SILVA E. F., BAUER E., LOPES A. N. M., (2013). Utilização de polímero superabsorvente e aditivo redutor de retração no combate a retração autógena em microconcretos de alta resistência. **55º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON**, Gramado, Rio Grande do Sul.

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.

REGO, P., AKITAYA, T., (2011), **Determinação do patamar de percolação de materiais cimentícios pela técnica do pulso ultrassônico**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

REINHARDT, H. W., ASSMANN, A., (2009) **Enhanced durability of concrete by Superabsorbent Polymers**. Proc. BMC 9, Warsaw, 291-300.

REINHARDT, H. W., ASSMANN, A. **Effect of Superabsorbent Polymers on durability of concrete**. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

REINHARDT, H. W., MONNIG S. (2006) Results of comparative study of the shrinkage behavior of concretes with different internal water sources. In: JENSEN, O. M., LURA, P., KOVLER, K., (Eds). **Proceedings of international RILEM conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation**, August 2006 (Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark).

REINHARDT, H. W.; GROBE, C. U.; HERB, A. T., 2000, **Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar - a new device**, Materials and Structure, November, v. 33, p. 580-583.

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

RILEM. **Testing of Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity**, NDT-1, 1972.

SILVA, EUGÊNIA FONSECA. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. [Rio de Janeiro] 2007. XXVI, 332p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2007). Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

SILVA, E. F., LOPES, A. N. M., REGO, P. I. A, AKITAYA, T. A., (2011a), Técnica da propagação de pulso ultrassônico para determinação do tempo-zero (t_0) em concretos de alto desempenho (CAD). **6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**, Maputo, Moçambique, 29 agosto a 02 de setembro 2011.

SILVA, E. F., LOPES, A. N. M., CHATER, L., (2011b), Metodologia para determinação da retração autógena unidirecional em concretos de alto desempenho (CAD) por capturas de imagens. **6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**, Maputo, Moçambique, 29 agosto a 02 setembro 2011.

SILVA E. F., CLARO G. P., SARAIVA L. M., LOPES A. N. M., (2013) “O polímero superabsorvente como estratégia mitigadora da retração autógena em microconcretos de alta resistência”. **55º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON**, 29 de outubro a 01 de novembro de 2013, Gramado, Rio Grande do Sul.

SILVA, E. F., LOPES, A. N. M., CLARO, G. P., SARAIVA, L. M. (2013), O polímero superabsorvente como estratégia mitigadora da retração autógena de microconcretos de alta resistência. **55º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON**, 2013, Gramado, Rio Grande do Sul.

TAZAWA, E. 1999. **Autogenous Shrinkage of Concrete**. E & FN Spon, London, 1999, 424 pages.

TOLEDO FILHO, R., SILVA E. F, LOPES A. N. M., MECHTCHERINE V., DUDZIAK L. **Effect of Superabsorbent Polymers on the workability of concrete and mortar**. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

TRALDI, C. L. e AGUIRRE, L. M. (2013). **Polímero super absorvente (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em microconcretos de alta resistência devido à retração autógena**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.

WANG, F., ZHOU, Y., PENG, B., LIU, Z., HU, S. **Autogenous Shrinkage of Concrete with Super-Absorbent Polymer.** ACI Materials Journal, V. 106, No. 2, March-April 2009, p. 123-127.

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.

YE, G., BREUGEL, K., LURA, P., MECHTCHERINE, V., **Effect of Superabsorbent Polymers on hardening process of binder paste and microstructure development.** In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.

ZOHURIAAN-MEHR, M. J., 2008. “Superabsorbent Polymer Materials: A Review”