

**METODOLOGIA DOS TUBOS CORRUGADOS PARA DETERMINAÇÃO DA  
RETRAÇÃO AUTÓGENA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS DE ALTO  
DESEMPENHO CONTENDO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP)**

**JULIANA GONÇALVES BORGES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**METODOLOGIA DOS TUBOS CORRUGADOS PARA DETERMINAÇÃO DA  
RETRAÇÃO AUTÓGENA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS DE ALTO  
DESEMPENHO CONTENDO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP)**

**JULIANA GONÇALVES BORGES**

**ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Eugênia Fonseca da Silva, DSc.**

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

**PUBLICAÇÃO:  
BRASÍLIA/DF: JUNHO DE 2019**

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

**METODOLOGIA DOS TUBOS CORRUGADOS PARA DETERMINAÇÃO DA  
RETRAÇÃO AUTÓGENA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS DE ALTO  
DESEMPENHO CONTENDO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP)**

**JULIANA GONÇALVES BORGES**

DISSERTAÇÃO DE Mestrado 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.<sup>a</sup> Eugênia Fonseca da Silva, DSc (ENC-UnB)**

(Orientadora)

---

**Prof. João Henrique da Silva Rêgo, DSc (ENC-UnB)**

(Examinador Interno)

---

**Prof. Paulo Francinete Silva Junior, DSc (IFG)**

(Examinador Externo)

Brasília/DF, 28 de junho de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

**BORGES, JULIANA GONÇALVES**

Metodologia dos tubos corrugados para determinação da retração autógena em materiais cimentícios de alto desempenho contendo polímero superabsorvente (SAP) [Distrito Federal] 2019.

xvi, 103 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2019).

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto de alto desempenho

3. Polímero superabsorvente

2. Retração autógena

4. Cura interna

I. ENC/FT/UnB

II. Título (mestre)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BORGES, J. G. (2019). METODOLOGIA DOS TUBOS CORRUGADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO CONTENDO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP). Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-12A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Juliana Gonçalves Borges

TÍTULO: Metodologia dos tubos corrugados para determinação da retração autógena em materiais cimentícios de alto desempenho contendo polímero superabsorvente (SAP)

GRAU: Mestre ANO: 2019

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.

---

Juliana Gonçalves Borges

SRES Quadra 10, Bloco G-1, Casa 55, Cruzeiro Velho

70645-071 Brasília – DF, Brasil

E-mail: juliana.gborges@hotmail.com

## AGRADECIMENTOS

À toda minha família, em especial à minha mãe, dona Lúcia, pelo maior amor do mundo, por todos os ensinamentos, toda a paciência e o imensurável apoio à todas as minhas decisões.

Aos meus irmãos, Marcos, Matheus e Ronan, pela companhia diária, por ouvirem pacientemente todas reclamações e vibrarem com todas as conquistas. Incluo junto com eles o amigo Luiz Aidar, que em tanto tempo de amizade e tanta convivência, já considero um irmão.

Ao meu namorado, Nickolas, e às minhas amigas Thainá e Amanda, por torcerem sempre pelo meu sucesso e por estarem sempre presentes, na alegria e na tristeza.

À minha orientadora, professora Eugênia, por toda confiança, dedicação e paciência, desde o quinto semestre da graduação até a finalização do mestrado.

À amiga e companheira de pesquisa Lívia, que foi de fundamental importância para chegar até aqui. Foram muitos dias juntas no laboratório (e fora dele) e muitas viagens para tal, muitas conversas, muitas dúvidas, muita ajuda e muito apoio, sempre tentando me manter calma e focada. Obrigada por tudo!

À amiga Francielle, por me receber em sua casa em Goiânia em várias das viagens que fiz, sempre muito carinhosamente.

Aos demais amigos que estiveram e estão presentes nesse período tão difícil e importante da minha vida.

À Furnas Centrais Elétricas, pela oportunidade, e principalmente à equipe de lá, sempre nos recebendo tão bem e sempre dispostos a ajudar em tudo que era preciso. Sem eles nada seria possível.

Ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) e seu corpo docente, pela oportunidade de fazer esse mestrado e todo conhecimento que me foi passado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

### METODOLOGIA DOS TUBOS CORRUGADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO CONTENDO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP)

**Autora:** Juliana Gonçalves Borges

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup> Dra. Eugênia Fonseca da Silva

**Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, junho de 2019**

O concreto de alto desempenho (CAD) deve possuir alta resistência, alta trabalhabilidade e alta durabilidade, características que só foram possíveis de serem alcançadas devido à diminuição da relação água/cimento ( $a/c$ ), graças ao uso de aditivos superplastificantes; ao uso de adições minerais; e a otimização da granulometria dos agregados. Porém, o alto consumo de aglomerantes, a baixa relação  $a/c$  e as adições minerais altamente reativas causam um refinamento dos poros devido à maior presença de produtos de hidratação, o que densifica a microestrutura, aumentando a demanda de água e potencializando a autodessecação, o que resulta em maiores níveis de retração e fissuração nos CADs. Devido à sua microestrutura de poros compacta, a cura externa tem pouco efeito na redução da retração autógena nesses concretos. A cura interna, no entanto, compensa o fraco papel da cura externa, sendo o polímero superabsorvente (SAP) considerado o agente mais eficiente para tal. Na literatura existem várias metodologias para a determinação da retração autógena, porém, só foi normatizado o método dos tubos corrugados, por meio da norma ASTM C1698-09 (2014). Tal técnica, entretanto, ainda não foi implementada no Brasil. Assim, este trabalho se propõe a torná-la operacional e avaliar sua eficácia em pastas de cimento e microconcretos de alto desempenho contendo SAP. Foram desenvolvidas quatro misturas, duas pastas de cimento e dois microconcretos, sendo um traço de referência e um contendo SAP para cada material cimentício. Determinou-se o tempo zero por dois métodos distintos (taxa de desenvolvimento da deformação e propagação do pulso ultrassônico) e a retração autógena também por dois métodos (tubos corrugados e prismas). Avaliou-se ainda as propriedades mecânicas (resistência a compressão e módulo de elasticidade) e a cinética da hidratação (calorimetria isotérmica). A metodologia dos tubos corrugados se mostrou uma excelente alternativa para determinação da retração autógena, pois apresentou resultados bastante coerentes com os esperados. Tal metodologia ainda permite se determinar o tempo zero já a partir de sua curva de deformação, evitando a necessidade de um ensaio extra para tal. A adição do SAP aos microconcretos causou uma redução das propriedades mecânicas, de 45% para a resistência mecânica e 31% para o módulo de elasticidade, em relação à referência. Já o ensaio de calorimetria comprovou a participação da água de cura interna do SAP nas reações de hidratação, corroborando a fixação de uma relação  $a/c$  total para as misturas desta pesquisa.

**Palavras chave:** concreto de alto desempenho, retração autógena, polímero superabsorvente, tubos corrugados.

## **ABSTRACT**

### **METHODOLOGY OF CORRUGATED TUBES FOR DETERMINATION OF AUTOGENOUS SHRINKAGE IN HIGH PERFORMANCE CIMENTITIOUS MATERIALS CONTAINING SUPERABSORVENT POLYMER (SAP)**

**Author: Juliana Gonçalves Borges**

**Supervisor: Prof<sup>a</sup> Dra. Eugênia Fonseca da Silva**

**Post-Graduate Program on Structures and Civil Construction**

**Brasília, June 2019**

High performance concrete (CAD) must have high strength, high workability and high durability, characteristics that were only possible due to the reduction of water/cement ratio (w/c), thanks to the use of superplasticizer additive; the use of mineral additions; and the optimization of aggregate granulometry. However, the high binder consumption, the low w/c ratio and highly reactive mineral additions cause a pore refinement due to the greater presence of hydration products, which densifies the microstructure, increasing water demand and enhancing self-desiccation, which results in higher levels of shrinkage and cracking in CADs. Because of its compact pore microstructure, external curing has little effect on reducing autogenous shrinkage in these concretes. Internal cure, however, compensates for the weak role of external cure, with superabsorbent polymer (SAP) being considered the most efficient agent for this. In the literature there are several methodologies for the determination of autogenous retraction; however, only the corrugated tube method was standardized by ASTM C1698-09 (2014). This technique, however, has not yet been implemented in Brazil. Thus, this work proposes to make it operational and to evaluate its effectiveness in high performance cement pastes and fine-grained concrete containing SAP. Four blends, two cement pastes and two fine-grained concretes were developed, one reference mixture and one containing SAP for each cementitious material. Time zero was determined by two different methods (rate of deformation development and ultrasonic pulse propagation) and autogenous shrinkage by two methods too (corrugated tubes and prisms). The mechanical properties (compressive strength and modulus of elasticity) and hydration kinetics (isothermal calorimetry) were also evaluated. The methodology of the corrugated tubes proved to be an excellent alternative for the determination of the autogenous shrinkage, since it presented results very coherent with those expected. Such methodology still allows to determine time zero from its curve of deformation, avoiding the need of an extra test for such. The addition of SAP to fine-grained concretes caused a reduction of mechanical properties, 45% for mechanical strength and 31% for modulus of elasticity, relative to the reference. The calorimetry assay confirmed the participation of SAP entrained water in the hydration reactions, corroborating the fixation of a relation w/c total for the mixtures of this research.

**Keywords:** high performance concrete, autogenous shrinkage, superabsorbent polymer, corrugated tubes.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	2
1.2	OBJETIVOS .....	3
1.2.1	Objetivo Geral.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos.....	3
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	4
2.1	CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTO DESEMPENHO .....	4
2.2	VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS .....	8
2.2.1	Deformações não-autógenas .....	9
2.2.2	Deformações autógenas .....	9
2.3	RETRAÇÃO AUTÓGENA .....	11
2.3.1	Mecanismos da retração autógena .....	14
2.3.2	Fatores influentes na retração autógena .....	17
2.3.3	Métodos de determinação da retração autógena .....	21
2.3.4	Estratégias mitigadoras da retração autógena .....	25
2.4	O POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP).....	26
2.4.1	Cura interna com polímero superabsorvente (SAP) .....	30
2.5	TEMPO ZERO .....	32
2.5.1	Métodos de determinação do tempo zero .....	34
2.6	CALORIMETRIA POR CONDUÇÃO ISOTÉRMICA .....	37
3	METODOLOGIA .....	40
3.1	Variáveis de estudo.....	41
3.1.1	Variáveis independentes ou de controle .....	41
3.1.2	Variáveis dependentes ou de resposta.....	42
3.2	Matriz experimental.....	43
3.3	Materiais .....	43



3.3.1	Cimento.....	44
3.3.2	Sílica ativa.....	45
3.3.3	Agregado miúdo – Areia.....	46
3.3.4	Aditivo Superplastificante (SP) .....	46
3.3.5	Polímero Superabsorvente (SAP) .....	47
3.4	Composição das misturas .....	48
3.4.1	Produção das pastas de cimento.....	49
3.4.2	Produção dos microconcretos .....	50
3.4.3	Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.....	51
3.5	Métodos de ensaio .....	52
3.5.1	Tempo zero .....	52
3.5.2	Retração autógena.....	57
3.5.3	Resistência a compressão e módulo de deformação .....	62
3.5.4	Calorimetria por condução isotérmica .....	62
4	RESULTADOS E ANÁLISES .....	65
4.1	Tempo zero .....	65
4.1.1	Taxa de desenvolvimento da deformação.....	65
4.1.2	Propagação do pulso ultrassônico .....	67
4.1.3	Comparação entre os métodos de determinação do tempo zero .....	70
4.2	Retração autógena.....	71
4.2.1	Metodologia dos tubos corrugados .....	71
4.2.2	Metodologia dos prismas .....	76
4.2.3	Comparação entre as metodologias de determinação da retração autógena.....	79
4.3	Calorimetria.....	81
4.4	Propriedades mecânicas.....	85
4.4.1	Resistência a compressão.....	85
4.4.2	Módulo de elasticidade .....	86

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO.....	88
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	90
	REFERÊNCIAS.....	91
	APÊNDICE A – Modelo de Powers e quantidade de água incorporada .....	98
	APÊNDICE B – Resultados individuais de retração autógena.....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Edifício Burj Khalifa, em Dubai, acessado em <a href="https://historiacivil.wordpress.com/">https://historiacivil.wordpress.com/</a> .....	6
Figura 2.2: Tipos de sistemas segundo os conceitos de termodinâmica (adaptado de Silva (2007)).....	8
Figura 2.3: Organograma com a classificação das deformações volumétricas em meios cimentícios, onde: $dm$ = variação de massa; $dw$ = variação de trabalho; $dq$ = variação de temperatura (Silva (2007) adaptado por Santos (2016)).....	9
Figura 2.4: Evolução da microestrutura em função do tempo para um concreto com baixa relação $a/c$ (MANZANO <i>et al.</i> (2014) adaptado de VERNET e CADORET (1992)).....	13
Figura 2.5: Diagrama esquemático da tensão capilar (WU <i>et al.</i> , 2017) .....	15
Figura 2.6: Efeito da relação água/cimento na retração autógena de concretos de alto desempenho (ZHANG, TAM e LEOW, 2003). .....	19
Figura 2.7: Dilatômetro (ASTM C1698-09, 2014) .....	24
Figura 2.8: Esquema para determinação da retração autógena (adaptado de SILVA (2007)).	25
Figura 2.9: Polímero seco e a mesma quantidade de polímero após a absorção de água (MÖNNIG, 2009).....	26
Figura 2.10: Representação esquemática da evolução da hidratação do SAP (ou PSA) em meio cimentício em função do tempo: (a) Primeiros 5 minutos – dispersão homogênea de partículas de cimento, água, SAP e agregado; (b) de 5 a 10 minutos – o SAP alcança a absorção final; (c) Após 7 dias – a água é liberada para a matriz cimentícia, causando redução do volume do SAP, permanecendo um poro praticamente vazio (adaptado de Mönnig (2009)).....	28
Figura 2.11: Relação água incorporada/cimento necessária para evitar a autodessecação em função da relação $a_{bas}/c$ para diferentes relações sílica/cimento ( $s/c$ ). .....	31
Figura 2.12: Representação dos estágios desde a mistura do cimento com água, passando pelos tempos de pega e endurecimento (SILVA, 2007). Adaptado. ....	33
Figura 2.13: Representação esquemática das noções da teoria da percolação: a) eventos isolados, b) formação de aglomerados e c) primeiro caminho sólido (ACKER, 1988).....	33
Figura 2.14: Representação esquemática dos estágios da deformação de uma pasta de cimento medida em equipamento linear até dois dias após adição de água (BETTENCOURT e GONÇALVES, 2010). .....	35
Figura 2.15: Esboço 3D do dispositivo para determinação da pega usando pulso ultrassônico (REINHARDT <i>et al.</i> , 2000) .....	36

Figura 2.16: Representação gráfica da curva de evolução de calor gerada durante as reações de hidratação de uma pasta de cimento (adaptado por Manzano (2016)).	37
Figura 3.1: Organograma das atividades do programa experimental.	40
Figura 3.2: Curva granulométrica da amostra selecionada.	46
Figura 3.3: Misturador mecânico modelo IKA RW 20 digital.	49
Figura 3.4: Procedimento de produção dos microconcretos. (a) Imprimação da betoneira, (b) materiais secos e água pesados para mistura, (c) superplastificante pesado para mistura e (d) verificação de espalhamento.	51
Figura 3.5: (a) Corpos de prova prismáticos de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm, utilizados para determinação da retração autógena (método dos prismas) com extensômetro elétrico embutido, (b) corpo de prova prismático 15 x 15 x 30 cm, utilizado para determinação do tempo zero (método da propagação do pulso ultrassônico) e (c) corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, utilizados para determinação de resistência a compressão e módulo de elasticidade.	52
Figura 3.6: Curva típica de deformação pelo tempo dos três corpos de prova nas 100 primeiras horas.	53
Figura 3.7: Curva típica de deformação pelo tempo em escala logarítmica dos três corpos de prova nas 100 primeiras horas, com o tempo zero ( $t_0$ ) ocorrendo em torno de 22 horas, conforme indicado.	54
Figura 3.8: Esquema da fôrma e da ligação dos transdutores do ensaio do pulso ultrassônico	55
Figura 3.9: Ensaio de propagação do pulso ultrassônico em execução.	56
Figura 3.10: Curva típica da velocidade da propagação do pulso ultrassônico pelo tempo.	56
Figura 3.11: Tubos corrugados utilizados para o ensaio de determinação da retração autógena.	57
Figura 3.12: Procedimento de ensaio do tubo corrugado. (a) Preenchimento do molde com auxílio de um funil, (b) adensamento da camada com haste metálica, (c) tudo completamente preenchido, (d) tampa com cola epóxi sendo colocada em contato com o material para fechamento do tubo, (e) fechamento do tubo e (f) fixação da tampa superior até secagem da cola.	58
Figura 3.13: Pesagem dos tubos corrugados preenchidos.	58
Figura 3.14: (a) Colocação dos corpos de prova no aparato de ensaio e (b) detalhe dos relógios zerados.	59
Figura 3.15: Fôrmas revestidas com folhas poliestireno expandido e com os extensômetros já instalados.	61

Figura 3.16: Corpos de prova selados e conectados a leitora de dados, em sala com temperatura e umidades controladas. ....	61
Figura 3.17: (a) Calorímetro de condução isotérmica Thermometric TAM AIR e (b) calorímetro conectado ao software aquisitor de dados PicoLog. ....	62
Figura 3.18: Processo de preparação para realização do ensaio de calorimetria: (a) pesagem da ampola vazia, (b) preenchimento da ampola com aproximadamente 5 g da mistura e (c) lacre das ampola. ....	64
Figura 3.19: Ilustração do método gráfico das tangentes. ....	64
Figura 4.1: Deformação dos três corpos de prova pelo método dos tubos corrugados do traço REF-P. ....	65
Figura 4.2: Deformação dos três corpos de prova pelo método dos tubos corrugados do traço REF-M. ....	66
Figura 4.3: Curva da velocidade de propagação do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero dos microconcretos (traços REF-M e SAP-M). ....	68
Figura 4.4: Retração autógena das pastas estudadas, desde o tempo zero até 28 dias, pela metodologia dos tubos corrugados. ....	72
Figura 4.5: Retração autógena dos microconcretos, desde o tempo zero até 28 dias, pela metodologia dos tubos corrugados. ....	74
Figura 4.6: Retração autógena das pastas e microconcretos estudados pela metodologia dos tubos corrugados. ....	76
Figura 4.7: Retração autógena dos microconcretos estudados, desde o tempo zero até 28 dias, pela metodologia dos prismas. ....	77
Figura 4.8: Retração autógena dos microconcretos estudados pela metodologia dos tubos corrugados e dos prismas. ....	80
Figura 4.9: Curvas de fluxo de calor liberado até 7 dias para as três pastas de cimento estudadas. ....	82
Figura 4.10: Curvas de fluxo de calor liberado até 2 dias para as três pastas de cimento estudadas. ....	82
Figura 4.11: Curvas de calor acumulado até 7 dias para as três pastas de cimento estudadas. ....	84

## LISTA DE TABELA

Tabela 3.1: Nomenclatura adotada para identificação dos traços .....	41
Tabela 3.2: Matriz experimental .....	43
Tabela 3.3: Caracterização química do cimento CPV ARI utilizado nesta pesquisa.....	44
Tabela 3.4: Caracterização física e mecânica do cimento CPV ARI utilizado nesta pesquisa.	45
Tabela 3.5: Caracterização química da sílica ativa utilizada nesta pesquisa. ....	45
Tabela 3.6: Caracterização físico-químicas do aditivo superplastificante fornecida pelo fabricante.....	47
Tabela 3.7: Características do polímero superabsorvente utilizado nesta pesquisa (MANZANO, 2016).....	48
Tabela 3.8: Composição das pastas de cimento e microconcretos.....	48
Tabela 3.9: Procedimento de mistura para as pastas de cimento. ....	50
Tabela 3.10: Procedimento de mistura para os microconcretos.....	50
Tabela 3.11: Especificações do equipamento TAM AIR utilizado nos ensaios. ....	63
Tabela 4.1: Resultados de tempo zero obtidos pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação das pastas e microconcretos estudados.....	66
Tabela 4.2: Resultados de tempo zero obtidos pelo método de propagação do pulso ultrassônico dos microconcretos.....	68
Tabela 4.3: Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade do pulso ultrassônico (NEVILLE, 2016). ....	69
Tabela 4.4: Resultados de tempo zero para as pastas e microconcretos estudados por ambos os métodos. ....	70
Tabela 4.5: Deformação autógena média, determinada pela metodologia dos tubos corrugados, para as idade de 1, 3, 7, 14 e 28 dias para as pastas e microconcretos estudados.....	72
Tabela 4.6: Deformação autógena média, determinada pela metodologia dos prismas, para as idade de 1, 3, 7, 14 e 28 dias para os microconcretos estudados .....	77
Tabela 4.7: Parâmetros extraídos das curvas calorimétricas das pastas de cimento estudadas. ....	83
Tabela 4.8: Resultados de resistência a compressão dos microconcretos estudados. ....	85
Tabela 4.9: Resultados de módulo de elasticidade dos microconcretos estudados.....	87

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

a/ag	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
a <sub>bas</sub> /c	Relação água/cimento básica
a <sub>inc</sub> /c	Relação água incorporada/cimento
a <sub>tot</sub> /c	Relação água/cimento total
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFm	Monossulfato (etringita secundária)
AFt	Trissulfato (Aguilha de etringita)
ASTM	American Society for Testing and Materials
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CaO	Óxido de cálcio (cal livre)
CAR	Concreto de Alta Resistência
CH/Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CP	Corpo de prova
CPV ARI	Cimento Portland tipo V Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização)
dm	Taxa de variação da massa
dq	Taxa de variação da temperatura
DTU	Universidade Técnica da Dinamarca
dw	Taxa de variação do trabalho
HPC	High performance concrete

LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB
MgO	Óxido de magnésio (Magnésio livre)
Mg-S-H	Silicato de magnésio hidratado
NBR	Norma Brasileira Registrada
NBR NM	Norma MERCOSUL
NS	Nanossílica
PECC	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
pH	Potencial hidrogeniônico (escala ácido-base)
SAP	Polímero Superabsorvente
s/c	Relação sílica/cimento
UR	Umidade Relativa
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (União Internacional dos Laboratórios e Especialistas em Materiais)
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício
SP	Superplastificante
T <sub>0</sub> /Tzero	Tempo zero
TC - RCC	RILEM Technical Committee - Recommendations for use of superabsorbent polymers in concrete construction (Comitê Técnico - recomendações de uso do polímero superabsorvente nas construções de concreto)
TC 196 - IC	RILEM Technical Committee 196 - Internal Curing (Comitê Técnico - Cura Interna)
TC 225-SAP	RILEM Technical Committee 225 - Superabsorbent Polymer (Comitê Técnico - Polímero Superabsorvente)
UnB	Universidade de Brasília
ZT	Zona de Transição



# 1 INTRODUÇÃO

O concreto de alto desempenho (CAD) não se trata de um material revolucionário, nem contém componentes que não sejam utilizados nos concretos convencionais; em vez disso, o concreto de alto desempenho é um aperfeiçoamento destes (NEVILLE, 2016).

Para ser considerado de alto desempenho, o concreto deve possuir alta resistência, alta trabalhabilidade e alta durabilidade. E o princípio básico para sua obtenção está fundamentado na diminuição da porosidade, por meio da modificação da estrutura dos poros, que só foi possível devido à diminuição da relação água/cimento ( $a/c$ ), graças ao uso de aditivos superplastificantes; ao uso de adições minerais; e a otimização da granulometria dos agregados (ISAIA, 2011).

O alto consumo de aglomerantes, a baixa relação  $a/c$  e as adições minerais altamente reativas causam um refinamento dos poros devido à maior presença de produtos de hidratação, o que densifica a microestrutura, aumentando a demanda de água e potencializa a autodessecação, o que resulta em maiores níveis de retração e fissuração nestes concretos (LOPES, 2011), podendo causar danos estruturais, estéticos, além de comprometer a durabilidade do material.

Estudos consideram a influência crítica da retração autógena limitada apenas ao concreto de alto e ultra alto desempenho, nos quais grande quantidade de materiais cimentícios e baixa relação água/aglomerante são aplicados e a autodessecação é altamente desencadeada na pasta (HOLT, 2005; MARUYAMA e TERAMOTO, 2013; JIANG *et al.*, 2014; WU *et al.*, 2017). A deformação autógena é maior nesses concretos devido ao desenvolvimento rápido de uma rede porosa e fina, dentro da pasta de cimento, que provoca uma tensão capilar mais elevada. Como as estruturas têm uma ou mais forma de restrição, o risco de fissuração no CAD é maior, sobretudo nas idades iniciais (MANZANO, 2016).

Para estes concretos, cuja microestrutura de poros é compacta, a cura externa tem pouco efeito na redução da retração autógena. A cura interna, no entanto, pode compensar o fraco papel da cura externa na fissuração precoce de CADs (WU *et al.*, 2017). O agregado leve e o polímero superabsorvente (SAP) são os dois materiais mais frequentemente utilizados para tal função, sendo, porém, o SAP considerado mais eficiente como agente regulador de água para cura interna (MECHTCHERINE *et al.*, 2013).

Os polímeros superabsorventes (SAPs) são um grupo de materiais poliméricos sintéticos que têm a capacidade de absorver uma quantidade significativa de líquido, a partir do ambiente

e de reter este líquido dentro da sua estrutura, sem se dissolver, até que haja uma queda na umidade relativa e o líquido seja então liberado (JENSEN e HANSEN, 2001a).

Na literatura existem várias metodologias para a determinação da retração autógena, porém, só foi normatizado o método do dilatômetro com tubos corrugados, desenvolvido por Jensen e Hansen (1995), por meio da norma ASTM C1698-09 (2014). A falta de padronização dificulta a interpretação e comparação de resultados, uma vez que as retrações autógenas apresentadas em diferentes publicações, por divergentes métodos, variam enormemente em magnitude e em sinal.

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho é parte integrante da linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção”, da área de Construção Civil, do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), da Universidade de Brasília. Desde o ano de 2008, o grupo de trabalho sobre retração autógena vem desenvolvendo estudos sobre estratégias mitigadoras da retração autógena em concretos de alta resistência, já tendo produzido um capítulo de livro (TOLEDO FILHO *et al.*, 2012), cinco dissertações de mestrado (ORDÓÑEZ, 2013; SUAREZ, 2015; COUTO, 2016; SANTOS, 2016; AGOSTINHO, 2017), duas teses de doutorado (MANZANO, 2016; FRANCINETE SILVA JUNIOR, 2017), além de artigos publicados em periódicos internacionais e em vários congressos nacionais e internacionais.

Embora os pesquisadores dessa linha de pesquisa já tenham demonstrado a eficiência do uso do SAP na mitigação da retração autógena, a metodologia para a determinação dessa propriedade ainda não é consenso, existindo assim uma dificuldade de comparação e interpretação dos resultados obtidos. Esses autores vêm utilizando a metodologia de determinação da retração autógena unidirecional horizontal proposta por Tazawa (1999) adaptada por Silva (2007) e Francinete Silva Junior (2017), mas que não possui normatização. A única metodologia normatizada para a determinação da retração autógena é a desenvolvida por Jensen e Hansen (1995) e normatizada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) em 2014 (C1698-09:2014).

Assim, embora existam trabalhos internacionais usando a metodologia normatizada pela ASTM C1698-09 (2014), não se tem conhecimento de que tal técnica já foi implementada no Brasil. Este trabalho se propõe então a torná-la operacional e avaliar sua eficácia em pastas de cimento e microconcretos de alto desempenho, contendo polímero superabsorvente (SAP).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral implementar no Brasil a técnica dos tubos corrugados para determinação da retração autógena proposta por Jensen e Hansen (1995) e normatizada pela ASTM C1698-09 (2014) e avaliar sua eficácia em pastas de cimento e microconcretos de alto desempenho.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar a eficácia da metodologia dos tubos corrugados, comparando o comportamento obtido em microconcretos com o determinado pela metodologia dos prismas de Tazawa (1999).
- Determinar experimentalmente o tempo zero, para balizar o início da determinação da retração autógena, utilizando o método da taxa de desenvolvimento da deformação (referente a metodologia dos tubos corrugados) e o método da propagação do pulso ultrassônico (referente a metodologia dos prismas).
- Caracterizar os microconcretos por meio dos ensaios de resistência a compressão e módulo de deformação.
- Investigar a influência da adição de SAP na cinética de hidratação das pastas de cimento pelo uso da técnica de calorimetria de condução isotérmica.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTO DESEMPENHO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo. Isaia (2011) apresenta as principais características que o destaca como material estrutural por excelência, sendo elas: versatilidade de moldagem, disponibilidade de matéria-prima, hiperestaticidade das estruturas, facilidade de execução, durabilidade, baixo custo e sustentabilidade na produção.

O principal concorrente do concreto como material de engenharia é o aço, por este ser mais duro e resistente do que aquele. Entretanto, o uso de concreto continua sendo expressivamente maior. Segundo Mehta e Monteiro (2014), as principais razões para tal são: sua excelente resistência à água, a versatilidade de formas e tamanhos de elementos que podem ser construídos e seu baixo custo e rápida disponibilidade, uma vez que seus materiais constituintes são de fácil acesso. Pode-se citar ainda sua menor necessidade de manutenção, maior resistência à fadiga e boa resistência ao fogo.

A maior desvantagem do concreto comum, feito com agregado natural, é a sua baixa relação resistência-peso quando comparado ao aço, sendo esta uma desvantagem econômica principalmente em projetos estruturais como edifícios altos, estruturas flutuantes e pontes com grandes vãos, pois o peso próprio da estrutura pode tornar-se tão expressivo a ponto de interferir na concepção do empreendimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Uma das maneiras de solucionar tal questão é o uso do concreto de alta resistência. Este começou a ser produzido a partir da década de 1970, com o advento dos aditivos redutores de água de alto desempenho, os chamados superplastificantes, que permitiram diminuir o teor de água de amassamento sem perda da trabalhabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014). O uso desses aditivos, associado ao emprego de adições minerais reativas, permitiu que a resistência do concreto fosse majorada e, assim, resolver a limitação das grandes construções em concreto.

Como vantagens do concreto de alta resistência tem-se a diminuição do volume total de concreto para uma mesma resistência do elemento; a conseqüente diminuição do peso próprio, que limitava a utilização do concreto em determinadas estruturas; e a menor quantidade de armaduras e formas, representando diminuição de custos. Pode-se citar ainda a vantagem do ganho de área livre devido à diminuição das dimensões dos pilares, podendo esta ser vendida, locada ou convertida em vagas de garagem, por exemplo, representando lucro (ISAIA, 2011).

O concreto é definido como sendo de alta resistência apenas com base na resistência à compressão à uma determinada idade. Na década de 1970, antes do advento dos

superplastificantes, concreto com 40 MPa ou mais de resistência à compressão aos 28 dias eram considerados de alta resistência. Em 2002, o Comitê em Concreto de Alta Resistência do Instituto Americano de Concreto (*ACI Committee on High Strength Concrete*) revisou essa definição de modo a incluir dosagens com resistência de projeto especificada em 55 MPa ou mais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

No Brasil, a ABNT NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2014), considera concretos estruturais aqueles com classes de resistência à compressão de 20 até 90 MPa e a ABNT NBR 8953, Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência (2015), apresenta classes de resistência à compressão de até 100 MPa, sendo considerados de alta resistência aqueles a partir de 55 MPa.

A alta resistência de um concreto, entretanto, não é suficiente para garantir sua durabilidade e desempenho adequado. Assim, em 1990, Mehta e Aïtcin sugeriram o termo concreto de alto desempenho – CAD (*high performance concrete*, em inglês) para concretos que possuíssem três propriedades essenciais: alta resistência, alta trabalhabilidade e alta durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O Comitê de Atividades Técnicas do Instituto Americano de Concreto (*ACI Technical Activities Committee*) apresentou, em 1998, uma definição um pouco diferente: *CAD é um concreto que atenda uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade que não pode ser atingida rotineiramente com o uso de componentes convencionais e práticas normais de mistura, lançamento e cura* (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Administração Federal Rodoviária dos Estados Unidos (*U.S. Federal Highway Administration – FHWA*) propôs ainda uma definição mais prática e útil: *o CAD é um concreto projetado para ser mais durável e, se necessário, mais resistente que o concreto convencional. Misturas de CAD são compostas essencialmente pelos mesmos materiais que os concretos convencionais, mas as proporções são projetadas para fornecer a resistência e a durabilidade necessárias para atender os requisitos ambientais e estruturais do projeto* (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Percebe-se que não há consenso quanto a definição do CAD, que pode ser mais abrangente ou mais restritiva em diversos aspectos de acordo com o autor.

Para efeitos práticos, grande parte da literatura adota como parâmetro definidor do CAD aos concretos que apresentam relação água/cimento ou água/aglomerante inferior a 0,4. Mais recentemente, Aïtcin (2008) definiu o CAD como um concreto “engenheirizado” no qual uma

ou mais características específicas são realçadas por meio de seleção e proporcionamento adequado de seus constituintes.

Os edifícios habitacionais e/ou comerciais foram os pioneiros no emprego de CAD (inicialmente CAR) pela maior facilidade em absorver a sua tecnologia mais avançada e, também, pela corrida contra o céu, em busca de recordes de alturas cada vez maiores (ISAIA, 2011).

O edifício mais alto do mundo até o momento é o Burj Khalifa, em Dubai, com 828 metros de altura e 160 pavimentos, Figura 2.1. Os primeiros 610 metros deste edifício foram construídos bombeando um CAD de 80 MPa e os últimos 218 metros com uma estrutura de aço. Foi o professor Kamal Khayat e seus assistentes da Universidade de Sherbrooke no Canadá que otimizaram a composição e a reologia desse concreto com os materiais disponíveis em Dubai (AITCIN, 2011).



Figura 2.1: Edifício Burj Khalifa, em Dubai, acessado em <https://historiacivil.wordpress.com/>

De acordo com Isaia (2011), o princípio básico para a obtenção de um CAD está fundamentado na diminuição da porosidade, por meio da modificação da estrutura dos poros. Que pode ser obtida pelas seguintes ações:

- diminuição da relação água/aglomerante e da quantidade total de água por  $m^3$  de concreto, pelo uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes;
- otimização da granulometria dos agregados para aumentar o esqueleto inerte e obter maior compacidade, utilizando-se agregados graúdos de menor diâmetro máximo e adequada composição granulométrica dos finos;

- reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas, pelo uso de adições minerais que provocam o refinamento dos poros e dos grãos, especialmente do silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Assim, é possível se obter uma microestrutura com poros de menor tamanho (refinamento das dimensões), diminuição da interconexão entre os poros (bloqueio dos canais), maior oposição à passagem de fluidos e, por fim, maior fixação de agentes dissolvidos pelo aumento das forças de superfície (potencial zeta). Como resultado, tem-se o aumento da compacidade, da resistência mecânica, da durabilidade e, portanto, do desempenho.

Para garantir tal densificação do concreto, incorpora-se à mistura partículas finas de modo a conferir ao CAD coesão e microestrutura densa. Essas partículas finas são preferencialmente as adições minerais, como a sílica ativa, o metacaulim ou alguns tipos de cinza de casca de arroz, também conhecidas como superpozolanas.

É importante atentar-se também à seleção dos agregados, principalmente os graúdos, pois ao aumentar-se a resistência dos concretos, a fase agregado começa a ser a parte menos resistente da mistura, limitando a resistência final do compósito.

De acordo com Isaia (2011), os concretos usuais se comportam como materiais homogêneos e isotrópicos, nos quais o elo mais fraco é a pasta de cimento hidratado ou a zona de transição. Isso se deve à elevada relação a/ag que acarreta uma microestrutura porosa, principalmente em torno do agregado. Por outro lado, os CADs atuam, essencialmente, como materiais compostos não isotrópicos, constituídos de pasta de cimento hidratado e agregados que podem ter propriedades mecânicas muito diferentes. Sua microestrutura é compacta, incluindo a zona de transição com o agregado graúdo, que é delgada ou mesmo inexistente. Assim, as propriedades mecânicas do agregado graúdo exercem grande influência nas propriedades finais do CAD.

A influência do agregado graúdo nas propriedades do CAD, entretanto, não será estudada neste trabalho, pois o mesmo será realizado apenas com pastas de cimento e microconcretos, avaliando assim apenas o efeito do agregado miúdo.

As propriedades dos CADs que mais os diferenciam dos concretos convencionais são: calor de hidratação liberado, retração autógena, cura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e comportamento sob altas temperaturas.

Esta dissertação avalia com maior enfoque a retração autógena, que é potencializada nos CADs devido à maior densificação da microestrutura, que aumenta a autodessecação,

mecanismo este que governa a retração autógena. Além da retração autógena, serão estudados o calor de hidratação, a resistência a compressão e o módulo de deformação. O estudo será feito em pastas e microconcretos de cimento Portland de alto desempenho.

## 2.2 VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS

A literatura técnica apresenta uma ausência de consenso no que diz respeito a terminologia adotada para designar os diferentes fenômenos de variação volumétrica que podem ocorrer num sistema cimentício, onde em diferentes trabalhos, um mesmo fenômeno pode ser designado por diferentes termos e um mesmo termo pode ser utilizado para diferentes fenômenos.

Neste trabalho adota-se a classificação e terminologia proposta por Silva (2007), a qual é baseada nos conceitos básicos da termodinâmica. Em tal proposta, o universo é dividido em duas partes: o sistema – parte do mundo na qual se tem interesse especial – e sua vizinhança – porção do universo que interage fortemente com o sistema –, separadas por uma fronteira, superfície que os separa e que determina o tipo do sistema. O sistema é considerado aberto quando matéria e energia são trocados (pela fronteira) entre sistema e vizinhança. Quando energia é trocada, mas existe conservação de massa, o sistema é dito fechado. Quando nem massa nem energia são trocados entre sistema e vizinhança o sistema é dito isolado (Figura 2.2).

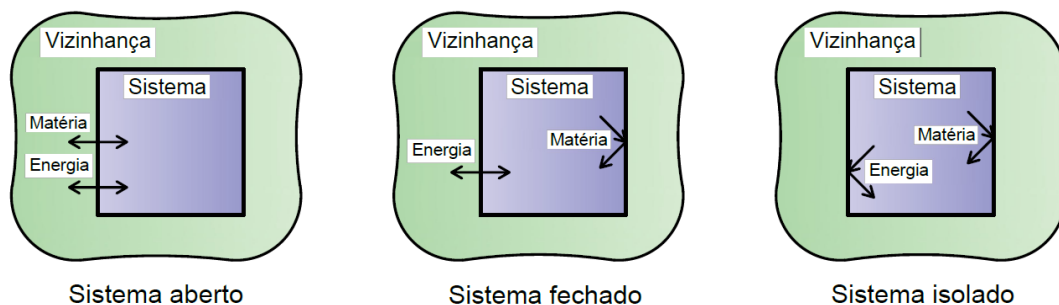


Figura 2.2: Tipos de sistemas segundo os conceitos de termodinâmica (adaptado de Silva (2007)).

Ainda segundo a classificação de Silva (2007), em sistemas isolados podem ocorrer apenas deformações autógenas e em sistemas abertos e fechados, além das deformações autógenas, podem ocorrer deformações não autógenas. A Figura 2.3 esquematiza a classificação.



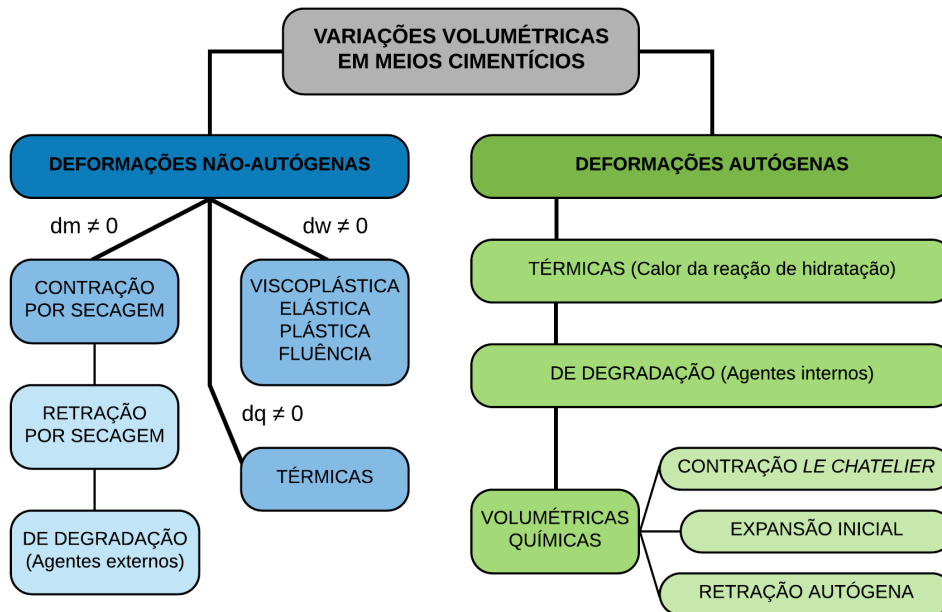


Figura 2.3: Organograma com a classificação das deformações volumétricas em meios cimentícios, onde:  $dm$  = variação de massa;  $dw$  = variação de trabalho;  $dq$  = variação de temperatura (Silva (2007) adaptado por Santos (2016)).

### 2.2.1 Deformações não-autógenas

As deformações não-autógenas são classificadas em função da variação de massa, de calor e de trabalho. No caso de sistemas abertos, podem ocorrer as três categorias. Em sistemas fechados podem ocorrer variações volumétricas devido à variação de calor e de trabalho. Nesse caso as deformações devido à variação de massa não ocorrem, pois, por definição, há conservação de massa.

As deformações não-autógenas, devido à variação de massa, podem ser do tipo contração e retração por secagem, se o material tem comportamento de suspensão ou de sólido, respectivamente, ou pode ser expansiva de degradação, devido a agentes externos (expansão com aporte externo de íons, no estado sólido). A contração e a retração por secagem são desenvolvidas pela evaporação ou sucção de água. As deformações não-autógenas, devido à variação de calor, são chamadas de deformações térmicas, devido ao aporte externo de calor e podem ocorrer durante todo o intervalo de hidratação. As deformações não-autógenas, devido à variação de trabalho, podem ser viscoplásticas, no estado de suspensão e, quando sólido, deformações elásticas, plásticas e por fluência (SILVA, 2007).

### 2.2.2 Deformações autógenas

Segundo a classificação adotada neste trabalho, em sistemas isolados podem ocorrer apenas deformações autógenas, as quais podem ser divididas em três categorias: volumétricas químicas, devido ao balanço volumétrico das reações de hidratação; térmicas, devido à

liberação de calor proveniente da reação de hidratação; e expansivas de degradação, devido a agentes internos (reação álcali-sílica, CaO e MgO livres, formação de etringita tardia, com fonte interna de liberação de sulfato).

Como este trabalho visa investigar a retração autógena em pastas de cimento e microconcretos de alto desempenho, um maior enfoque será dado às deformações autógenas volumétricas químicas, cuja classificação dependerá do estado do material: suspensão ou sólido. Enquanto suspensão, ocorre a Contração Le Chatelier e, quando sólido, a expansão inicial e a retração autógena (gerada pelo mecanismo da autodessecação).

A contração de Le Chatelier e a expansão inicial serão tratadas nos subtópicos a seguir (itens 2.2.2.1 e 2.2.2.2), já a retração autógena, foco desta pesquisa, será explorada mais detalhadamente em um tópico próprio – 2.3 RETRAÇÃO AUTÓGENA – onde diversos conteúdos relacionados ao tema serão abordados

#### 2.2.2.1 Contração Le Chatelier

Quando o material cimentício ainda está em suspensão, após as primeiras horas de hidratação acontece o primeiro estágio da retração química, a contração de Le Chatelier. Segundo Silva (2007), esta pode ser definida como o fenômeno físico-químico, decorrente do balanço volumétrico das reações de hidratação, que acontece quando a pasta está fluida e submetida à ação da pressão atmosférica, que “força” o líquido para se adaptar à forma do molde onde está inserido. O balanço volumétrico é devido ao fato da soma dos volumes molares iniciais de água e do componente anidro ser maior que o volume molar dos hidratos formados ( $V_{inicial} > V_{final}$ ). Como o material se comporta como um fluido, não se opõe às variações de volume impostas pela hidratação e não gera fissuração.

A hidratação do cimento Portland acarreta uma diminuição global de volume molar e Le Chatelier foi o primeiro a apresentar experimentalmente esse fenômeno, que então levou o seu nome (Contração Le Chatelier).

Cabe ressaltar que o termo aqui empregado para este tipo de deformação é ‘contração’, para diferenciar da terminologia ‘retração’, que é empregada quando o material apresenta um esqueleto mineral, rígido o suficiente para se opor às variações de volume, podendo levá-lo à fissuração.

### 2.2.2.2 Expansão inicial

Denomina-se expansão autógena inicial a variação volumétrica macroscópica que pode ocorrer em sistemas cimentícios com tempo de duração variando de algumas horas (após a transição suspensão-sólido) até cerca de duas semanas, dependendo da mistura. Cabe mencionar, que a expansão pode continuar ocorrendo microscopicamente e localmente por mais tempo, porém, a magnitude da retração autógena é maior, de modo que, no balanço geral, macroscopicamente, predomina a retração autógena, após o período mencionado. Também, pode haver expansão enquanto o material tem comportamento de suspensão, mas não recebem denominação especial por não serem relevantes ao estudo das deformações (SILVA, 2007).

Podem ser descritas possíveis justificativas do acontecimento da expansão inicial:

- crescimento de grandes cristais de hidróxido de cálcio e talvez agulhas de etringita: esta expansão pode ser atribuída à formação e ao crescimento de grandes cristais de hidróxido de cálcio e talvez agulhas de etringita (AFt), durante as reações de hidratação (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2002, apud MANZANO, 2016).

- formação do C-S-H interno: este mecanismo é baseado no C-S-H interno cujo volume é maior que o das porções de grãos anidros que eles substituem, e que requerem água de fora da borda dos grãos de cimento para sua formação (reações topoquímicas do  $C_3S$ ). Desse modo, esses produtos estão se desenvolvendo com um aumento no volume de sólido, ao contrário do C-S-H externo (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2002, apud MANZANO, 2016).

- redistribuição da água de exsudação abundante na superfície, que é redirecionada em direção ao interior do concreto; e pressão de disjunção, que faz os produtos de hidratação emergirem, devido à maior superfície total, incrementando a região onde a absorção é impedida (LURA, 2003).

## 2.3 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Em geral, a parte da retração que não inclui qualquer alteração de volume devido à perda ou ingresso de substâncias, variação de temperatura, aplicação de uma força externa ou restrição pode ser considerada como retração autógena. Também é referida como retração de autodessecação (WU *et al.*, 2017).

Segundo Silva (2007), a partir de um certo grau de hidratação, quando o material se torna suficientemente rígido para se opor às variações de volume, ou seja, após a transição suspensão-sólido (explicada detalhadamente no item 2.5), a diminuição de volume se torna incompatível

com as deformações mecanicamente admissíveis pelo esqueleto mineral recém formado. Há um aumento do volume gasoso dentro da porosidade da pasta de cimento, inicialmente saturada em água, devido ao fato do volume dos reagentes ser maior que o dos hidratos e pela saída de água dos poros para a hidratação. Este fenômeno é chamado de autodessecação e se traduz fisicamente por uma redução da umidade relativa interna (UR) do material e, mecanicamente, por uma retração global do material. Neste trabalho, o termo retração autógena será empregado para designar a retração causada pelo mecanismo de autodessecação.

Assim, retração autógena é a redução macroscópica de volume observada nos sistemas cimentício, após atingido o patamar de percolação (transição suspensão-sólido), provocada pelo mecanismo da autodessecação, gerando tensões capilares nos poros de água, fenômeno físico-químico dominante para seu aparecimento (SILVA, 2007).

Estudos consideram a influência crítica da retração autógena limitada apenas ao concreto de alto e ultra alto desempenho, onde a autodessecação é altamente desencadeada devido à grande quantidade de materiais cimentícios e à baixa relação água/aglomerante nesses materiais (HOLT, 2005; MARUYAMA e TERAMOTO, 2013; JIANG *et al.*, 2014; WU *et al.*, 2017). A deformação autógena é maior nesses concretos devido ao desenvolvimento rápido de uma rede porosa fina, dentro da pasta de cimento, que desenvolve tensão capilar mais elevada. Como as estruturas têm uma ou mais forma de restrição, o risco de fissuração no CAD é maior, sobretudo nas idades iniciais, podendo comprometer sua resistência, durabilidade e estética (MANZANO, 2016).

Na Figura 2.4 é apresentada a evolução da microestrutura de uma argamassa de cimento com baixa relação a/c, baseada em micrografias de Vernet e Cadoret (1992). Os estágios apresentados na Figura 2.4 foram descritos por Manzano (2016):

- No primeiro estágio (Figura 2.4.a) os grãos de clínquer começam a se hidratar formando o gel de cimento (C-S-H). Os íons sulfato, provenientes da dissolução da gipsita, se difundem pela água de amassamento. Observa-se uma elevada dissolução do C<sub>3</sub>A e também do sulfato de cálcio. Um gel rico em alumina e sílica é formado ao redor da superfície dos grãos de clínquer, logo após a mistura com água. São vistas pequenas hastes de etringita (AFt) primária.
- No segundo estágio (Figura 2.4.b) observa-se um crescimento renovado de cristais de AFt, eles são nitidamente mais acirculares do que aqueles formados anteriormente. A sua formação é associada com um ressalto de calor na curva de evolução do calor.

- Após cinco horas da adição da água na mistura (Figura 2.4.c), o C-S-H forma uma camada espessa em torno dos grãos de clínquer anidro. Com o prosseguimento da hidratação, os subconjuntos contínuos de grãos ligados mecanicamente (formados pelos hidratos e por grãos de cimento anidro e grãos não totalmente hidratados) se interligam, formando o primeiro caminho sólido contínuo de face a face e iniciando o endurecimento do material (patamar de percolação).

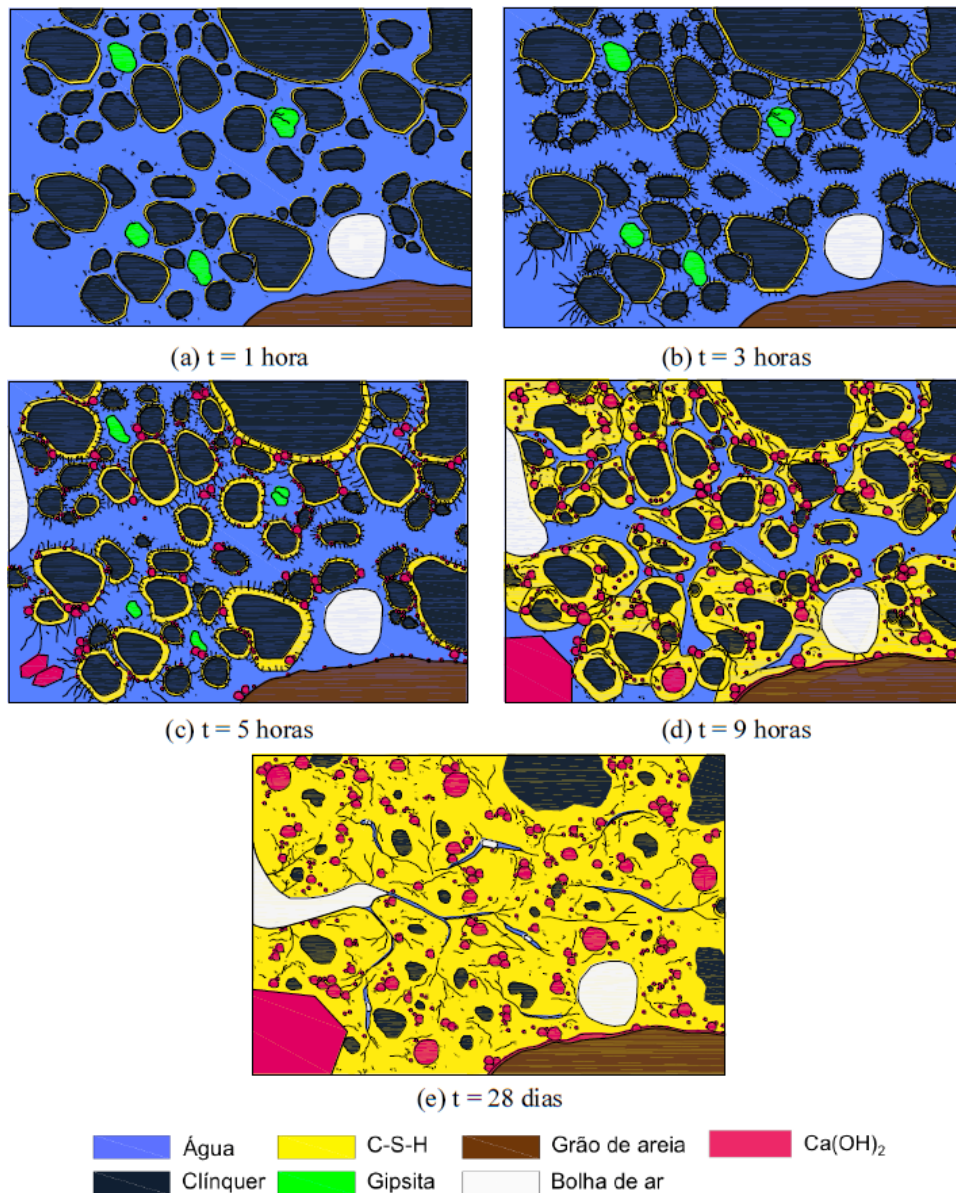


Figura 2.4: Evolução da microestrutura em função do tempo para um concreto com baixa relação a/c (MANZANO *et al.* (2014) adaptado de VERNET e CADORET (1992).

- Com o prosseguimento da hidratação (Figura 2.4.d) há aumento da espessura da camada dos produtos de hidratação formada. Além do C-S-H e Ca(OH)<sub>2</sub>, provenientes da hidratação do C<sub>3</sub>S, ocorre a dissolução da etringita e a formação de placas hexagonais de AFm, proveniente da reação do C<sub>3</sub>A com a etringita.

- À medida que o tempo passa (Figura 2.4.e) a água livre no interior dos poros do concreto vai diminuindo, decorrente da sua combinação com o cimento, até que os poros e capilares começam a não estar saturados e o concreto fica conservado num meio com umidade relativa inferior a 100%. A hidratação conduz à autodessecação, com os poros capilares se esvaziando pouco a pouco.

### 2.3.1 Mecanismos da retração autógena

Os mecanismos que levam à retração autógena ainda são pouco compreendidos. Embora haja um consenso geral sobre a existência de uma relação entre a retração autógena e as alterações na umidade relativa (UR) nos poros da pasta de cimento endurecida, os mecanismos reais ainda estão sendo discutidos. Para cada uma dessas abordagens, é necessário o conhecimento do desenvolvimento do volume de poros e da distribuição do tamanho dos poros, do estado da água nos poros capilares (livre ou adsorvida) e das propriedades mecânicas do esqueleto sólido à medida que a hidratação prossegue (LURA, 2003).

Segundo a literatura técnica, os três principais mecanismos que vêm sendo debatidos para compreender as forças geradoras da retração autógena são: a variação da depressão capilar (ou tensão capilar), a variação da tensão superficial e a variação da pressão de disjunção (MANZANO, 2016).

O mecanismo da variação da depressão capilar, ou tensão capilar, é o mais bem aceito, pois é baseado em estudos mecânicos e termodinâmicos (LURA, JENSEN e BREUGEL, 2003). Nesse, com o tempo, a água livre na matriz diminui gradualmente devido à hidratação progressiva do cimento e a umidade relativa interna diminui. Conseqüentemente, um grande número de poros é formado na pasta de cimento endurecida e a saturação da água nos poros decresce. Com a mudança no estado do poro capilar de saturado para insaturado, a superfície interna côncava do poro é submetida a uma pressão interna. A fim de deixar a superfície côncava em um estado de equilíbrio, a tensão capilar aumenta, ocorrendo assim a retração autógena (FISHER e ISRAELACHVILI, 1981). O mecanismo esquemático de retração autógena é mostrado na Figura 2.5.

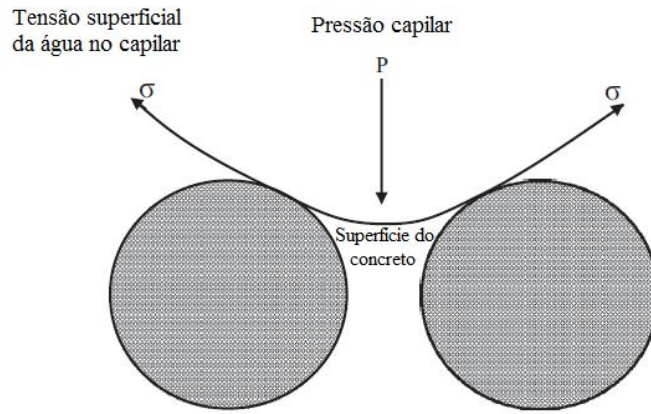


Figura 2.5: Diagrama esquemático da tensão capilar (WU *et al.*, 2017)

A pressão capilar pode ser calculada pela equação de Laplace (Eq. 2.1) e Kelvin (Eq. 2.2):

$$P_C - P_V = \Delta P = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$\frac{M}{\rho} \cdot \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos \theta = RT \ln \frac{P_0}{P_r} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

$\sigma$  – tensão superficial na interface líquido-gás;

$\theta$  – ângulo de contato líquido-sólido;

$P_C$  – pressão da água;

$P_V$  – pressão do vapor de água;

$P_0$  – pressão de vapor real;

$P_r$  – pressão de vapor saturado;

$r$  – raio hidráulico do capilar;

$M$  – peso molecular da água;

$\rho$  – densidade da água;

$R$  – constante do gás ideal;

$T$  – temperatura absoluta.

A teoria da tensão capilar em geral explica a retração autógena usando cinco fatores: estrutura de poros, umidade relativa, auto-tensão, grau de hidratação e estrutura de interface. Assim, as influências da baixa relação a/c e das adições minerais na retração autógena de CADs podem ser descritas pela teoria da tensão capilar, uma vez que esses afetam notavelmente os cinco fatores citados (WU *et al.*, 2017).

A estrutura dos poros, que inclui a porosidade, a distribuição do tamanho dos poros e a morfologia dos mesmos, desempenha um papel importante na retração autógena. As tensões de retração induzidas pelo consumo de água em poros de tamanhos distintos são diferentes. A conectividade dos poros também afeta diretamente a migração de umidade dos poros saturados para os insaturados, influenciando assim no desenvolvimento da retração. Nos CADs, a taxa decrescente do raio hidráulico crítico do capilar ainda é acelerada devido ao refinamento da estrutura de poros da pasta (MEDDAH e TAGNIT-HAMOU, 2009). As reações químicas melhoradas e a retração química correspondente também aumentam o consumo de água e desencadeiam uma tensão superficial adicional, que aumenta a tensão capilar e promove ainda mais as tensões de retração (KONG, ZHANG e LU, 2014).

A umidade relativa é outro fator influente que é mais enfatizado no CAD. A hidratação do cimento induz a redução da umidade relativa interna do concreto e, então, aumenta a pressão interna dos poros. Consequentemente, a água livre inicial na matriz (relação água/cimento) desempenha um papel importante na retração (KIM e LEE, 1999).

A influência da auto-tensão pode ser explicada com base na lei Hook ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ), onde deformação e módulo de elasticidade são variáveis físicas que determinam a tensão de retração no CAD. Li e Li (2014) estabeleceram uma relação inversa entre o módulo de elasticidade da micromatriz ao redor do capilar e a retração autógena. Eles relataram que tanto a força compressiva quanto o módulo de elasticidade aumentaram rapidamente nas idades iniciais e, em seguida, a taxa de desenvolvimento diminuiu, o que afetou a retração autógena. Como resultado, quaisquer fatores que afetem a estrutura da matriz nas idades iniciais podem induzir tensões de retração autógena. Esses fatores podem ser divididos em fatores internos, como o tipo de agregado e cimento, traço da mistura, relação água/cimento e aditivos, e fatores externos, como temperatura, umidade, condição de vedação e grau de restrição.

Já o grau de hidratação é amplamente influenciado pelo tipo e teor de cimento, adições minerais, relação água/aglomerante e temperatura. Muitos trabalhos têm aplicado diferentes técnicas, tais como análise microestrutural ou termodinâmica para medir ou modelar o grau de hidratação. Estudos anteriores abordaram a relação entre o grau de hidratação e a retração autógena em CADs através dos efeitos dos principais constituintes dos concretos ou métodos de cura na retração autógena (WU *et al.*, 2017), que serão melhor abordados no item 2.3.2 – Fatores influentes na retração autógena.



O último fator é a estrutura de interface. O concreto é um material compósito multifásico e o tipo, quantidade, tamanho, forma e distribuição de cada fase constituem a estrutura do concreto. A seção transversal do concreto exibe uma estrutura evidente de duas fases: diferentes tamanhos e formas de agregados; e a pasta de cimento hidratada. Mas a microestrutura da pasta de cimento endurecida próxima ao agregado apresenta notável inconsistência com pasta endurecida na matriz, e as principais propriedades do concreto só podem ser ilustradas quando a interface pasta de cimento-agregado é considerada a terceira fase da microestrutura, chamada também de zona de transição. Portanto, o concreto pode ser dividido em agregado, zona de transição e pasta de cimento endurecida. A estrutura do concreto depende da combinação desses três componentes após a moldagem, o desenvolvimento da idade e o grau de hidratação do cimento em determinadas circunstâncias que podem afetar a retração autógena. (WU *et al.*, 2017).

### 2.3.2 Fatores influentes na retração autógena

De modo geral, os mesmos fatores que afetam a evolução das propriedades mecânicas do concreto, afetam a retração autógena. Tazawa (1999) descreveu e estudou vários fatores que podem afetar a magnitude da retração autógena em materiais cimentícios, como por exemplo: a composição mineralógica do cimento, as adições minerais, os aditivos, os parâmetros de mistura, os agregados, o teor de ar incorporado, as condições de cura e o processo de fabricação. Neste trabalho serão descritos apenas os fatores mais influentes: o cimento, a adição de sílica ativa, a relação a/ag, o agregado, o aditivo superplastificante e o método de cura.

#### 2.3.2.1 Cimento

Um estudo de Tazawa e Miyazawa (1995) mostrou que a retração autógena de materiais à base de cimento pode ser prevista pela composição do cimento. A taxa de hidratação do  $C_3S$  e  $C_3A$  é rápida, e a liberação do calor de hidratação é alta e concentrada, então a estrutura do concreto é propensa a fissurar por gradiente de temperatura no estágio inicial. Mais tarde, o consumo de água interlamelar, bem como a redução de volume dos produtos de hidratação, promovem maior retração.

Na hidratação do  $C_3A$ , os resultados mostraram que a liberação de calor foi ainda maior do que a do  $C_3S$ , com uma rápida evolução do calor e uma alta velocidade de condensação, que não apenas causaria grande deformação térmica, mas também aumentaria a retração autógena e de secagem do concreto (MEHTA e BURROWS, 2001). No geral, o impacto do  $C_3A$  é o mais dominante, seguido pelo  $C_3S$ ,  $C_4AF$  e  $C_2S$  (VAN BREUGEL e VAN TUAN, 2015).

Juntamente com a demanda por concreto de alta resistência, a finura do cimento moderno aumentou incessantemente. Entretanto, um estudo de Bullard *et al.* (2011) mostrou que a finura aumentada e a maior área superficial específica do cimento diminuíram a umidade relativa em um ritmo mais alto, e a correspondente retração autógena foi maior. Este processo pode ser atribuído à hidratação acelerada do cimento e consequente consumo de água da matriz, levando a um declínio na umidade relativa, de modo a intensificar a pressão capilar e a retração autógena.

### 2.3.2.2 Sílica ativa

Jensen e Hansen (1996) mostraram que a taxa de retração autógena em CAD no estágio inicial de hidratação aumentou com o incremento no teor de sílica ativa. Eles relataram que a retração autógena de uma pasta de cimento (relação a/ag de 0,23) aumentou com o conteúdo cumulativo de sílica ativa na faixa de 0% – 20%. Com presença de 10% de sílica ativa, a retração autógena dos corpos de prova foi de cerca de 3 vezes maior que a da pasta comum aos 28 dias.

Uma tendência semelhante foi observada em um estudo de Zhang *et al.* (2003), onde o efeito de 5% e 10% de sílica ativa em três proporções diferentes de água/aglomerante (0,26; 0,30 e 0,35) foi testado. Os resultados mostraram que a retração autógena aumentou com o crescimento do conteúdo de sílica ativa e a mesma foi ainda mais afetada quanto menor a relação a/c.

Três mecanismos podem ser usados para explicar os resultados:

(1) O conteúdo mais rico de sílica ativa refina a estrutura de poros, aumentando a quantidade de poros menores, e assim resultando na retração autógena dos espécimes.

(2) Durante a hidratação do clínquer, o CH formado é parcialmente distribuído nos poros interlamelares do gel C-S-H e restringe a cadeia. A adição de sílica ativa consome o CH e a estrutura porosa de C-S-H é formada. Os poros vazios causados pelo consumo do CH enfraquecem seu efeito de restrição na estrutura do C-S-H e aumentam a retração da pasta de cimento endurecida (MAZLOOM, RAMEZANIANPOUR e BROOKS, 2004).

(3) Na terceira visão, a sílica ativa atua como um aditivo ativo superfino, que acelera a reação de hidratação do cimento. A grande área superficial da sílica ativa causa sua rápida combinação com a água de mistura, acelerando o consumo de água no espaço poroso da pasta de cimento e reduzindo a umidade relativa no interior da matriz, o que intensifica o processo de autodessecação (RAO, 2001).

### 2.3.2.3 Relação água/aglomerante

A relação água/aglomerante tem uma influência notável no concreto de alto desempenho. CADs com baixa relação a/ag, inferior a 0,4, são mais propensos à retração autógena (ZHANG, TAM e LEOW, 2003). A Figura 2.6 mostra a influência da relação água-aglomerante no CAD. Eles mostraram que uma redução na a/c de 0,35 para 0,30 resultou em um aumento significativo na retração autógena, enquanto uma redução adicional na a/c, passando para 0,26, não causou um incremento tão grande na retração.

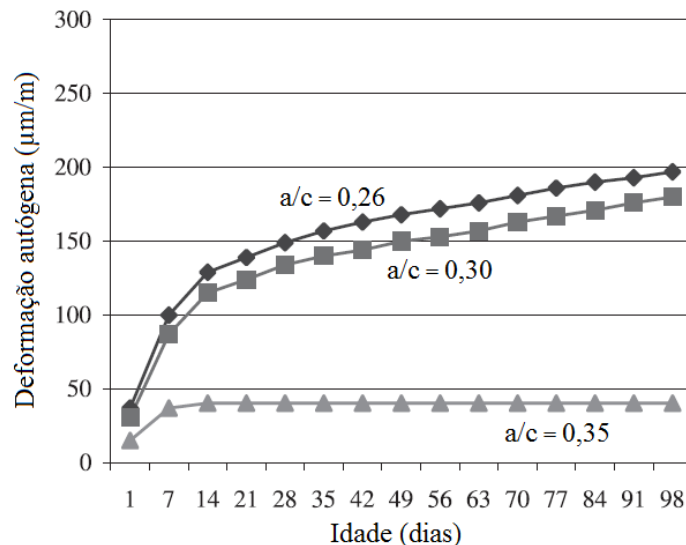


Figura 2.6: Efeito da relação água/cimento na retração autógena de concretos de alto desempenho (ZHANG, TAM e LEOW, 2003).

A redução da relação a/ag reduz a umidade relativa interna da pasta de cimento, particularmente nas idades iniciais, e conseqüentemente a um aumento significativo do efeito da autodessecação. Com tal diminuição da relação a/ag, o volume total de poros também reduz e a estrutura de poros é refinada. Isso induz a redistribuição da água em direção ao interior dos poros mais finos, acelerando a redução do raio crítico e aumentando a pressão capilar negativa e a retração autógena (WU *et al.*, 2017).

O raio crítico é definido como o tamanho mínimo que deve ser formado por átomos ou moléculas agrupadas (em uma matriz de gás, líquido ou sólido) antes que uma inclusão de nova fase (uma bolha, uma gotícula ou uma partícula sólida) seja estável e comece crescer.

### 2.3.2.4 Agregados

A retração autógena de concreto também é controlada pelos agregados. Os agregados fornecem restrições durante a retração da pasta e, portanto, uma pressão é formada na interface da pasta com superfície do agregado nas direções normal e tangente. O campo de tensão é gradualmente transferido da superfície do agregado para a pasta, e a superfície da interface fica

sob a tensão máxima. Se a tensão de retração for grande o suficiente, rachaduras ao longo da superfície do agregado na direção normal aparecem nessa interface (WU *et al.*, 2017).

No CAD, devido ao efeito restritivo do agregado na deformação do cimento, a retração autógena do concreto é inferior à da pasta de cimento. Os resultados da pesquisa de Tazawa e Miyawawa (1995) mostraram que para CADs com alta trabalhabilidade e durabilidade, a redução na quantidade de materiais cimentícios juntamente com o aumento no volume de agregado com maior módulo de elasticidade podem diminuir a retração autógena do concreto.

#### 2.3.2.5 Agentes redutores de água

Na premissa de manter a trabalhabilidade, a adição de agentes redutores de água diminui a relação água/cimento e, portanto, aumenta a possibilidade de ocorrência de retração autógena (TAM, TAM e NG, 2012). Holt (2005) relatou que a adição de 1% de superplastificante à argamassa com a/c de 0,3 aumentou a retração autógena em quase 30%. A autora relacionou a maior retração autógena das amostras com superplastificante à melhor dispersão do cimento e maior velocidade das reações de hidratação na matriz. Por outro lado, a menor retração de espécimes sem adição do aditivo foi atribuído ao aumento da heterogeneidade, como formações de aglomerados entre agregados e seu efeito de restrição interna.

#### 2.3.2.6 Métodos de cura

Para concreto de alto desempenho com estrutura compacta de poros, a cura externa tem pouco efeito na redução da retração autógena. A cura interna, no entanto, pode compensar o fraco papel da cura externa na fissuração precoce do CAD. Recentemente, está disponível uma extensa revisão da literatura sobre a cura interna e seus efeitos na retração nas idades iniciais do CAD (LIU *et al.*, 2017).

A cura interna do concreto refere-se à introdução de água extra pela adição de materiais absorventes no concreto. Quando a umidade relativa interna cai, a água absorvida pode gradualmente ser liberada na matriz para compensar o consumo de água dentro da pasta de cimento, portanto, a umidade interna do concreto pode ser mantida em um nível alto. Por esse mecanismo, a autodessecação pode ser mitigada, e a retração autógena pode ser efetivamente reduzida. Materiais comumente usados para cura interna incluem xisto poroso, agregado cerâmico e materiais poliméricos com alta absorção de água (WU *et al.*, 2017).

Os polímeros superabsorventes (SAPs) são novos materiais poliméricos com alta absorção de água e estrutura de rede espacial. Os SAPs são materiais de cura interna ideais,

com alta taxa de absorção, pouca influência na resistência e fácil de desidratar (JENSEN e HANSEN, 2002).

Bentz *et al.* (2013) mostraram que a incorporação do SAP poderia formar uma fonte interna estável de suprimento de água na pasta. Devido à sua suficiente finura, ele poderia ser distribuído uniformemente no concreto para inibir expansão e retração desiguais e reduzir a formação de microfissuras. A adição do SAP teve um efeito significativo na redução da retração autógena do CAD.

### 2.3.3 Métodos de determinação da retração autógena

Na literatura existem várias metodologias para a determinação da retração autógena, porém, só foi normatizado o método do dilatômetro em tubo corrugado, de Jensen e Hansen (1995), pela ASTM C1698-09 (2014), o qual este trabalho visa implementar no Brasil.

A falta de padronização da metodologia para determinação da retração autógena dificulta a interpretação e comparação de resultados, uma vez que quando apresentados em diferentes publicações, por divergentes métodos, variam enormemente em magnitude e sinal. Segundo Silva (2007), essa discrepância entre os resultados é causada principalmente por dois fatores:

- (1) variação com relação ao tempo de início da determinação da retração autógena; e
- (2) variação com relação ao que está sendo determinado com o procedimento adotado (muitas vezes se mede não somente a retração autógena, mas a soma de autógena com a contração Le Chatelier).

De acordo com Jensen e Hansen (2001b), as determinações da deformação autógena têm sido realizadas fundamentalmente de duas formas diferentes: determinação da deformação volumétrica e determinação da deformação linear.

#### 2.3.3.1 Determinação volumétrica

A determinação volumétrica da deformação autógena é frequentemente realizada por meio da colocação da pasta de cimento ou argamassa frescas em um balão de borracha apertado e imerso em água. A alteração do volume da pasta ou argamassa é medida pela quantidade de água deslocada pela amostra imersa (JENSEN e HANSEN, 2001b). Tal método é utilizado apenas em pastas e argamassas, uma vez que o agregado graúdo dos concretos poderia danificar o balão de borracha.

Segundo Jensen e Hansen (2001b) uma vantagem do método volumétrico é a possibilidade de iniciar as determinações imediatamente após a moldagem das amostras. Entretanto, isso faz com que se esteja medindo primeiramente a contração Le Chatelier – ou seja, aquela que ocorre antes do tempo zero – somada à retração autógena, o que eleva bastante o resultado.

Uma desvantagem do método é a falta de um contato constante entre o balão de borracha e a pasta de cimento. Uma película de água, por exemplo, devido a exsudação ou ar aprisionado na superfície da pasta de cimento, pode obstruir significativamente este contato. Durante o processo de hidratação, a água ou ar aprisionado será sugado de volta para a pasta de cimento como consequência da contração Le Chatelier. Desta forma, a redução do volume interno pode também ser erroneamente medida como uma deformação externa; já que o volume do balão de borracha é o volume combinado da pasta de cimento e o volume da água de superfície ou ar aprisionado. Como a contração Le Chatelier é consideravelmente maior do que a retração autógena, isso pode levar a um erro substancial (JENSEN e HANSEN, 2001b).

Outra desvantagem é que as membranas de borracha normalmente utilizadas no método volumétrico não são totalmente impermeáveis a água. Desse modo, a água pode penetrar através da membrana e preencher os vazios internos oriundos da contração de Le Chatelier, resultando no aumento da massa submersa ou na redução do nível de água que são interpretados como retração volumétrica. Essa absorção de água pela membrana de borracha porém pode ser evitada pelo uso de parafina líquida como fluido para imersão da amostra (JENSEN e LURA, 2007).

#### 2.3.3.2 Determinação linear

A determinação linear da deformação autógena é frequentemente realizada com a colocação da pasta de cimento em um molde rígido com baixo atrito. A variação de comprimento da pasta é registrada por um transdutor de deslocamento, no final da amostra (JENSEN e HANSEN, 2001b). Tal método é aplicável em pastas, argamassas e concretos.

Segundo Jensen e Hansen (2001b) uma vantagem do método linear é a ancoragem firme dos pontos de medição no material. Entretanto, nesse caso as determinações devem ser realizadas logo após o tempo zero.

Os equipamentos e sistemas de medidas de deformação linear encontrados na literatura para a determinação da variação autógena são muito variados: LVDTs (linear variable differential transformers), extensômetros elétricos embutidos, relógios comparadores, medidores de corda vibrante e sensores à laser.

Hammer *et al.* (2002), dividiram os vários tipos de equipamentos e sistemas de determinação da deformação linear em seis grupos:

(1) moldado com pregos (Cast in nails) por meio de um furo no meio das placas finais com as cabeças dos pregos embutidos em uma viga de concreto;

(2) placas terminais móveis com tampões (plugs) em uma viga de concreto;

(3) transversal horizontal moldado em barras através de uma viga de concreto;

(4) barras verticais fundidas numa laje de concreto;

(5) extensômetro elétrico de resistência embutido;

(6) pratos metálicos colocadas em cima dos cilindros;

Para determinar a retração autógena nesta pesquisa, será utilizado o método dos tubos corrugados proposto por Jensen e Hansen (1995), e normatizado pela ASTM C1698-09 (2014), que é a primeira metodologia padronizada. Também será determinada a retração autógena pelo método dos prismas de Tazawa (1999) para que possa ser feita uma comparação do comportamento das pastas e microconcretos pelas duas metodologias.

### 2.3.3.3 Metodologia dos tubos corrugados

O primeiro dos métodos, desenvolvido por Jensen e Hansen (1995), será chamado neste trabalho de método dos tubos corrugados. E se trata do único método normatizado até o momento, pela norma ASTM C1698-09 (2014).

Este método consiste na preparação de uma amostra de pasta ou argamassa recém-misturada usando um molde corrugado que oferece pouca resistência à variação de comprimento da amostra. O molde é selado para evitar a perda de umidade e a amostra é armazenada a temperatura constante. Começando no momento do final de pega, o comprimento da amostra é medido usando um dilatômetro. A variação no comprimento é registrada em intervalos de tempo regulares até a idade designada. A variação no comprimento e o comprimento original da amostra são usados para calcular a retração autógena (ASTM C1698-09, 2014).

A Figura 2.7 apresenta o dilatômetro com uma pasta de cimento em ensaio e o molde corrugado.

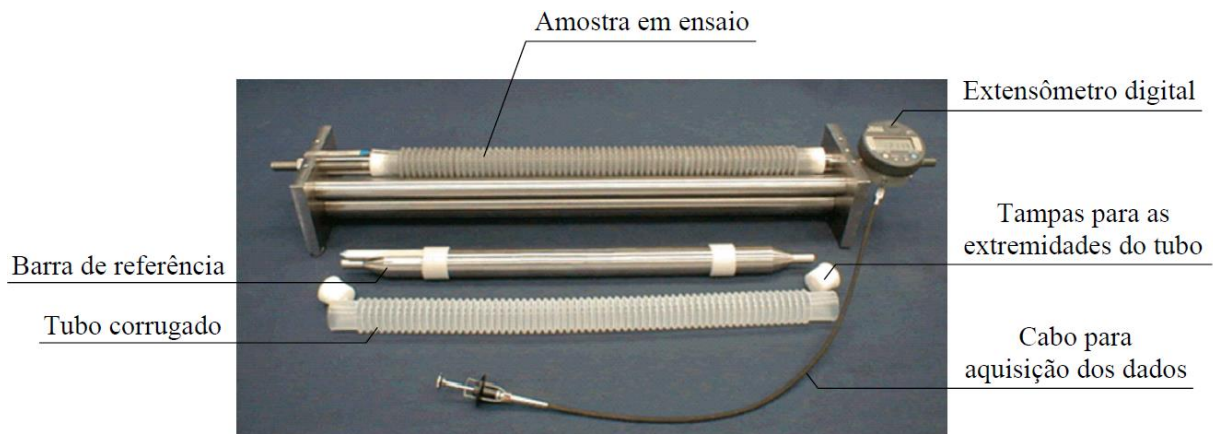


Figura 2.7: Dilatômetro (ASTM C1698-09, 2014)

Os moldes consistem em tubos de plástico corrugados, cujos pequenos diâmetros limitam as diferenças de temperatura que podem surgir durante a hidratação dos materiais cimentícios. Os tubos de plástico são feitos de polietileno de baixa densidade (PE) e têm ondulações triangulares para minimizar a restrição na direção longitudinal. O molde é bem fechado com dois tampões cônicos nas extremidades.

O dilatômetro consiste de três hastes de aço inoxidável e duas placas de extremidade de aço inoxidável. Durante a medição, a amostra de teste é posicionada horizontalmente e é suportada longitudinalmente pelas duas hastes superiores.

Um medidor mede as variações de comprimento em uma extremidade da amostra. A faixa de medição do medidor deve ser de pelo menos 10 mm e a resolução deve ser de pelo menos 0,0025 mm, correspondendo a uma resolução de cerca de 6  $\mu\text{m}/\text{m}$  para a deformação calculada.

As medições no dilatômetro são realizadas em relação ao comprimento da barra de referência, feita de Invar. E seu comprimento real deve ser marcado permanentemente na barra.

#### 2.3.3.4 Metodologia dos prismas

Já o segundo método utilizado nesta pesquisa, proposto por Tazawa (1999), será chamado neste trabalho de método dos prismas. É o método quem vem sendo utilizado até o momento pelos pesquisadores da linha de pesquisa na qual este trabalho de insere, porém não é normatizado.

Neste método, utiliza-se, em vez de um tubo corrugado, um molde prismático de aço, cuja largura e altura devem ter dimensão de pelo menos 3 vezes a dimensão máxima do agregado graúdo, no caso da determinação em concreto, e o comprimento deve ser maior que 3,5 vezes a altura e a largura. O molde também é selado para evitar a perda de umidade e a amostra é armazenada a temperatura constante.



A fôrma deve possuir um orifício no centro de uma das placas laterais de menor dimensão para passagem do fio de aquisição de dados. E deve também ser previamente forrada com folhas de poliestireno expandido, de modo a não restringir o movimento do material dentro da mesma.

A retração do material cimentício é medida automaticamente por um extensômetro embutido na amostra, instalado de modo a coincidir com o eixo longitudinal do molde. As leituras devem ser iniciadas no tempo zero, determinado previamente, em intervalos regulares até os 28 dias de idade.

O esquema do ensaio é apresentado na Figura 2.8.

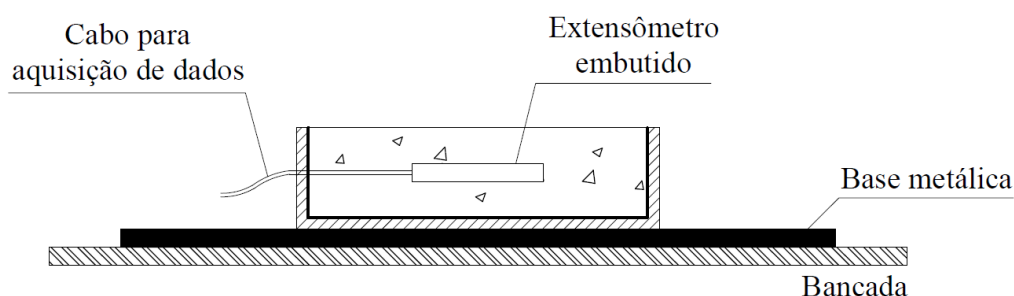


Figura 2.8: Esquema para determinação da retração autóloga (adaptado de SILVA (2007)).

#### 2.3.4 Estratégias mitigadoras da retração autóloga

Para concretos de alto desempenho, cuja microestrutura de poros é compacta, a cura externa tem pouco efeito na redução da retração autóloga. A cura interna, no entanto, pode compensar o fraco papel da cura externa na fissuração precoce de CADs (WU *et al.*, 2017). Recentemente, Liu *et al.* (2017) publicaram extensa revisão da literatura sobre a cura interna e seus efeitos na redução da retração em idades precoces de CADs.

A cura interna do concreto trata-se da introdução de água pela adição de materiais absorventes no concreto. Quando a umidade relativa interna cai, essa água, anteriormente absorvida, pode gradualmente ser liberada para matriz, compensando o consumo de água dentro da pasta. Assim, a umidade interna do material pode ser mantida em um nível alto. Por esse mecanismo, a autodessecação pode ser combatida, e a retração autóloga pode ser efetivamente reduzida (WU *et al.*, 2017).

O agregado leve e o polímero superabsorvente (SAP) são os dois materiais internos mais frequentemente utilizados. Neste trabalho, seguindo a linha de pesquisa na qual o mesmo se insere, foi utilizado o polímero superabsorvente como agente de cura interna para combater a retração autóloga.

## 2.4 O POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP)

Segundo Jensen e Hansen (2001a), os polímeros superabsorventes (SAPs) são um grupo de materiais poliméricos sintéticos que têm a capacidade de absorver uma quantidade significativa de líquido a partir do ambiente e de reter este líquido dentro da sua estrutura sem se dissolver. São utilizados principalmente para a absorção de água e soluções aquosas. Cerca de 95% da produção mundial de SAP é para uso como absorvente de urina nas fraldas descartáveis. Os SAPs podem apresentar uma absorção de água de até 5000 vezes o seu próprio peso. No entanto, em soluções salinas diluídas, tais como a urina, a capacidade de absorção dos produtos comerciais é de aproximadamente 50 g/g.

Os SAPs são polieletrólitos reticulados que começam a inchar em contato com água ou soluções aquosas, resultando na formação de um hidrogel. Na prática da engenharia, os SAPs são, na sua maioria, poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas, ou poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados (FRIEDRICH, 2012). A Figura 2.9 ilustra a capacidade de absorção de um polímero superabsorvente.



Figura 2.9: Polímero seco e a mesma quantidade de polímero após a absorção de água (MÖNNIG, 2009).

Para um melhor entendimento do conceito da utilização dos SAP como agentes de cura interna, é fundamental o conhecimento da cinética da migração de água dentro e fora das partículas de SAP. Os mecanismos de transporte de água para a partícula SAP são: a pressão osmótica, a interação eletrostática, a entropia, a ação capilar e a interação de Coulomb, que dependem da natureza química do polímero. Quando um SAP de ligação cruzada é introduzido num meio aquoso, as unidades iônicas dissociam-se e criam uma densidade de carga ao longo das cadeias que geram repulsões eletrostáticas que tendem a expandir o gel e promovem o inchamento. Além disso, é produzida uma elevada concentração de íons no gel, o que causa uma pressão osmótica que irá ser reduzida pela diluição da carga, isto é, pelo inchamento do gel (MANZANO, 2016).

O SAP se apresenta em duas fases distintas: colapsado e saturado. A transição de fase é um resultado de um equilíbrio competitivo entre as forças repulsivas que atuam de modo a expandir a rede polimérica e as forças de atração que atuam para diminuir a mesma. Vários mecanismos estão envolvidos neste processo. A pressão osmótica determina a movimentação de água do lado mais saturado para o menos saturado, devido à elevada concentração de íons, promovendo o ingresso de água no interior do polímero.

A matriz macromolecular de um SAP é um polieletrólito, ou seja, um polímero com grupos ionizáveis que podem dissociar-se em solução. Por esta razão a concentração iônica no interior é elevada, o que gera um fluxo de água para o seu interior. A salinidade da solução aquosa é de especial importância para o inchamento do SAP. Os íons na solução podem alterar as interações inter e intramoleculares dos polieletrólitos devido à proteção das cargas na cadeia de polímero. Além disso, como a concentração de íons fora do SAP aumenta, a pressão osmótica no interior do gel diminui, conduzindo a uma redução do inchamento (JENSEN e HANSEN, 2001a).

Propriedades importantes dos SAP incluem capacidade de absorção, a força e o módulo de elasticidade do gel dilatado. Todas essas propriedades dependem de quão reticulada é a rede do polímero. O tamanho das partículas também influencia na capacidade de absorção, já que o tempo gasto na saturação está diretamente ligado à sua granulometria. Partículas muito grandes podem ter sua eficiência reduzida devido ao tempo insuficiente para absorção durante a mistura, enquanto partículas muito finas podem apresentar menor absorção devido à superfície menos ativa (JENSEN e HANSEN, 2001a).

Na dessorção, ocorre o fluxo ao contrário, ou seja, do interior do SAP para o meio cimentício, que se encontra menos saturado que o interior do polímero devido ao consumo da água pelas reações de hidratação. Assim, o SAP libera a água em seu interior para a pasta, causando a redução do inchamento e diminuindo seu volume. Este processo é representado esquematicamente na Figura 2.10.

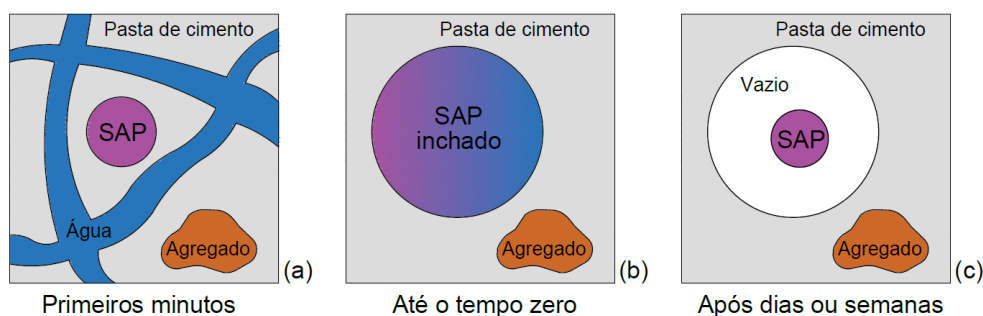


Figura 2.10: Representação esquemática da evolução da hidratação do SAP (ou PSA) em meio cimentício em função do tempo: (a) Primeiros 5 minutos – dispersão homogênea de partículas de cimento, água, SAP e agregado; (b) de 5 a 10 minutos – o SAP alcança a absorção final; (c) Após 7 dias – a água é liberada para a matriz cimentícia, causando redução do volume do SAP, permanecendo um poro praticamente vazio (adaptado de Mönnig (2009)).

Neste trabalho, considera-se água incorporada como sendo a água adicionada a mistura para cura interna, tendo o SAP como agente de cura interna. Então serão utilizadas três nomenclaturas distintas de relação  $a/c$ : a relação água incorporada/cimento ( $a_{inc}/c$ ), referente apenas à água adicionada para cura interna; a relação água/cimento básica ( $a_{bas}/c$ ), referente à água da mistura, é a relação  $a/c$  tradicionalmente conhecida; e a relação água cimento total ( $a_{tot}/c$ ), sendo esta a soma das duas primeiras.

A adição de SAP pode afetar negativamente as propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido, sendo de maior importância para este trabalho o impacto causado no estado endurecido, em especial nas propriedades mecânicas.

O efeito do SAP nas propriedades mecânicas foi amplamente estudado por Silva (2007), Santos (2016), Manzano (2016), Francinete Silva Júnior (2017), entre outros. De acordo com os estudos realizados, como era esperada, a resistência à compressão dos microconcretos de referência sempre foi maior, nas diversas idades, comparadas com as misturas com adição de SAP. Os teores mais elevados de SAP provocaram maior redução na resistência à compressão. Este efeito na resistência pode ser explicado pela modificação da microestrutura da pasta de cimento, após a liberação da água do SAP, deixando vazios maiores e, portanto, aumentando a sua porosidade.

Vários dos estudos sobre o impacto do SAP, porém, acrescentam água extra à mistura para cura interna do polímero, que eleva a relação  $a_{tot}/c$  da mistura, uma vez que posteriormente esta água é liberada pelo polímero e participa das reações de hidratação. Esses estudos, ao analisar a resistência a compressão dos materiais, comparam as misturas contendo SAP com misturas de referência que não consideram a água extra, ou seja, a relação  $a/c$  da mistura com SAP ( $a/c_{bas} + a/c_{inc}$ ) é maior que a relação  $a/c$  da mistura de referência, que é apenas  $a/c_{bas}$ .

Assim, acaba-se fazendo uma comparação injusta entre as misturas, na qual a mistura com SAP acaba apresentando menor resistência não só pela adição, mas também pela maior relação a/c.

Atentos à essa possibilidade, em alguns estudos (MECHTCHERINE *et al.*, 2013; MANZANO, 2016) foi feita a comparação das misturas contendo polímero superabsorvente com uma mistura de referência (sem polímero) com uma relação a/c igual à relação a/c total da mistura com polímero. Comparação esta mais apropriada e que não penaliza as misturas com polímero.

Mechtcherine *et al.* (2013) fizeram uma mistura com adição de 0,3% de polímero em relação à massa de cimento, correspondendo a uma relação  $a_{inc}/c$  de 0,06. Essa mistura foi comparada com duas misturas de referência, uma com relação a/c de 0,30 e outra com relação a/c de 0,36. Os autores observaram que, comparando a mistura contendo polímero com a mistura de referência de relação a/c 0,30, a perda de resistência foi de 10% e 20% para os 7 e 28 dias de idade, respectivamente. Enquanto que, ao comparar com a mistura de referência de relação a/c 0,36, a perda de resistência foi de 6% e 12%, também para os 7 dias e 28 dias de idade, respectivamente.

Manzano (2016) em seu trabalho de doutorado, estudou a influência da adição do polímero superabsorvente nas propriedades mecânicas de argamassas de alta resistência, comparando com duas relações água/cimento de referência, de 0,30 e 0,35. O autor observou que, a adição de 0,3% de polímero, com relação  $a_{bas}/c$  de 0,30 e  $a_{inc}/c$  de 0,05, representou uma redução na resistência de 26% e 22%, aos 7 e 28 dias de idade, respectivamente, quando comparado com a mistura de referência com relação a/c 0,30. Enquanto que, ao comparar com a mistura de referência com relação água/cimento 0,35, essa redução foi de apenas 6% e 8%.

Conclui-se assim que o uso do polímero superabsorvente como adição em materiais cimentícios causa uma perda na resistência devido ao aumento na porosidade, consequência dos vazios deixados após o desinchamento do SAP. Esta perda, porém, é majorada quando se compara a mistura contendo o polímero com uma referência de menor relação a/c, chegando a triplicar a perda real de resistência.

Sikora e Klemm (2015) também não adicionaram água de cura interna para as misturas contendo SAP, mantendo assim para todas as misturas a/c total iguais. Sua pesquisa confirmou que a adição de SAP influencia as propriedades reológicas, a retração autógena e o desenvolvimento da microestrutura, porém depende do seu tipo e da capacidade de absorção e dessorção. As autoras

também concluíram que a utilização de materiais pozolânicos em conjunto com o SAP altera significativamente o processo de desenvolvimento da microestrutura.

#### 2.4.1 Cura interna com polímero superabsorvente (SAP)

Jensen e Hansen (2001a) foram os primeiros pesquisadores a apresentarem o uso de polímeros superabsorventes como agente de cura interna em materiais cimentícios. Para tanto, fizeram uma releitura do modelo de Powers (POWERS e BROWNYARD, 1948) para explicar o princípio da técnica da água incorporada no combate à autodessecação.

De acordo com Jensen & Hansen (2001a), o volume de água necessário para evitar a autodessecação e, portanto, a retração autógena, é a quantidade necessária para manter as condições saturadas em uma pasta de cimento durante o endurecimento, de acordo com o modelo da Powers (POWERS e BROWNYARD, 1948). Neste caso, a hidratação é interrompida devido à falta de espaço para acomodar o gel C-S-H. Assim, a hidratação para quando o processo de autodessecação ainda nem começou.

A quantidade de água incorporada necessária para se obter o máximo grau de hidratação pode ser calculada a partir da Equação 2.3 (JENSEN e HANSEN, 2001a):

$$\frac{a_{inc}}{c} = 0,18 \cdot \frac{a_{bas}}{c}, \quad \text{para } \frac{a_{bas}}{c} \leq 0,36 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Da mesma forma, as considerações de Jensen e Hansen (2001a) foram estendidas por Lura (2003) para uma pasta de cimento com adição de sílica ativa. Segundo o autor, para misturas contendo sílica ativa, esta poderia levar a uma autodessecação adicional, resultando em uma maior retração autógena. Nesse caso, a quantidade de água necessária para a cura interna é ainda maior. Este montante pode ser estimado usando o modelo de Powers modificado com a adição de sílica ativa (JENSEN e HANSEN, 2001a), como explicado no Apêndice A. Uma suposição fundamental (e forte limitação) deste modelo é que o grau de reação do cimento e da sílica ativa é o mesmo durante todo o processo de hidratação.

A Figura 2.11 mostra a relação  $a/c$  incorporada necessária para evitar a autodessecação em função da relação  $a_{bas}/c$  nas pastas de cimento com diferentes relações sílica/cimento ( $s/c$ ). Este gráfico pode ser usado para projetar a quantidade de água a ser incorporada em uma mistura contendo SAP.

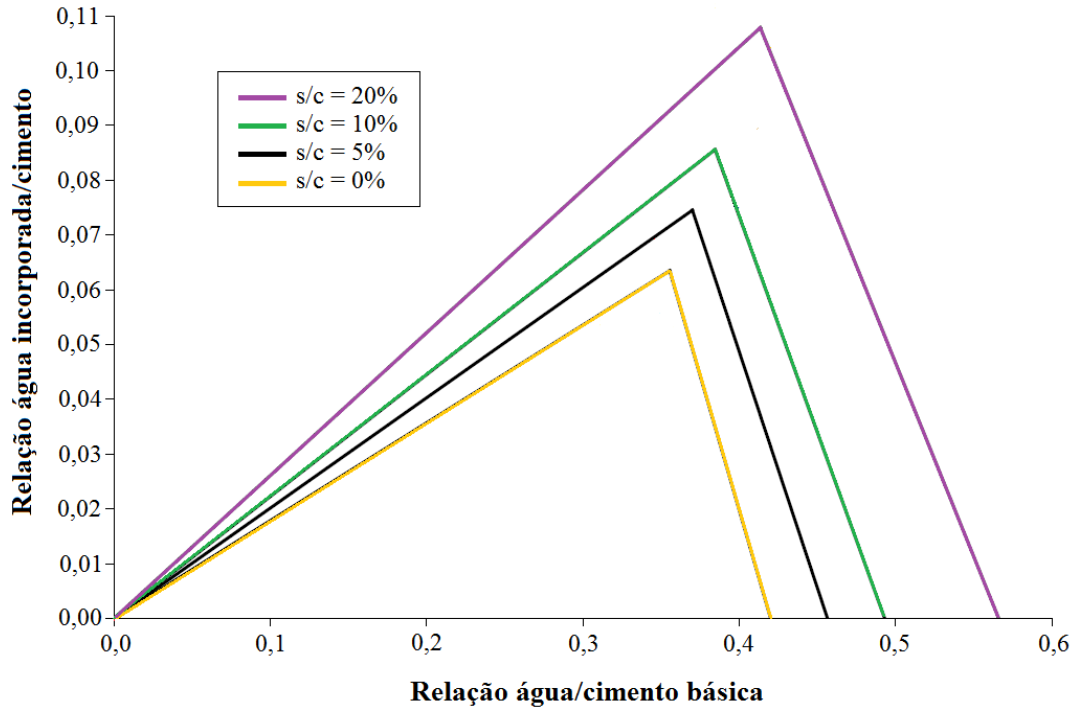


Figura 2.11: Relação água incorporada/cimento necessária para evitar a autodessecação em função da relação  $a_{bas}/c$  para diferentes relações sílica/cimento ( $s/c$ ).

Percebe-se que, de acordo com o modelo, o grau máximo de hidratação atingível é reduzido pela adição da sílica ativa em cada relação  $a_{bas}/c$ , devido à absorção de uma parte da água capilar na superfície do gel pozolânico de C-S-H. A água absorvida fica indisponível para a hidratação do cimento. Entretanto, como a reação pozolânica produz uma grande retração química, a quantidade de água incorporada necessária é significativamente aumentada pela adição de sílica ativa, como mostrado na Figura 2.11.

Para pastas com adição de sílica ativa, as equações para a determinação da quantidade de água incorporada necessária para impedir a retração autógena são:

$$\frac{a_{inc}}{c} = \frac{0,2 + 0,69 \cdot (s/c)}{1,12 + 0,88 \cdot (s/c)} \cdot \left(\frac{a_{bas}}{c}\right), \quad \text{para } \frac{a_{bas}}{c} \leq 0,36 + 0,28 \cdot \frac{s}{c}$$

(Eq. 2.4)

$$\frac{a_{inc}}{c} = \left(0,42 + 0,73 \cdot \frac{s}{c}\right) - \left(\frac{a_{bas}}{c}\right), \quad \text{para } \left(0,36 + 0,28 \cdot \frac{s}{c}\right) \leq \frac{a_{bas}}{c} \leq \left(0,42 + 0,73 \cdot \frac{s}{c}\right)$$

(Eq. 2.5)

onde  $s/c$  = relação sílica ativa/cimento.

A partir das equações 2.4 e 2.5, pode se determinar teoricamente a relação água incorporada/cimento para evitar a retração autógena de uma pasta de cimento com adição de sílica ativa. E a partir dessa água incorporada, pode se estabelecer a quantidade de polímero

superabsorvente para reter tal quantidade de água e assim evitar a retração autógena da mistura, uma vez que se conhece a absorção de água do polímero.

Neste trabalho, fixou-se a relação a/c total, em 0,35, pois considera-se que toda água disponível, sendo ela água adicionada para mistura ou para a cura interna com polímero, participará das reações de hidratação. Sendo assim, modificando-se a Equação 2.4 para calcular a relação água incorporada/cimento em função da relação água cimento total, temos:

$$\frac{a_{inc}}{c} = \frac{0,2 + 0,69 \cdot (s/c)}{1,12 + 0,88 \cdot (s/c)} \cdot \left( \frac{a_{tot} - a_{inc}}{c} \right), \quad \text{para } \frac{a_{tot} - a_{inc}}{c} \leq 0,36 + 0,28 \cdot \frac{s}{c}$$

(Eq. 2.6)

Para a relação sílica/cimento de 6%, adotada nesta pesquisa, obtém-se uma relação  $a_{inc}/c$  de 0,060. Levando em consideração ainda que a absorção do polímero utilizado é de 15 gramas de água por grama do SAP, necessita-se de um teor de 0,4% de polímero em relação à massa de cimento para que não haja retração autógena.

Assim, no programa experimental, será adotado um teor de 0,4% de SAP como teor que em teoria elimina completamente a retração autógena das misturas, com a relação água/cimento total de 0,35 fixa.

## 2.5 TEMPO ZERO

Inicialmente, é importante a definição da terminologia que será utilizada neste trabalho. A pega é a mudança do material cimentício de um estado fluido para um estado sólido (NEVILLE, 1997). Esse termo também é utilizado para designar o enrijecimento da pasta de cimento. De acordo com Metha e Monteiro (2014), o enrijecimento da pasta, e finalmente a pega e o endurecimento, é a perda de consistência plástica ou a perda de água livre do sistema, e está associado à formação dos produtos de hidratação, à adsorção superficial dos produtos pouco cristalinos (etringita e C-S-H) e à evaporação. O início de pega marca o tempo em que a pasta se torna não trabalhável. Entretanto, a pasta não se solidifica repentinamente, necessita de um tempo considerável para se tornar totalmente rígida, tal tempo marca o fim de pega. Finalmente, o endurecimento é o ganho de resistência com o tempo, que é contado após o fim de pega. A Figura 2.12 ilustra a representação gráfica desses termos.



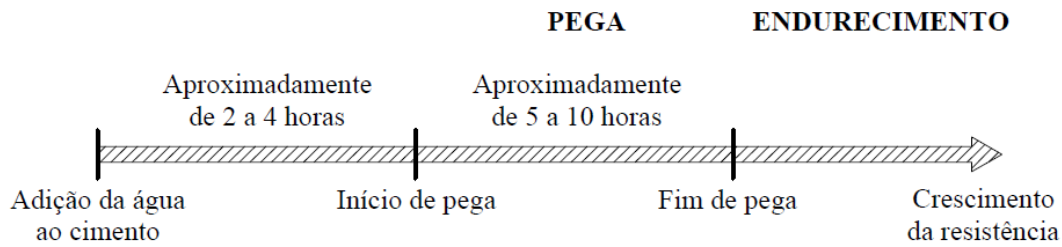


Figura 2.12: Representação dos estágios desde a mistura do cimento com água, passando pelos tempos de pega e endurecimento (SILVA, 2007). Adaptado.

Embora os termos pega e endurecimento sejam úteis para a prática do concreto, os tempos de início e fim de pega são arbitrários e não fornecem uma definição precisa da idade na qual as tensões podem ser transferidas nos elementos de concreto, fundamental para o caso da retração autógena. A determinação precisa desse tempo é de suma importância para a área experimental e área numérica (SILVA, 2007).

Em 1988, Acker desenvolveu uma teoria que permite simular a hidratação do cimento e estimar a pega, a teoria da percolação de Acker. Quando a água é misturada com o cimento, começam as reações de hidratação. Em torno aos grãos que estão em suspensão, formam-se produtos de hidratação e aleatoriamente surgem ligações mecânicas entre eles formando aglomerados (Figura 2.13 - a e b). Quando se forma o primeiro caminho contínuo de grãos mecanicamente ligados, atravessando o subconjunto de face a face, é constituído o patamar de percolação (Figura 2.13 - c). Teoricamente, o material passa de ser líquido a sólido.

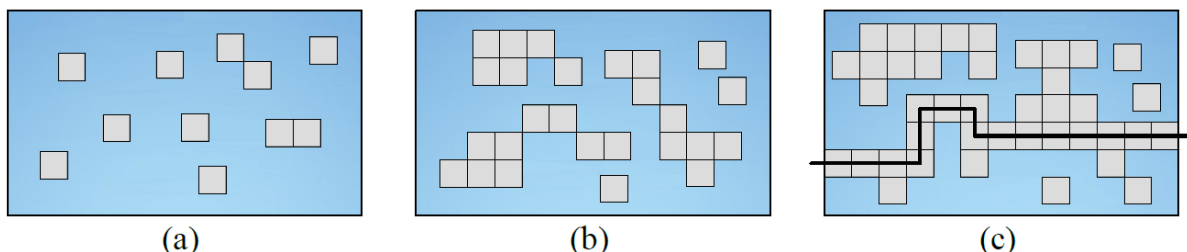


Figura 2.13: Representação esquemática das noções da teoria da percolação: a) eventos isolados, b) formação de aglomerados e c) primeiro caminho sólido (ACKER, 1988).

O termo patamar de percolação ou tempo zero ( $t_0$ ) é então definido como o intervalo de tempo decorrido desde o instante em que a água entra em contato com o cimento, até o instante no qual o concreto desenvolve uma estrutura suficientemente rígida para se opor às variações de volume, impostas pela hidratação, e permite a transferência de tensões de tração através do concreto (SILVA *et al.*, 2010).

As variações dimensionais que acontecem antes do tempo zero normalmente não têm 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 provocadas por todo o material cimentício se o elemento estrutural estiver externamente restringido (BENTUR, 2001). A partir deste momento, a deformação autógena deixa de se chamar contração Le Chatelier e passa a se chamar retração autógena, marcando o momento de início das determinações experimentais da retração autógena.

Neste trabalho será utilizada essa mesma definição de patamar de percolação, ou tempo zero, proposta por Silva *et al.* (2010).

### 2.5.1 Métodos de determinação do tempo zero

Existem diferentes métodos para determinar o tempo de pega de materiais cimentícios, entre eles destaca-se: a resistência à penetração, a curva calorimétrica, a emissão acústica, a condutividade elétrica, a resistividade elétrica, a variação da umidade relativa interna, a velocidade de pulso ultrassônico e a taxa de desenvolvimento de deformação.

Alguns destes métodos são arbitrários e não levam em conta as condições reais do material cimentício, podendo gerar grandes diferenças de resultado quando comparados com o tempo zero ( $t_0$ ). Um exemplo disto é o método da agulha de Vicat padronizado pela norma ANBT NBR NM 65 (2003), realizado numa pasta de consistência normal e que não leva em consideração os materiais constituintes e os parâmetros de mistura do concreto ou da argamassa (agregado graúdo, miúdo, aditivos, teor de água, relação a/c, etc.). Este é o método recomendado pela ASTM C1698-09 (2014) para a obtenção do tempo zero.

Embora a determinação precisa do tempo zero seja de suma importância para área experimental e numérica, não há normas para sua determinação. Neste trabalho serão utilizadas a taxa de desenvolvimento da deformação e a técnica da propagação da onda ultrassônica.

#### 2.5.1.1 Taxa de desenvolvimento da deformação

Bettencourt e Gonçalves (2010) apresentaram em seu trabalho uma forma de determinação do tempo zero a partir da taxa de variação da deformação, sendo esta obtida pela análise dos gráficos de deformação versus tempo. Uma curva típica de deformação autógena medida pelo método dos tubos corrugados é mostrada na Figura 2.14.

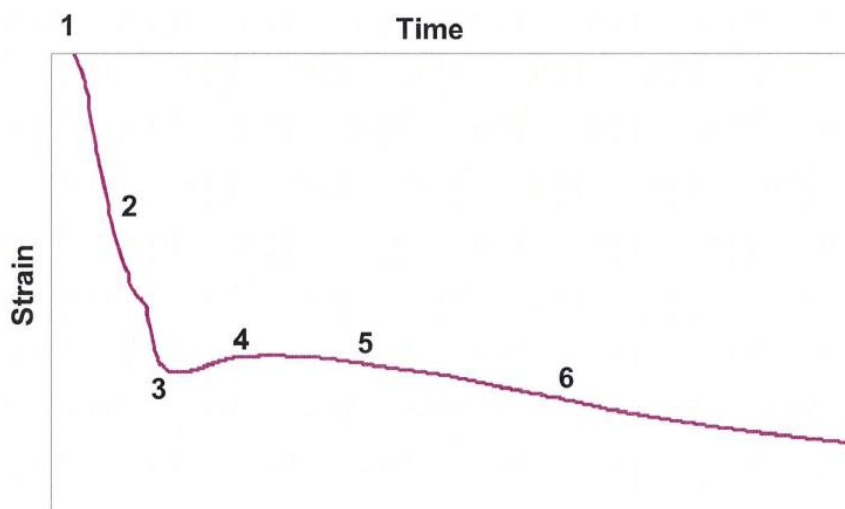


Figura 2.14: Representação esquemática dos estágios da deformação de uma pasta de cimento medida em equipamento linear até dois dias após adição de água (BETTENCOURT e GONÇALVES, 2010).

Segundo Bettencourt e Gonçalves (2010), diferentes inclinações são observadas na curva de deformação versus tempo (Figura 2.14). Primeiramente há um período entre a mistura e os primeiros registros de deformação sem medições ou falta de medições devido a limitações do equipamento – estágio 1. Em seguida há uma forte redução de volume em uma inclinação quase constante durante as primeiras horas – estágio 2. Nesta fase, a pasta ainda é uma suspensão. Após um certo período, a taxa de deformação é gradualmente reduzida e pode praticamente chegar a zero – estágio 3. As medidas subsequentes podem ser de expansão (estágio 4) ou de contração (sem o estágio 4). A Figura 2.14 mostra um caso em que uma pequena expansão ocorreu. Esta expansão se reverte em contração após um certo tempo – estágio 5. A inclinação da contração está aumentando com o tempo durante esta fase. Uma inflexão, entre os estágios 5 e 6, liga uma inclinação crescente a uma inclinação decrescente.

As determinações iniciais podem ser entendidas como comportamento de suspensão e não são muito relevantes para a análise de tensão. Essas deformações iniciais estão na mesma ordem de grandeza de variação de comprimento esperada devido à contração Le Chatelier, o que indica ausência de restrição significativa. Após a transição de suspensão para sólido, o mecanismo da deformação muda da variação da densidade dos materiais para as tensões de compressão no corpo sólido.

No estado sólido, a mudança na densidade dos materiais devido à reação química está ocorrendo, mas eles não causam alterações diretamente no volume aparente. Normalmente, a deformação neste estado, para alta umidade relativa, é atribuída à tensão capilar nos poros criados pela mudança na densidade dos materiais, o que induz tensões de compressão na rede sólida. Os dois fenômenos, variação de densidade e deformação devido a tensões de

compressão, são muito diferentes não apenas na natureza, mas também na amplitude, e não é de surpreender que a taxa de deformação mostre uma diminuição profunda. (BETTENCOURT e GONÇALVES, 2010)

A escolha de um instante que represente essa transição suspensão-sólido é difícil, já que este é um processo gradual. No entanto, é extremamente útil para comparar diferentes pastas. Assim, estabeleceu-se como tempo zero o momento em que a inclinação da curva de deformação atinge um valor próximo de zero (gradiente nulo da curva deformação-tempo), equivalente ao estágio 3 (BETTENCOURT e GONÇALVES, 2010).

#### 2.5.1.2 Propagação do pulso ultrassônico

Casson e Demone (1982) foram pioneiros no uso de ultrassom para monitoramento das propriedades no estado fresco do concreto através da propagação de ondas de ultrassom. Keating *et al.* (1989) demonstraram que a propagação das ondas de ultrassom (US) é dificultada quando o concreto está no estado fluido, mas após o patamar de percolação foi observada uma mudança nos valores da resposta. Reinhardt *et al.* (2000) desenvolveram um dispositivo, quase totalmente automatizado, adequado para o monitoramento contínuo da pega e do endurecimento de pastas de cimento e argamassas no estado fresco (Figura 2.15).

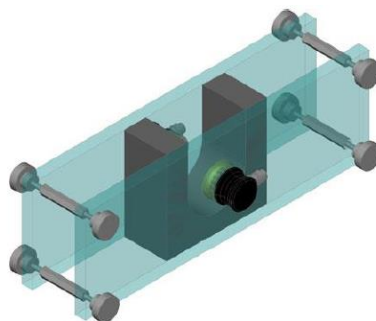


Figura 2.15: Esboço 3D do dispositivo para determinação da pega usando pulso ultrassônico (REINHARDT *et al.*, 2000)

No Brasil, Silva (2007) desenvolveu uma técnica, a partir da pesquisa de Reinhardt *et al.* (2000), para determinar o  $t_0$  em concretos, utilizando aparelhos comerciais de ultrassom. Os ensaios foram realizados segundo a norma ABNT NBR NM 58 (1996) e ABNT NBR 8802 (1992). As dimensões do corpo de prova foram determinadas de acordo com as prescrições da RILEM (1972), em função da frequência do transdutor.

Segundo a Recomendação da RILEM TC 218-SFC, o princípio básico do método é que um pulso de ondas longitudinais é produzido por um transdutor mantido em contato com um recipiente cheio com material cimentício fresco. Depois de atravessar um comprimento conhecido a onda é captada por um segundo transdutor montado na parede oposta do recipiente.

Ao determinar o tempo de chegada da onda, a velocidade de onda  $v$  é calculada. Por meio de medições de repetição, o método permite uma avaliação quase contínua do endurecimento do concreto após a mistura. Curvas da velocidade do pulso ultrassônico pelo tempo podem ser plotados e o tempo zero equivale ao instante em que houve uma mudança brusca na velocidade do pulso.

Neste trabalho serão utilizadas ambas as técnicas descritas para a determinação do tempo zero, sendo o método da taxa de desenvolvimento da deformação utilizada para balizar o início da retração autógena pela metodologia dos tubos corrugados; e o método da propagação da onda ultrassônica para balizar a metodologia dos prismas.

## 2.6 CALORIMETRIA POR CONDUÇÃO ISOTÉRMICA

A calorimetria de condução isotérmica quantifica diretamente o calor liberado na hidratação do cimento por meio do monitoramento do fluxo de calor da pasta, quando esta e o seu meio ambiente circundante são, simultaneamente, mantidos em condições isotérmicas, sem a aceleração provocada pelo calor liberado (QUARCIONI, 2008). Empregando esta técnica, pode ser avaliada, de forma simplificada e eficiente, a velocidade das reações de hidratação, ao longo do tempo, pelas curvas de evolução de calor.

A técnica de calorimetria por condução isotérmica permite acompanhar a cinética de hidratação do cimento e esse processo pode ser dividido em diversos estágios, como ilustrado na Figura 2.16.

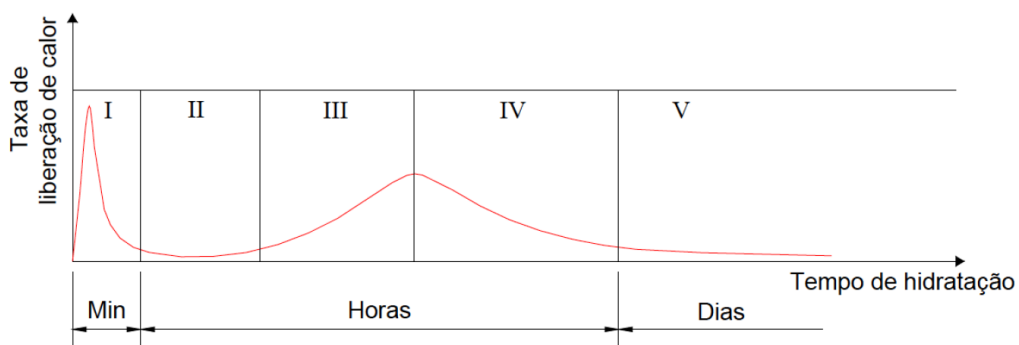


Figura 2.16: Representação gráfica da curva de evolução de calor gerada durante as reações de hidratação de uma pasta de cimento (adaptado por Manzano (2016)).

O estágio I - dissolução inicial, acontece nos primeiros minutos logo após a adição da água, quando os grãos de cimento começam a reagir e os componentes facilmente solúveis em água como álcalis e sulfato de cálcio começam a se dissolver. Nesta fase, apresenta-se o primeiro pico da evolução do calor de hidratação. Do ponto de vista reológico, é o estágio mais importante, pois a taxa de dissolução inicial de  $C_3A$  pode ser aumentada pelos álcalis

dissolvidos. A principal reação responsável deste pico é a dissolução do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e do sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), formando etringita (AFt). Passados alguns minutos, um gel amorfo rico em alumina e silicato (também com um alto teor de cálcio e sulfato) é formado ao redor da superfície dos grãos de cimento (MANZANO, 2016).

Este gel causa o período II – indução, também chamado de período de dormência, tem algumas horas de duração e com taxa de hidratação baixa que pode variar de acordo com a temperatura, composição do cimento, relação  $a/c$ , aditivos químicos, dentre outros. É nesse período que o concreto deve ser transportado e aplicado, pois ainda está trabalhável (BIANCHI, 2014).

O estágio III – aceleração, é responsável pelo segundo pico exotérmico. É causado pela supersaturação iônica da fase aquosa (mecanismo de dissolução-precipitação). Nesta fase, os principais constituintes do cimento, o silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e o silicato dicálcico ( $C_2S$ ), reagem com a água e formam rapidamente o silicato de cálcio hidratado amorfo (C-S-H) e o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ). Ocorre também a diminuição dos íons sulfato e de cálcio, devido a formação de etringita. Nesta ocorre a perda de trabalhabilidade, ou seja, a pega do cimento (MANZANO, 2016).

O período IV - desaceleração, inicia-se com a redução da taxa de calor, devido à baixa concentração dos íons na solução. A hidratação agora é controlada pelo mecanismo topoquímico. Finalmente, ocorre o estágio V - reação lenta, associado com a transformação de AFt em Monossulfato (AFm) (MANZANO, 2016).

Poucos estudos foram encontrados na literatura sobre a utilização da técnica de calorimetria isotérmica em materiais cimentícios modificados com SAPs. Destacam-se os trabalhos de: Zhutovsky e Kovler (2013), Justs *et al.* (2014), Justs *et al.* (2015), Wang *et al.* (2016), Manzano (2016) e Agostinho (2017).

Justs *et al.* (2014) avaliaram o efeito da adição de SAP em pastas com baixa relação  $a/c$  (0,20 e 0,30). Os autores concluíram que os picos principais de hidratação das pastas contendo polímero são inferiores e aparecem antes, se comparados com as misturas sem SAP que possuem a mesma relação  $a/c$  total ( $a_{bas}/c + a_{inc}/c$ ). Esse comportamento é causado pela liberação gradual da água de cura interna do SAP. Por outro lado, nas pastas com mesma  $a_{bas}/c$ , aquelas com SAP sofreram ligeiro retardado em comparação com a mistura de referência. Segundo os pesquisadores, duas possíveis explicações para isso são: a lixiviação da fração solúvel do SAP que pode interferir na hidratação, e a absorção de íons alcalinos pelo SAP.

Manzano (2016) realizou ensaios calorimétricos em pastas com relação  $a_{bas}/c$  de 0,30 e variou o tipo de SAP adicionando também água de cura interna. Mesmo com o retardo provocado pelo aditivo superplastificante, foi possível avaliar que a adição dos polímeros mudou o perfil das curvas calorimétricas. Foi observado, assim como em outros trabalhos, o deslocamento para a direita do segundo pico de liberação de calor, ou seja, um leve retardo no tempo de pega para as pastas contendo SAP.

Agostinho (2017) avaliou a cinética de hidratação de pastas de cimento contendo SAP. A autora observou que o efeito do SAP nas curvas de fluxo de calor gera um leve incremento no tempo de ocorrência do pico calorimétrico (cerca de 10%), quando comparadas com as pastas sem adição do polímero.

A utilização da técnica de calorimetria isotérmica tem se mostrado uma ferramenta adequada para o entendimento do processo de absorção e dessorção do SAP na matriz cimentícia, parâmetro fundamental que determina a eficiência do polímero como agente mitigador da retração autógena e seu comportamento no estado fresco, podendo identificar a retenção ou liberação precoce da água durante o período fluido das pastas. Essa metodologia também permite dar subsídios sobre a participação da água incorporada pelo polímero na cinética de hidratação do cimento ao longo do tempo (AGOSTINHO, 2017).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrito o programa experimental, apresentando as variáveis de resposta, as variáveis de controle, as misturas adotadas, a caracterização dos materiais utilizados na produção das pastas de cimento e dos microconcretos, bem como os métodos de ensaio empregados e as propriedades avaliadas.

O programa experimental foi realizado nos laboratórios de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia – GO. Na Figura 3.1 é mostrado esquematicamente um resumo do desenvolvimento deste estudo.

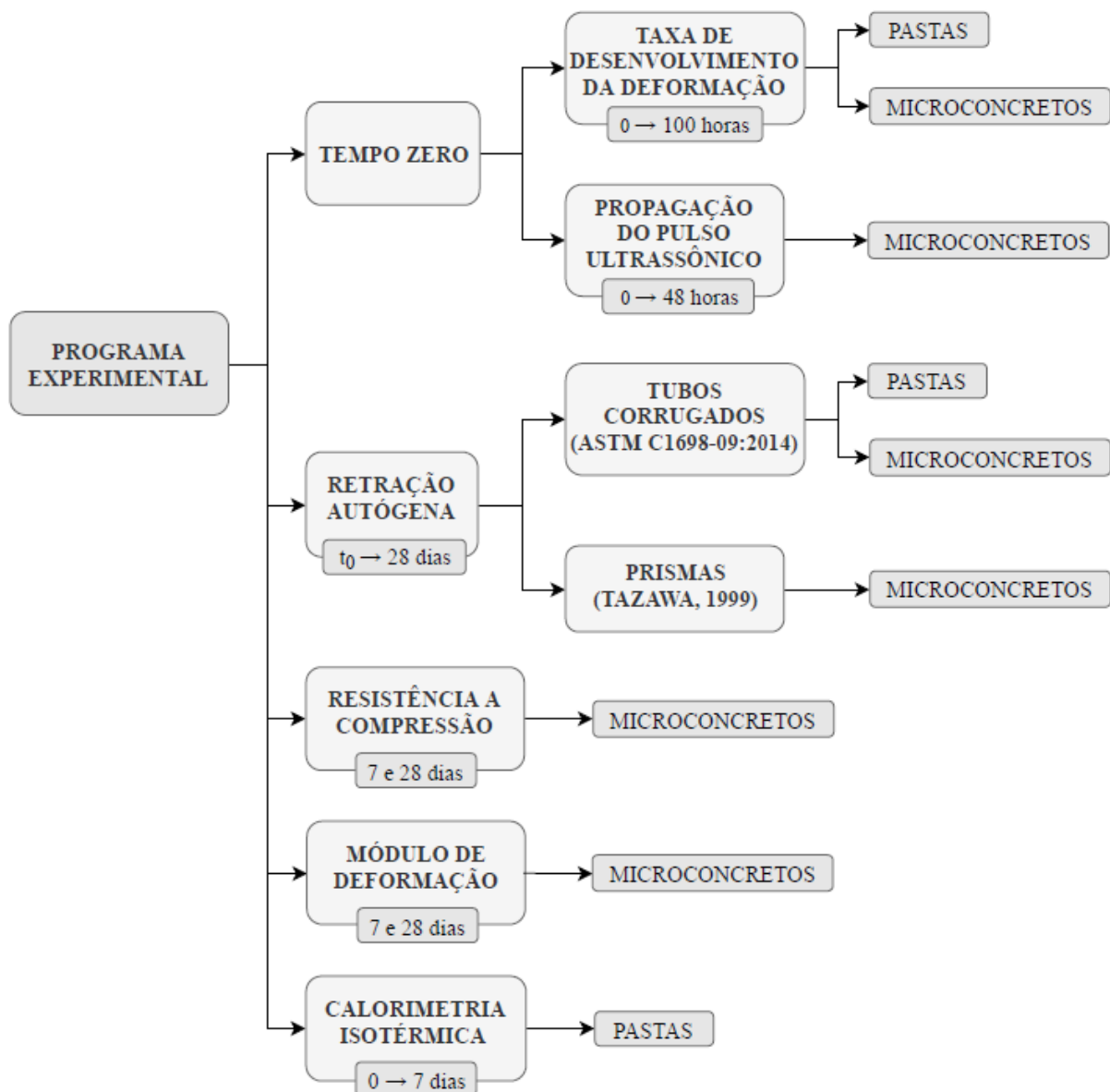


Figura 3.1: Organograma das atividades do programa experimental.



### 3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO

#### 3.1.1 Variáveis independentes ou de controle

As variáveis independentes ou de controle são os parâmetros que podem influenciar as características e propriedades das misturas do estudo. O presente trabalho tem como variável independente o teor de adição do polímero superabsorvente, nos teores de 0% e 0,4% em relação a massa de cimento. A Tabela 3.1 apresenta as nomenclaturas adotadas para identificação de cada traço.

Tabela 3.1: Nomenclatura adotada para identificação dos traços

	Nomenclatura do traço	Relação água/cimento básica	Relação água incorporada/cimento	Relação água/cimento total	Teor de SAP
Pasta de cimento	REF-P	0,35	0,00	0,35	0,0%
	SAP-P	0,29	0,06	0,35	0,4%
Microconcreto	REF-M	0,35	0,00	0,35	0,0%
	SAP-M	0,29	0,06	0,35	0,4%

A relação água/cimento foi fixada em seu valor total igual a 0,35, não sendo adicionada água extra para cura interna nos traços contendo SAP. Tal decisão foi tomada considerando que toda água adicionada, como água de amassamento ou de cura interna, participa das reações de hidratação, devendo assim ser considerada a relação a/c total na comparação dos traços, sendo esta portanto fixada.

A determinação do teor de SAP está justificada no 2.4.1 – Cura interna com polímero superabsorvente (SAP). Foi calculado um teor de polímero que, baseado na sua capacidade de absorção, absorvesse uma quantidade de água incorporada que fosse suficiente para eliminar a retração autógena. A Equação 3.1 foi utilizada para o cálculo dessa quantidade de água incorporada, em relação à massa de cimento.

$$\frac{a_{inc}}{c} = \frac{0,2 + 0,69 \cdot (s/c)}{1,12 + 0,88 \cdot (s/c)} \cdot \left( \frac{a_{tot} - a_{inc}}{c} \right), \quad \text{para } \frac{a_{tot} - a_{inc}}{c} \leq 0,36 + 0,28 \cdot \frac{s}{c}$$

(Equação 3.1)

Para a relação  $a_{tot}/c$  fixa de 0,35 e a relação sílica/cimento ( $s/c$ ) de 6%, obteve-se uma relação água incorporada/cimento de 0,060. Levando em consideração que a absorção do polímero utilizado é de 15 gramas de água por grama do SAP, necessita-se de um teor de 0,4% de polímero em relação à massa de cimento para que não haja retração autógena.

Buscou-se fixar também o teor de superplastificante, para que não influenciasse os resultados. Com isso, o espalhamento das pastas e microconcretos foi variável, respeitando-se apenas uma trabalhabilidade mínima necessária para moldagem dos corpos de provas.

O tipo de aditivo superplastificante e seu teor foram determinados em um estudo experimental prévio, em busca de uma combinação que permitisse uma trabalhabilidade suficiente para a moldagem dos ensaios e que não ocorresse exsudação das misturas.

Para os microconcretos não foi possível se fixar o teor de superplastificante. O teor máximo que se conseguiu atingir no microconcreto de referência, sem que houvesse exsudação, não foi suficiente para atingir uma trabalhabilidade mínima no microconcreto contendo SAP. Sendo assim, para os microconcretos, houve uma pequena variação no teor de superplastificante e, para as pastas, este teor foi fixo.

### 3.1.2 Variáveis dependentes ou de resposta

As variáveis de resposta ou dependentes são as características ou propriedades relacionadas ao comportamento das pastas ou microconcretos que podem ser determinadas experimentalmente. As variáveis de resposta são influenciadas pelas variáveis independentes.

No presente estudo, as variáveis de respostas são divididas em caracterização das pastas ou microconcretos no estado fresco, no estado endurecido e caracterização do processo de hidratação.

No estado fresco as pastas e/ou os microconcretos foram caracterizados pelas seguintes propriedades:

- Tempo zero determinado pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação – pastas e microconcretos;
- Tempo zero determinado pelo método da propagação do pulso ultrassônico – microconcretos;

No estado endurecido as pastas e/ou os microconcretos foram caracterizados pelas seguintes propriedades:

- Retração autógena determinada pelo método dos tubos corrugados (ASTM 1698-09:2014) – pastas e microconcretos;
- Retração autógena determinada pelo método dos prismas (TAZAWA, 1999) – microconcretos;
- Resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2007) – microconcretos;

- Módulo de deformação (NBR 8522:2008) – microconcretos.

Para avaliação do processo de hidratação foram realizados os seguintes ensaios:

- Calorimetria por condução isotérmica – pastas;

### 3.2 MATRIZ EXPERIMENTAL

Na Tabela 3.2 é apresentada a combinação de variáveis independentes e dependentes em uma matriz experimental. Vale lembrar em todas as pastas terão relação a/c total iguais, portanto não é adicionada água de cura interna (extra) nas misturas que contém SAP. Além disso, manteve-se o teor de aditivo superplastificante constante para as pastas, porém variável para os microconcretos.

Tabela 3.2: Matriz experimental

Traço		Variável de controle	Variáveis de resposta						
		Teor de SAP	Estado fresco		Estado endurecido			Hidra- tação	
			Tempo zero – Taxa de desenv. deformação	Tempo zero – Propag. do pulso ultrassônico	Retração autógena – Tubos corrugados	Retração autógena – Prismas	Resistência a compressão	Módulo de deformação	Calorimetria isotérmica
Pasta de cimento	REF-P	0,0%	x		x		x	x	x
	SAP-P	0,4%	x		x		x	x	x
Micro-concreto	REF-M	0,0%	x	x	x	x	x	x	
	SAP-M	0,4%	x	x	x	x	x	x	

### 3.3 MATERIAIS

Os materiais constituintes foram escolhidos de acordo com a disponibilidade na região e dos fornecedores, exceto o SAP, que não é comercializado no Brasil. Os materiais são utilizados da maneira como são comercializados, sem modificações em suas características.

### 3.3.1 Cimento

O cimento utilizado na presente pesquisa é o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial CPV-ARI, fabricado pela CIPLAN, proveniente do mesmo lote de fabricação. Tal cimento contém elevado teor de clínquer e é normalmente utilizado em concretos de alta resistência.

As caracterizações químicas e físicas foram feitas no laboratório de Furnas Centrais Elétricas e seus resultados estão apresentados na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4. Tais resultados mostram que o material atende aos requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras. Os teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio estão aceitáveis, evitando as reações expansivas, devido à hidratação tardia destes compostos.

Tabela 3.3: Caracterização química do cimento CPV ARI utilizado nesta pesquisa.

Componentes Químicos		Resultado CPV ARI	Exigência NBR 16697:2018	Referência Normativa
Perda ao fogo (%)		1,68	≤ 6,5	NBR NM 18/2012
Resíduo insolúvel (%)		0,14	≤ 3,5	NBR NM 15/2012
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)		4,88	≤ 4,5	NBR NM 16/2012
Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> ) (%)		8,30	n.e.	
Óxido de magnésio (MgO) (%)		5,69	≤ 6,5	NBR NM 11- 2/2012
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) (%)		18,15	n.e.	
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)		2,92	n.e.	
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)		4,19	n.e.	
Óxido de cálcio (CaO) (%)		60,08	n.e.	
Óxido de cálcio livre (CaO) (%)		1,2	n.e.	NBR NM 13/2012
Álcalis totais (%)	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,36	n.e.	NBR NM 17/2012
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,94	n.e.	
	Equivalente alcalino em (Na <sub>2</sub> O)	0,98	n.e.	
Álcalis solúveis em água (%)	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,22	n.e.	
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,49	n.e.	
	Equivalente alcalino em (Na <sub>2</sub> O)	0,58	n.e.	
*n.e – não especificado				

Tabela 3.4: Caracterização física e mecânica do cimento CPV ARI utilizado nesta pesquisa.

Propriedade	Resultado CPV ARI	Exigência NBR 16697:2018	Referência Normativa	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,13	-	NBR NM 23:2001	
Área específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3,450	n.e.	NBR 16372/2015	
Tempo de início de pega (h:mm)	2:00	≥ 1:00	NBR NM 65/2003	
Tempo de fim de pega (h:mm)	4:10	≤ 10:00		
Água de consistência – Pasta (%)	31,0	n.e.	NBR NM 43/2003	
Expansão em Autoclave (%)	0,65	n.e.	ACTM C 151	
Resistência à compressão (Mpa)	1 dias	33,0	≥ 14,0	NBR 7215/1996
	3 dias	42,0	≥ 24,0	
	7 dias	46,2	≥ 34,0	
*n.e – não especificado				

### 3.3.2 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada é um resíduo da fabricação de silício-metálico, comercialmente disponível em pó, do tipo não densificada. Foi usado um teor de 6% em relação à massa de cimento, sendo este o teor padrão utilizado nos projetos de Furnas Centrais Elétricas. Os ensaios de caracterização físico, químico e mecânicos estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Caracterização química da sílica ativa utilizada nesta pesquisa.

Componentes Químicos	Resultado Sílica Ativa	Exigência segundo NBR 12653/12	Referência Normativa	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,21	n.e.	NBR NM 23/2001	
Perda ao fogo (%)	3,22	≤ 10,0	NBR NM 15/2012	
Óxido de magnésio (MgO) (%)	0,49	n.e.	NBR 13956- 2/2012	
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) (%)	93,55	n.e.		
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	0,16	n.e.		
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	0,15	n.e.		
Óxido de cálcio (CaO) (%)	0,37	n.e.		
Álcalis totais (%)	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,26	n.e.	NBR NM 17/2004
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,85	n.e.	
	Equivalente alcalino em (Na <sub>2</sub> O)	0,82	n.e..	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	93,86	> 70		
*n.e – não especificado				

### 3.3.3 Agregado miúdo – Areia

O agregado miúdo se trata de areia natural lavada proveniente do depósito aluvial do Rio Corumbá, na região de Pires do Rio – GO. A escolha do agregado miúdo baseou-se na distribuição granulométrica, sendo preferida uma composição contínua, dentro da zona utilizável e mais próxima da zona ótima. O ensaio da composição granulométrica foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB). Na Figura 3.2 é mostrada a distribuição granulométrica da amostra selecionada, que se apresentou dentro dos limites da zona utilizável da norma ABNT NBR 7211 (2011). A Figura 3.2 também mostra os valores obtidos para módulo de finura, absorção, dimensão máxima do agregado e massa específica na condição SSS (saturada superfície seca).

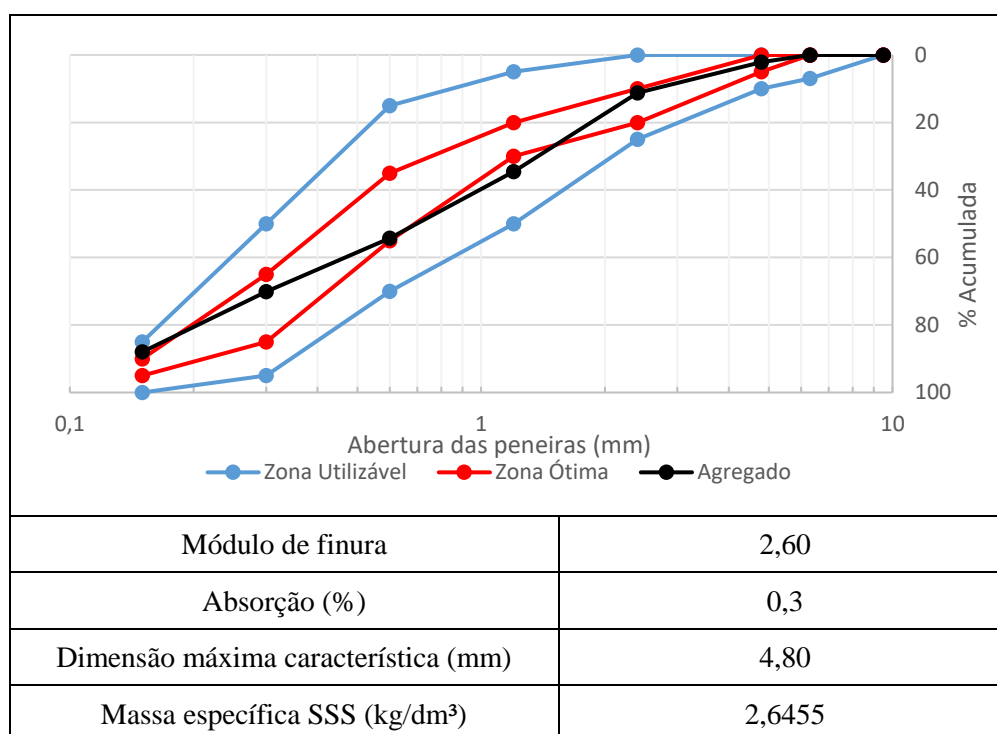


Figura 3.2: Curva granulométrica da amostra selecionada.

A umidade da areia foi determinada antes da produção dos microconcretos para que a correção da água da mistura fosse corrigida.

### 3.3.4 Aditivo Superplastificante (SP)

Nessa pesquisa foram utilizados aditivo químico do tipo redutor de água de grande eficiência (superplastificante de 3ª geração) a base de policarboxilato, fornecido pela empresa BASF. Para as pastas, foi utilizado um teor de 3% em relação à massa de cimento para ambas as misturas. Já para os microconcretos, foi utilizado um teor de 1,2% para a mistura de referência e um teor de 1,35% para a mistura contendo SAP.

O alto teor de superplastificante utilizado nas pastas é devido a este trabalho ser em conjunto com o trabalho de Agostinho (2019), e os resultados das pastas foram compartilhados por ambas as pesquisas. Em virtude de Agostinho (2019) utilizar adição de nanosílica, que causa grande prejuízo à trabalhabilidade, e buscando-se fixar o teor de superplastificante, adotou-se um teor capaz de conferir trabalhabilidade à todas as misturas, de ambas os trabalhos. Foi necessário assim um teor de superplastificante de 3% em relação à massa de cimento para as pastas.

Já para os microconcretos, conforme explicado anteriormente, não foi possível se fixar o teor de superplastificante. O teor máximo que se conseguiu atingir para a referência, sem que houvesse exsudação, não foi suficiente para atingir uma trabalhabilidade mínima no microconcreto contendo SAP. Sendo assim, para os microconcretos, foi utilizado um teor de 1,2% e 1,35% para as misturas de referência e contendo SAP, respectivamente.

As características físico-químicas do aditivo fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Caracterização físico-químicas do aditivo superplastificante fornecida pelo fabricante

Característica	Resultado
Base química	Éterpolicarboxilato
Função principal	Superplastificante
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Branco turvo
Viscosidade	< 150 cps
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 – 1,107
pH	6,0 ± 1,0
Teor de cloretos (%)	Isento

### 3.3.5 Polímero Superabsorvente (SAP)

O polímero superabsorvente utilizado no trabalho foi doado pelo Prof. Ole Mejlhede Jensen e desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU). Quimicamente trata-se de um ácido acrílico/acrilamida com ligações cruzadas covalentes, produzido pela técnica de polimerização por suspensão inversa (JENSEN e HANSEN, 2001a). Este SAP foi especialmente desenvolvido para uso em ambiente alcalino elevado, como o meio cimentício, e foi fornecido como um pó seco e branco, com partículas esféricas.

O SAP a ser utilizado nessa pesquisa teve sua caracterização realizada por Neto (2014) e Manzano (2016). Ambos os autores obtiveram o resultado de absorção em meio cimentício do

SAP de 15g/g, ou seja, cada grama de polímero seco absorve 15 gramas de água em meio cimentício, dado utilizado para o cálculo do teor de SAP adotado.

De acordo com os cálculos demonstrados no item 2.4.1, necessita-se uma relação  $a_{inc}/c$  de 0,060 para eliminar totalmente a retração autógena. Utilizando a absorção do SAP determinada pelos autores, um teor de 0,4% de polímero em relação à massa de cimento é necessário para se absorver essa quantidade de água para cura interna do material cimentício. Sendo assim, adotou-se os teores de 0% e 0,4% de polímero.

Na Tabela 3.7 são apresentadas características do polímero superabsorvente utilizado.

Tabela 3.7: Características do polímero superabsorvente utilizado nesta pesquisa (MANZANO, 2016).

Composição química	C, O, Na, S
Forma das partículas	Esférica
Processo de produção	Suspensão inversa
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,456
Diâmetro seco (µm)	66,3
Diâmetro inchado (µm)	189,6
Absorção em meio aquoso (g/g)	95,8
Absorção em meio cimentício (g/g)	15,0

### 3.4 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

No programa experimental desta pesquisa foram realizadas quatro misturas, sendo duas de pasta de cimento e duas de microconcreto (Tabela 3.8).

Tabela 3.8: Composição das pastas de cimento e microconcretos.

Traço	Composição (kg/m <sup>3</sup> )					
	Cimento	Sílica ativa	Areia	SAP	Água	Aditivo superplastificante
REF-P	700,0	42,0	-	0,0	245,0	21,0
SAP-P	700,0	42,0	-	2,8	245,0	21,0
REF-M	681,9	40,9	1305,4	0,0	238,7	8,2
SAP-M	681,9	40,9	1305,4	2,7	238,7	9,2

1. O teor de aditivo superplastificantes foi determinado experimentalmente até se obter um espalhamento mínimo adequado para moldagem dos tubos corrugados;  
 2. A água contida no aditivo superplastificante foi descontada da água de amassamento;  
 3. A umidade superficial da areia foi determinada antes da produção dos microconcretos para correção da água de amassamento e da areia.



Cabe ressaltar que todas as misturas possuem relação a/c total de 0,35, ou seja, não foi adicionada água extra para cura interna do polímero. O teor de polímero superabsorvente foi adotado como zero ou 0,4% em relação à massa de cimento para as pastas e para os microconcretos. Este teor foi adotado buscando-se eliminar totalmente a retração autógena.

Para determinação do traço do microconcreto, utilizou-se como base o traço recomendado pelo comitê TC 225-SAP da RILEM (2012), também utilizado nos trabalhos anteriores desta linha de pesquisa. A partir deste, adaptou-se o teor de sílica ativa e a relação a/c, chegando ao traço 1:0,06:1,914:0,35 (cimento:sílica ativa:agregado miúdo:água) adotado.

#### 3.4.1 Produção das pastas de cimento

O processo de produção das pastas de cimento iniciou-se com a pesagem dos materiais em uma balança com precisão de pelo menos duas casas decimais. A pesagem do SAP foi realizada em uma balança com quatro casas decimais de precisão, devido a sensibilidade e baixo teor utilizado do material.

Após a pesagem, o SAP foi misturado ao cimento e à sílica ativa manualmente, com o auxílio de uma espátula. Em seguida, os materiais secos foram transferidos para um béquer para posterior adição dos líquidos, previamente misturados (água e aditivo superplastificante), em um misturador mecânico, modelo IKA RW 20 digital (Figura 3.3), com velocidade de 2500 rpm para proporcionar uma melhor ativação do aditivo superplastificante.

Posteriormente, foi feita a mistura mecânica utilizando o mesmo misturador também com velocidade de 2500 rpm, durante 2 minutos, seguido de parada de 1 minuto para raspagem das paredes do béquer e posterior mistura por mais 5 minutos, totalizando 10 minutos de tempo de mistura. O procedimento de mistura e os tempos de cada etapa estão resumidos na Tabela 3.9.



Figura 3.3: Misturador mecânico modelo IKA RW 20 digital.

Tabela 3.9: Procedimento de mistura para as pastas de cimento.

Procedimento	Tempo	Tipo de mistura /Velocidade
Homogeneização do cimento, sílica ativa e SAP	-	Manual
Mistura materiais líquidos (água e superplastif.)	2 min	Mecânico – 2500 rpm
Adição dos líquidos aos materiais secos	2 min	Mecânico – 2500 rpm
Raspagem paredes béquer	1 min	Manual
Mistura final	5 min	Mecânico – 2500 rpm

### 3.4.2 Produção dos microconcretos

O processo de produção dos microconcretos iniciou-se com a determinação da umidade da areia e correção da água de amassamento do traço. Em seguida, foi realizada a pesagem dos materiais em uma balança com precisão de pelo menos duas casas decimais, já com a água de amassamento corrigida. O SAP foi previamente misturado aos demais materiais secos, na primeira etapa da mistura e, numa segunda etapa, foi adicionada a água com o superplastificante previamente dissolvido.

O roteiro de mistura para a produção dos microconcretos foi baseado nas recomendações do Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012) e está apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Procedimento de mistura para os microconcretos.

Procedimento	Tempo
Homogeneização dos componentes secos (incluso o SAP)	4 min
Adição de água, incluindo o superplastificante pré-dissolvido	1 min
Mistura inicial	3 min
Raspagem dos materiais presos na parede/pás do misturador	1 min
Mistura final	3 min

Os microconcretos foram produzidos no laboratório de Furnas, em uma sala com temperatura controlada de  $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , com os constituintes também nessa temperatura. Foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado com capacidade para 360 litros. Antes do início de cada mistura, as betoneiras foram imprimadas com argamassa na proporção 1:1 em massa. Na Figura 3.4 são mostradas diferentes etapas do procedimento de fabricação dos microconcretos.



Figura 3.4: Procedimento de produção dos microconcretos. (a) Imprimação da betoneira, (b) materiais secos e água pesados para mistura, (c) superplastificante pesado para mistura e (d) verificação de espalhamento.

### 3.4.3 Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, utilizados para determinação de resistência a compressão e módulo de elasticidade, foram moldados em duas camadas, sendo cada camada adensada por meio de vibrador com agulha de imersão. Os corpos de prova prismáticos de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm, utilizados para determinação da retração autógena (método dos prismas), foram moldados também em duas camadas, sendo, porém, o adensamento de cada camada realizado em mesa vibratória. Já os corpos de prova prismáticos de 15 x 15 x 30 cm, utilizados para determinação do tempo zero (método da propagação do pulso ultrassônico), foram moldados em três camadas, sendo que o adensamento de cada camada foi realizado aplicando 30 golpes uniformemente distribuídos.

Na Figura 3.5 são mostrados os corpos de prova prismáticos e cilíndricos prontos para moldagem.

A moldagem e o adensamento dos tubos corrugados, utilizados para determinação da retração autógena, estão descritos no método de ensaio da retração autógena pela metodologia dos tubos corrugados, no item 3.5.2.1.

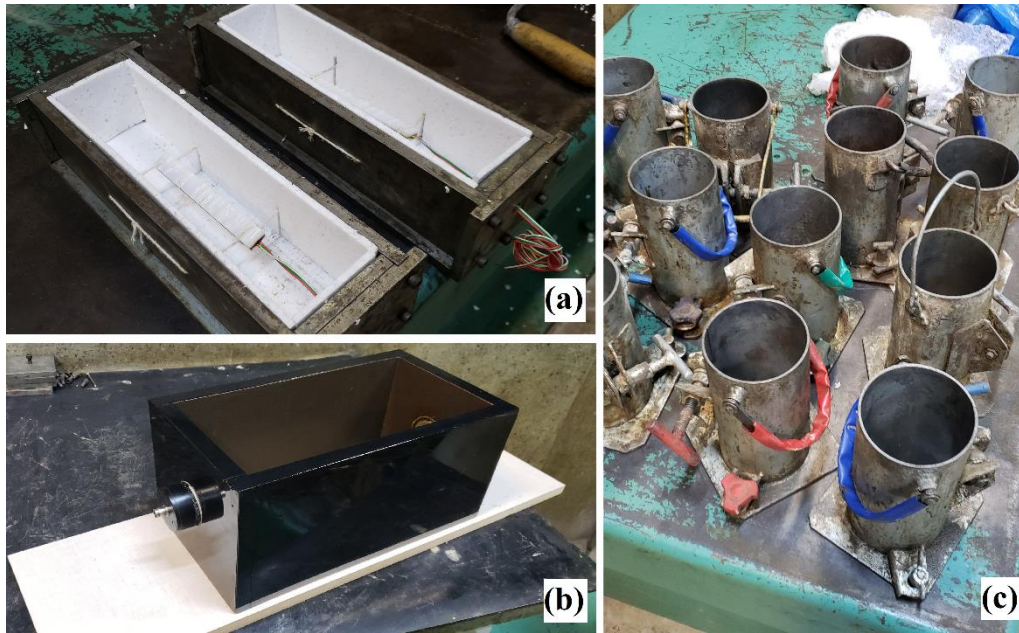


Figura 3.5: (a) Corpos de prova prismáticos de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm, utilizados para determinação da retração autógena (método dos prismas) com extensômetro elétrico embutido, (b) corpo de prova prismático 15 x 15 x 30 cm, utilizado para determinação do tempo zero (método da propagação do pulso ultrassônico) e (c) corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, utilizados para determinação de resistência a compressão e módulo de elasticidade.

Após a moldagem, foi feito o acabamento da superfície dos corpos de prova com espátula e régua. Os corpos de prova destinados ao ensaio de propriedades mecânicas (resistência a compressão e módulo de elasticidade) foram cobertos com filme plástico, evitando a perda de água, até o desmolde, em 24 horas. Em seguida, foram pesados em balança digital com 0,01g de precisão e tiveram seus diâmetros e alturas medidos com paquímetro digital de resolução 0,01mm. Posteriormente foram levados para câmara com 100% de umidade relativa e imersos em solução de água com cal, até a idade do ensaio.

Os corpos de prova destinados aos ensaios de tempo zero e retração autógena nos prismas foram lacrados, dentro de suas formas, com filme plástico e fita adesiva, de forma a mitigar a perda de água, e então levados para serem acoplados nos respectivos equipamentos de leitura.

### 3.5 MÉTODOS DE ENSAIO

#### 3.5.1 Tempo zero

A fim de se balizar o início da determinação da retração autógena, é necessário se obter o tempo de transição suspensão-sólido. Neste trabalho, esta propriedade foi determinada por dois métodos: o da taxa de desenvolvimento da deformação, que pode ser realizada tanto em pastas como microconcretos; e o da propagação do pulso ultrassônico, que foi realizado apenas em microconcretos.

O método da taxa de desenvolvimento da deformação foi utilizado para determinar o tempo zero da retração autógena pelo método dos tubos corrugados e o método de propagação da onda ultrassônica para determinar tempo zero da retração autógena pelo método dos prismas.

### 3.5.1.1 Taxa de desenvolvimento da deformação

Neste método, o tempo zero é obtido a partir da análise gráfica da determinação experimental da retração autógena pelo método dos tubos corrugados. Tal análise é feita conforme descrito no trabalho de Bettencourt e Gonçalves (2010), relatado no item 2.5.1.1 deste trabalho.

Após realizado o ensaio de determinação da retração autógena pelo método dos tubos corrugados, que está descrito no item 3.5.2.1 mais adiante, obtém-se o gráfico dos valores de deformação das amostras versus tempo, como exemplificado na Figura 3.6, para os três corpos de prova de um mesmo traço.

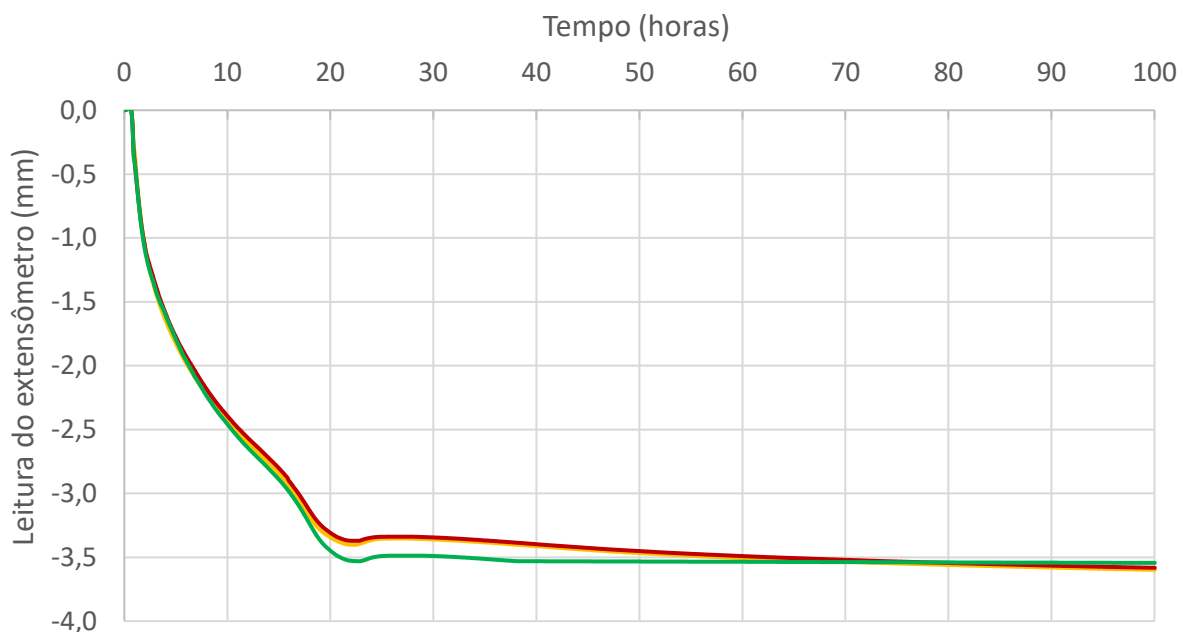


Figura 3.6: Curva típica de deformação pelo tempo dos três corpos de prova nas 100 primeiras horas.

Bettencourt e Gonçalves (2010) estabeleceram a transição líquido-sólido como o instante correspondente ao início do platô na curva de deformação absoluta, associada à redução da taxa de deformação e, além disso, o instante no qual as menores diferenças entre os resultados de retração dos corpos de prova são obtidas. Na Figura 3.7, com o eixo do tempo em escala logarítmica, observa-se melhor o platô nas curvas. Neste exemplo específico, ocorre em torno de 22 horas.



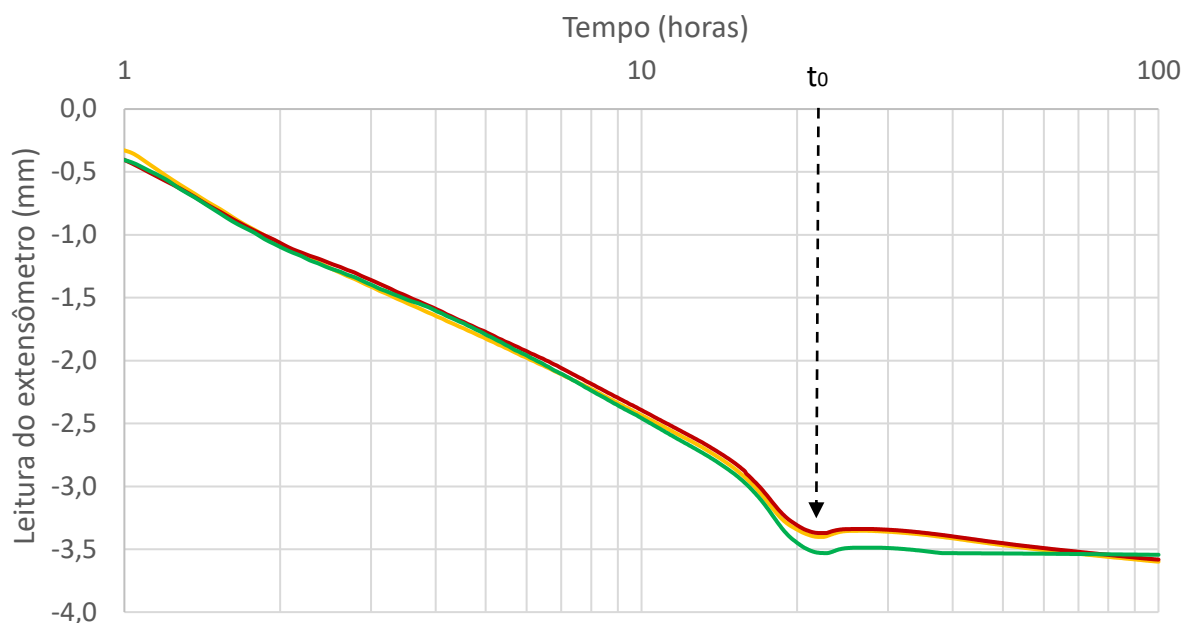


Figura 3.7: Curva típica de deformação pelo tempo em escala logarítmica dos três corpos de prova nas 100 primeiras horas, com o tempo zero ( $t_0$ ) ocorrendo em torno de 22 horas, conforme indicado.

O valor exato do tempo zero obtido por este método foi confirmado na planilha de dados brutos do ensaio, onde se nota uma clara repetição das leituras dos extensômetros – formação do platô. Tal instante teve seu início praticamente no mesmo tempo nos três corpos de prova, o que comprova a acurácia adequada do método e das operações de ensaio.

### 3.5.1.2 Propagação do pulso ultrassônico

Este procedimento é baseado na metodologia proposta e descrita por Silva (2007), sendo utilizada como referência a norma ABNT NBR 8802 (2013). A finalidade do ensaio é determinar a velocidade de propagação da onda ultrassônica através do tempo, percorrida numa distância fixa. Então, curvas da velocidade do pulso ultrassônico pelo tempo podem ser plotados e o tempo zero equivale ao instante em que houve uma mudança brusca na velocidade do pulso.

As dimensões do corpo de prova foram propostas por Silva (2007), seguindo as prescrições da RILEM NDT 1 (1972), que estabelece as dimensões em função da frequência do transdutor, nesse caso de 54 kHz. Assim, o corpo de prova adotado apresenta uma forma prismática com 300 mm e 150 mm de dimensões longitudinal e transversal, respectivamente, além do furo nas faces da menor dimensão com 50 mm de diâmetro. Na Figura 3.8 é apresentado um esquema da forma e da ligação dos transdutores do ensaio.

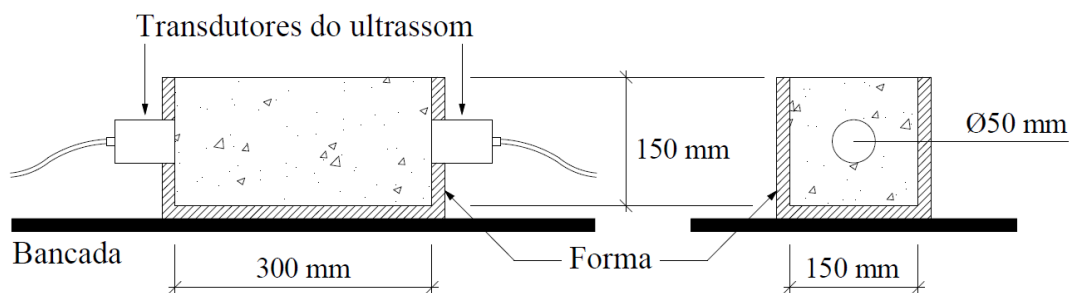


Figura 3.8: Esquema da fôrma e da ligação dos transdutores do ensaio do pulso ultrassônico

Foi utilizado um aparelho medidor do tempo de propagação de pulso ultrassônico portátil, com visor digital, marca PUNDIT, com 2 transdutores de 54 kHz de frequência. O aparelho possui um sistema para aquisição automática de dados (Pundit Link) e calcula a velocidade de propagação em m/s.

O ensaio é realizado nas primeiras 48 horas após a moldagem. O procedimento descrito a seguir está conforme Silva (2007).

1. Fabricar o microconcreto com ambiente e materiais na temperatura ( $21 \pm 2$  °C);
2. Aferir o equipamento usando a barra de referência metálica, que acompanha o aparelho, com vibração do tempo de trânsito conhecida;
3. Colocar uma camada fina de gel de silicone nas faces dos transdutores, para garantir contato contínuo entre sua superfície e o concreto;
4. Acoplar o receptor e transmissor nos furos existentes nas laterais da forma, penetrar os transdutores de modo a facear a forma internamente, proporcionando um arranjo com transmissão direta do pulso elétrico em onda de choque;
5. Moldar o corpo de prova em forma prismática, com seção transversal de 150 mm x 150 mm e comprimento de 300 mm, adensado manualmente com soquete do cone de Abrams, em três camadas de 30 golpes cada;
6. Cobrir a superfície exposta com filme plástico e fita adesiva, evitando a fuga de água;
7. A aquisição dos dados de velocidade de propagação da onda longitudinal, durante as primeiras 48 horas após a moldagem. O intervalo entre as leituras é de 3 minutos;
8. Traçar a curva velocidade de propagação versus idade do microconcreto.
9. O patamar de percolação (tempo zero) é assumido como sendo o tempo transcorrido desde a adição da água à mistura até o momento onde houve o aumento brusco na velocidade da propagação da onda ultrassônica no microconcreto.

Na Figura 3.9 é mostrado o ensaio realizado no laboratório de Furnas.

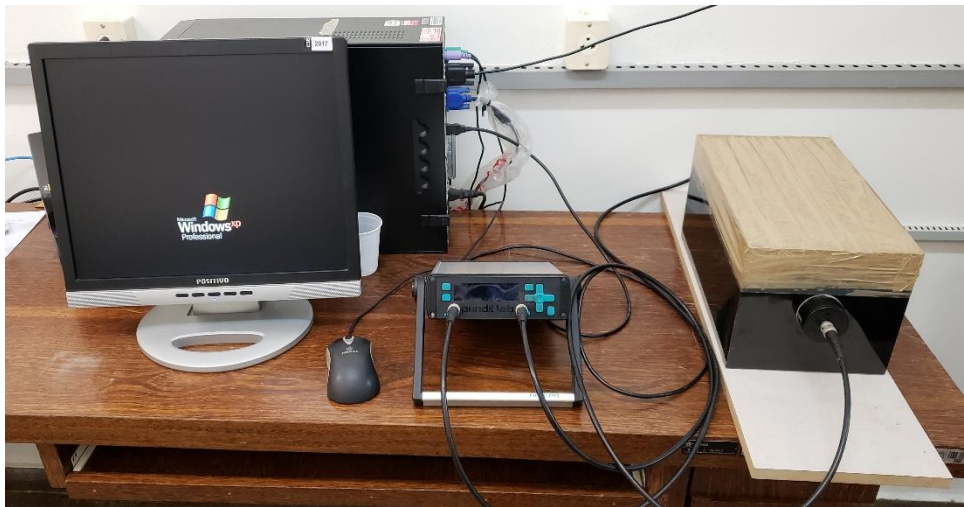


Figura 3.9: Ensaio de propagação do pulso ultrassônico em execução.

Na Figura 3.10 é mostrado um gráfico típico obtido no ensaio. Observa-se claramente o instante em que ocorre o aumento brusco na velocidade de propagação do pulso ultrassônico, sendo este adotado como o tempo zero. Neste exemplo específico, em torno de 690 minutos, ou 11,5 horas. O zero do gráfico representa o momento da adição da água a mistura.

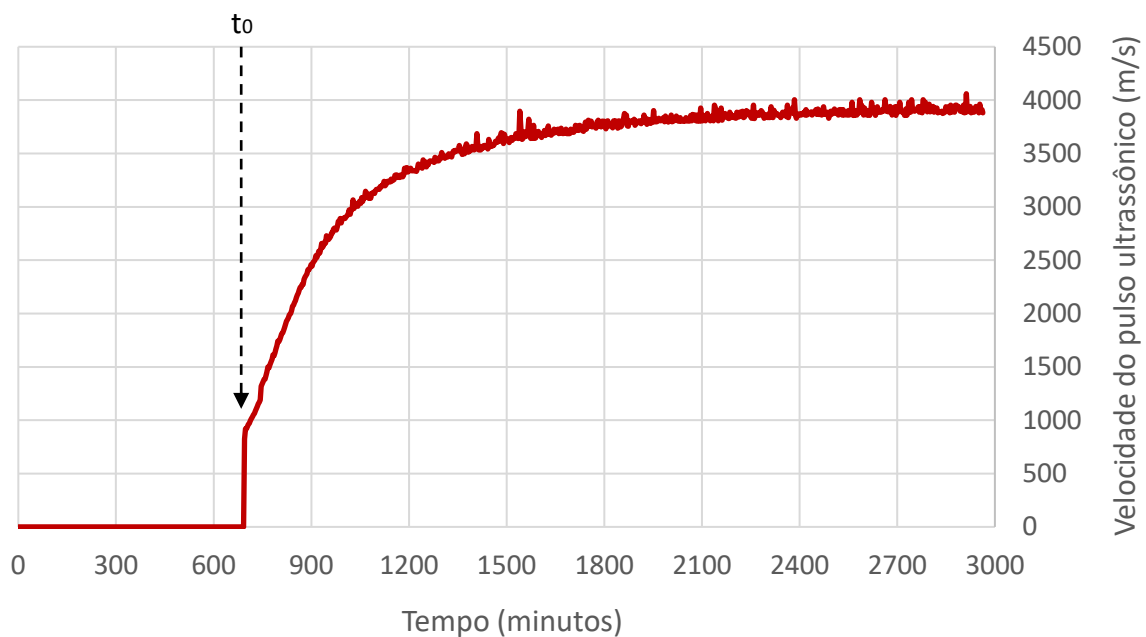


Figura 3.10: Curva típica da velocidade da propagação do pulso ultrassônico pelo tempo.



### 3.5.2 Retração autógena

#### 3.5.2.1 Tubos corrugados

O ensaio de determinação da retração autógena pelo método dos tubos corrugado é realizado de acordo com a ASTM C1698-09 (2014). De acordo com a norma, para cada pasta ou microconcreto são moldados três corpos de prova e o ensaio é realizado por 28 dias.

Os aparatos para realização do ensaio foram fabricados segundo as especificações de norma, devido ao seu alto custo de importação. Já os tubos corrugados foram importados, uma vez que não foi localizado no Brasil tubos que seguissem as especificações impostas. Não se tem registro na literatura técnica da execução desse ensaio em laboratório brasileiro de pesquisa.

Os moldes dos corpos de prova consistem de tubos corrugados feitos de polietileno de baixa densidade, com espessura de  $(0,5 \pm 0,2)$  mm, comprimento  $(420 \pm 5)$  mm, diâmetro externo  $(29 \pm 0,5)$  mm e duas tampas cônicas para fechamento das extremidades. Na Figura 3.11 são mostrados os tubos corrugados.



Figura 3.11: Tubos corrugados utilizados para o ensaio de determinação da retração autógena.

A moldagem dos corpos de prova consiste em fechar uma das extremidades do tubo corrugado com uma das tampas com cola epóxi e, com o auxílio de um funil colocado na outra extremidade do tubo, preencher o molde em três camadas. Cada camada recebe adensamento manual com o uso de uma haste metálica ou por meio da mesa vibratória. Ao concluir o preenchimento do tubo, a tampa superior é ajustada para selar o molde e fixada também com cola epóxi. Na Figura 3.12 é demonstrado o procedimento de moldagem descrito.



Figura 3.12: Procedimento de ensaio do tubo corrugado. (a) Preenchimento do molde com auxílio de um funil, (b) adensamento da camada com haste metálica, (c) tudo completamente preenchido, (d) tampa com cola epóxi sendo colocada em contato com o material para fechamento do tubo, (e) fechamento do tubo e (f) fixação da tampa superior até secagem da cola.

Concluída a moldagem, determina-se a massa inicial de cada corpo de prova (Figura 3.13), para avaliar a perda de massa de água ao final do ensaio. Coloca-se o molde preenchido no aparato de ensaio e se realiza também a medida do comprimento inicial do corpo de prova, com auxílio de um paquímetro. O início das medições de deformação se dá somente quando os três corpos de prova, da mesma mistura, são colocados no aparato e medidos, como mostrado na Figura 3.14.



Figura 3.13: Pesagem dos tubos corrugados preenchidos.

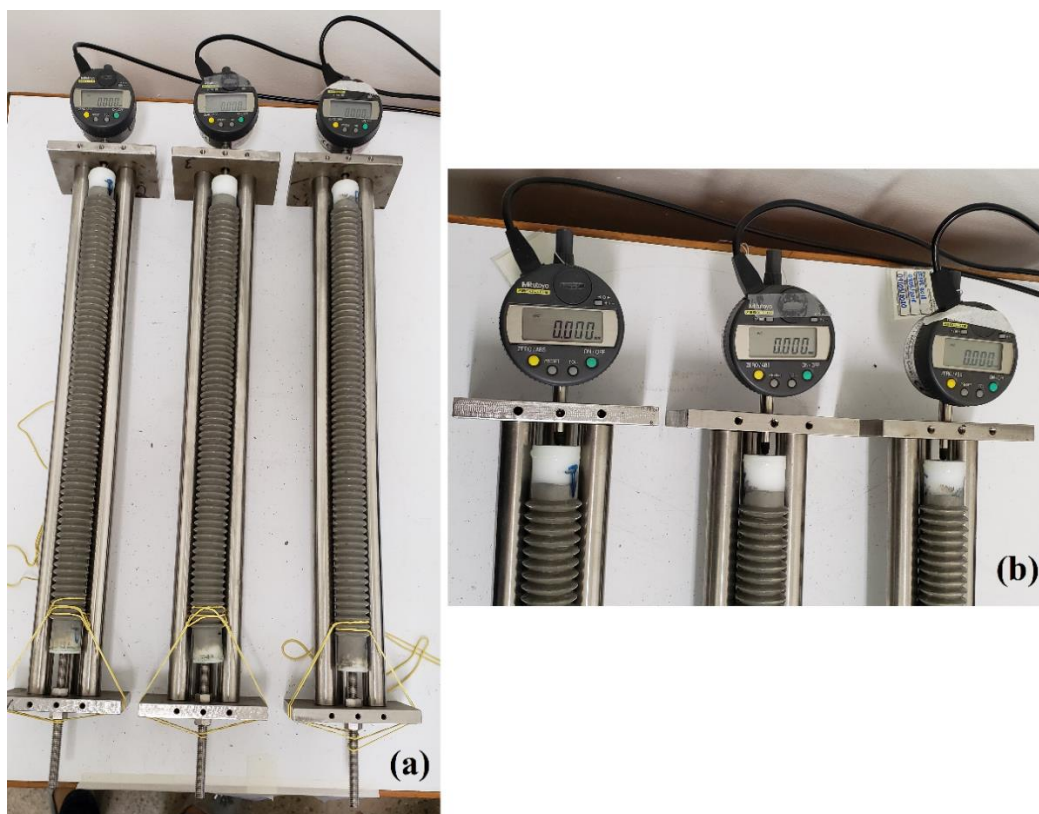


Figura 3.14: (a) Colocação dos corpos de prova no aparato de ensaio e (b) detalhe dos relógios zerados.

Após a colocação dos corpos de prova sobre a estrutura de ensaios, a deformação de cada tubo corrugado é registrada por um relógio comparador (Figura 3.14 – b), com precisão de 0,001mm, conectado a um software de aquisição automática de dados. Para que toda deformação seja registrada pelo relógio comparador, prende-se o lado oposto do tubo ao aparato de ensaio com ligas elásticas (Figura 3.14 – a), para que o tubo não desencoste do lado fixo do aparato.

A norma permite que, ao completar três dias de leituras, os corpos de prova possam ser removidos do equipamento de ensaio e armazenados em uma folha de plástico ondulado, a fim de se liberar o equipamento para início de novos ensaios. As medidas subsequentes nos corpos de prova, até a idade de 28 dias, seriam realizadas manualmente, colocando novamente o tubo corrugado no equipamento de ensaio para medir o deslocamento mostrado no relógio comparador, após a zeragem do equipamento com uma barra de referência.

Nesta pesquisa, entretanto, optou-se por não remover os tubos do aparato durante os 28 dias de ensaio, uma vez que são frágeis e tal manuseio poderia danificar as amostras, além de comprometer a precisão das medidas, conforme evidenciado por Wyrzykowski *et al.* (2017).

As leituras dos extensômetros foram aquisitadas automaticamente a cada 5 minutos nos primeiros 7 dias ensaio e posteriormente a cada hora até os 28 dias.

Finalizado o ensaio, pesa-se novamente o corpo de prova para a verificação da porcentagem da perda de massa de água.

Então, com os dados obtidos, calcula-se a deformação autógena de cada tubo corrugado, de acordo com a Equação 3.2, e constroem-se as curvas deformação versus tempo.

$$Deformação\ autógena = \frac{l(t) - l(t_0)}{L_0 + l(t_0) - 2 \cdot L_{tampa}} \cdot 10^6 \mu m/m$$

(Equação 3.2)

Onde:

$t$  é o tempo decorrido desde a adição da água ao cimento;

$t_0$  é o tempo zero;

$l(t)$  é a leitura do extensômetro no tempo  $t$ , em mm;

$L_0$  é o comprimento inicial do corpo de prova, medido ao se colocar o corpo de prova no aparato, em mm;

$L_{tampa}$  é o comprimento médio das tampas de fechamento dos tubos, em mm.

### 3.5.2.2 Prismas

A metodologia para determinação da retração autógena utilizada neste trabalho foi a mesma adotada por Silva (2007) e Francinete Silva Júnior (2017), baseada na metodologia proposta por Tazawa (1999), com modificações. Foram utilizados, conforme descrito no item 2.3.3.2, extensômetros embutidos do tipo *strain gage*, de resistência igual a 120  $\Omega$ , da marca Kyowa, modelo KM 120-H2-11-L100-3, de modo a aumentar a precisão e facilidade de aquisição dos dados.

Os ensaios foram realizados de acordo com as prescrições da Instrução de Trabalho IT.MC 201 do laboratório de Furnas (FURNAS, 2015):

1. Revestir os moldes prismáticos com dimensões 7,5 cm x 7,5 cm x 28,5 cm com folhas de poliestireno expandindo de 5 mm de espessura no fundo e nas faces laterais, a fim de diminuir o atrito e permitir a livre movimentação do material no interior da fôrma (Figura 3.15);





Figura 3.15: Fôrmas revestidas com folhas poliestireno expandido e com os extensômetros já instalados.

2. Instalar um extensômetro no interior do molde, fazendo-o coincidir com o eixo longitudinal do molde, como também pode ser observado na Figura 3.15;

3. Produzir o microconcreto conforme procedimento de mistura descrito no item 3.4.2 – Produção dos microconcretos. Deve-se anotar a hora em que a água é adicionada à mistura;

4. Moldar os corpos de prova em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, adensadas mecanicamente em mesa vibratória. Deve-se tomar o cuidado para que o extensômetro não seja avariado ou deslocado da sua posição durante as operações de moldagem e adensamento;

5. Selar os corpos de prova, imediatamente após a moldagem, a fim de evitar a perda de água para o ambiente. Na selagem dos corpos de prova foram utilizados filme plástico e fita adesiva, devendo ser empregado no mínimo 5 (cinco) camadas de filme e 2 (duas) de fita adesiva (Figura 3.16);



Figura 3.16: Corpos de prova selados e conectados a leitora de dados, em sala com temperatura e umidades controladas.

6. Pesar o conjunto e levar para a sala de ensaios, com umidade  $50 \pm 2\%$  e temperatura  $21 \pm 2$  °C controladas. A pesagem do molde preenchido é para avaliar a perda de massa de água, verificada após o término do ensaio;

7. Realizar as medidas de deformação diretamente na leitora de dados (Figura 3.16), conectando os cabos do extensômetro à leitora. A aquisição de dados é realizada manualmente, a cada 1 hora nas primeiras 6 horas de ensaio e então uma vez por dia até os 28 dias de idade;

8. Pesar, ao final dos 28 dias, novamente o conjunto para verificação da perda de massa de água.

Com os dados obtidos ao longo dos 28 dias de ensaio, constroem-se as curvas de deformação versus tempo.

### 3.5.3 Resistência a compressão e módulo de deformação

A resistência à compressão e o módulo de deformação das misturas estudadas, nas idades de 7 e 28 dias, foram determinadas segundo as normas vigentes – ABNT NBR 5738 (2003), ABNT NBR 5739 (2007) e ABNT NBR 8522 (2008). Os ensaios foram realizados no laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A, de acordo com os procedimentos de moldagem, adensamento e cura descritos no 3.4.3.

### 3.5.4 Calorimetria por condução isotérmica

Os ensaios de calorimetria por condução isotérmica foram realizados no Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia – GO, utilizando o calorímetro de condução isotérmica Thermometric TAM AIR (Figura 3.17), composto por oito canais com controle de temperatura, fabricado pela TA Instruments com as características apresentadas na Tabela 3.11 e com aquisição de dados feita pelo software PicoLog.

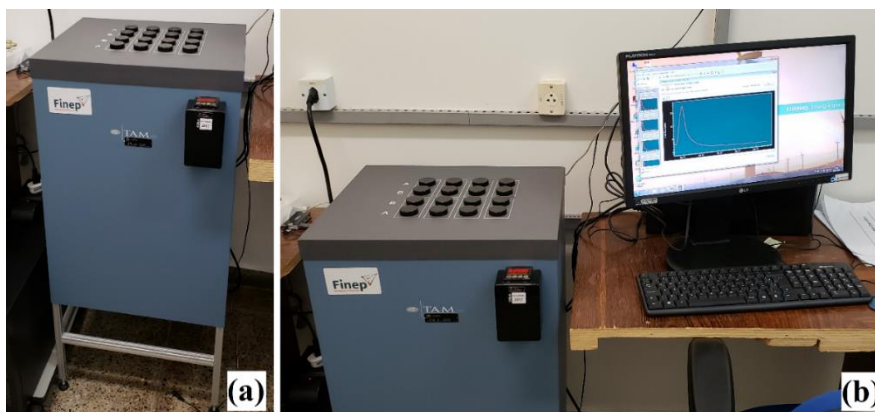


Figura 3.17: (a) Calorímetro de condução isotérmica Thermometric TAM AIR e (b) calorímetro conectado ao software aquisitor de dados PicoLog.

Tabela 3.11: Especificações do equipamento TAM AIR utilizado nos ensaios.

Amplitude de temperatura	5°C a 90°C
Tipo do termostato	Air
Estabilidade do termostato	± 0,02°C
Capacidade máxima de amostra	20 ml
Limite de detecção	4μW
Precisão de detecção	±20μW

Para realização do ensaio pode-se optar por fazer a mistura das pastas dentro do próprio calorímetro ou externamente a ele. As duas opções se diferenciam na homogeneização das misturas e na aquisição dos dados iniciais de liberação de calor. Na mistura interna é possível se avaliar toda a liberação de calor, desde os primeiros instantes da hidratação. No procedimento de mistura externa perde-se a primeira parte do processo, pois quando a mistura é introduzida no equipamento já estão ocorrendo as reações de hidratação do cimento, deixando de adquirir os dados do primeiro pico de liberação de calor e informações sobre a reação dos aluminatos.

Optou-se pelo procedimento de mistura externa, pois este confere maior homogeneidade das misturas e não se tem interesse específico nas reações dos aluminatos. A sequência de preparo das amostras externas e execução do ensaio, conforme Agostinho (2017), está descrita a seguir:

1. Determinação da linha de base do calorímetro com os canais vazios;
2. Mistura das pastas externamente, conforme descrito no item 3.4.1 – Produção das pastas de cimento;
3. Introdução da pasta pronta na ampola e pesagem de sua quantidade, em torno de 5 (cinco) gramas por ampola;
4. Execução do lacre da ampola;
5. Introdução das ampolas com a pasta e as ampolas vazias nos canais;
6. Marcação do tempo decorrido do contato líquido-sólido até a introdução da ampola no calorímetro;
7. Início da estabilização de sinal pelo calorímetro (45min);
8. Início da aquisição de dados, ocorrendo por 168 horas (7 dias) a cada 3 segundos.

9. Cálculo da quantidade de cada componente a partir da massa da amostra inserida na ampola para cadastro dos componentes no software.

10. Construção, a partir dos dados obtidos, das curvas de fluxo de calor liberado e de calor acumulado ao longo do tempo.

Na Figura 3.18 são apresentadas algumas das etapas do ensaio.

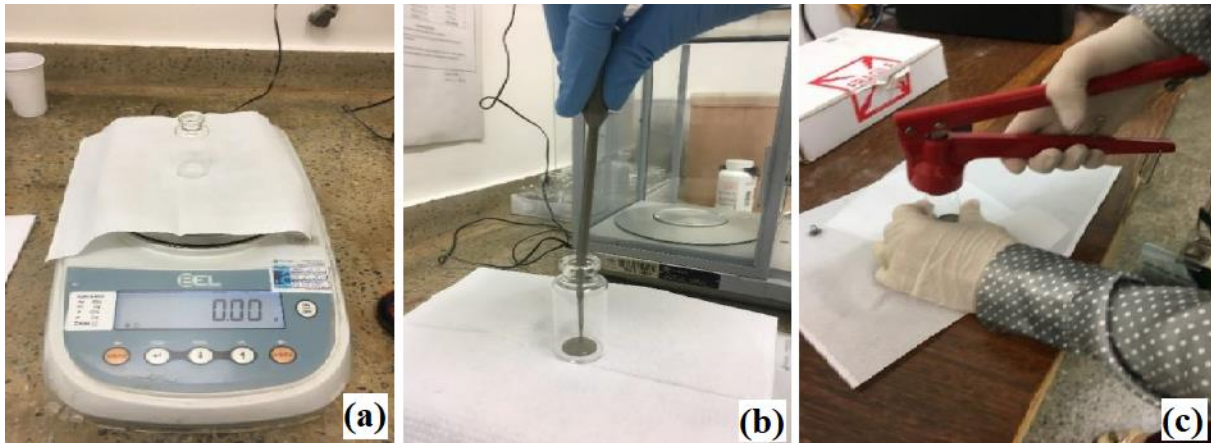


Figura 3.18: Processo de preparação para realização do ensaio de calorimetria: (a) pesagem da ampola vazia, (b) preenchimento da ampola com aproximadamente 5 g da mistura e (c) lacre das ampola.

Além da apresentação gráfica das curvas de cinética de hidratação, podem ser calculados parâmetros calorimétricos como taxa de aceleração, tempo do fim da indução, e tempo do pico de formação de C-S-H, pelo método gráfico das tangentes, apresentado na Figura 3.19. A taxa de aceleração é calculada a partir de uma regressão linear do segmento específico da curva de fluxo de calor, em função do tempo (inclinação da curva de aceleração).

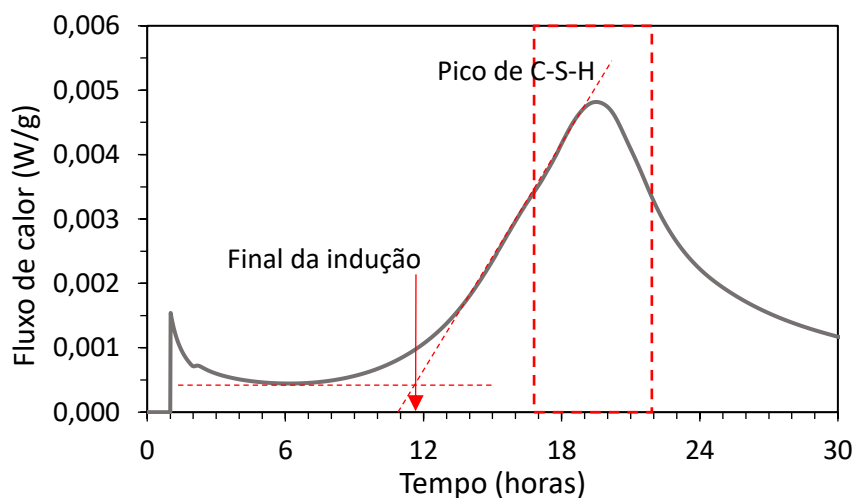


Figura 3.19: Ilustração do método gráfico das tangentes.



## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 TEMPO ZERO

O tempo zero foi determinado com o intuito de balizar o momento para se iniciar a determinação experimental da retração autógena, no qual o material cimentício desenvolve uma estrutura suficientemente rígida para se opor às variações de volume.

Nesta pesquisa duas metodologias foram utilizadas para obter o tempo zero: o método da taxa de desenvolvimento da deformação, determinado no ensaio dos tubos corrugados (tanto nas pastas quanto nos microconcretos), e o método da propagação do pulso ultrassônico, realizado apenas nos microconcretos.

#### 4.1.1 Taxa de desenvolvimento da deformação

Nas Figura 4.1 e Figura 4.2 é exemplificada a obtenção do tempo zero pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação para dois dos quatros traços: a pasta de referência (REF-P) e o microconcreto de referência (REF-M), respectivamente. A curva é obtida a partir do ensaio de determinação da retração autógena nos tubos corrugados, sendo colocado o eixo do tempo em escala logarítmica para melhor percepção da formação do platô na curva. O tempo zero é definido como o início da formação desse platô.

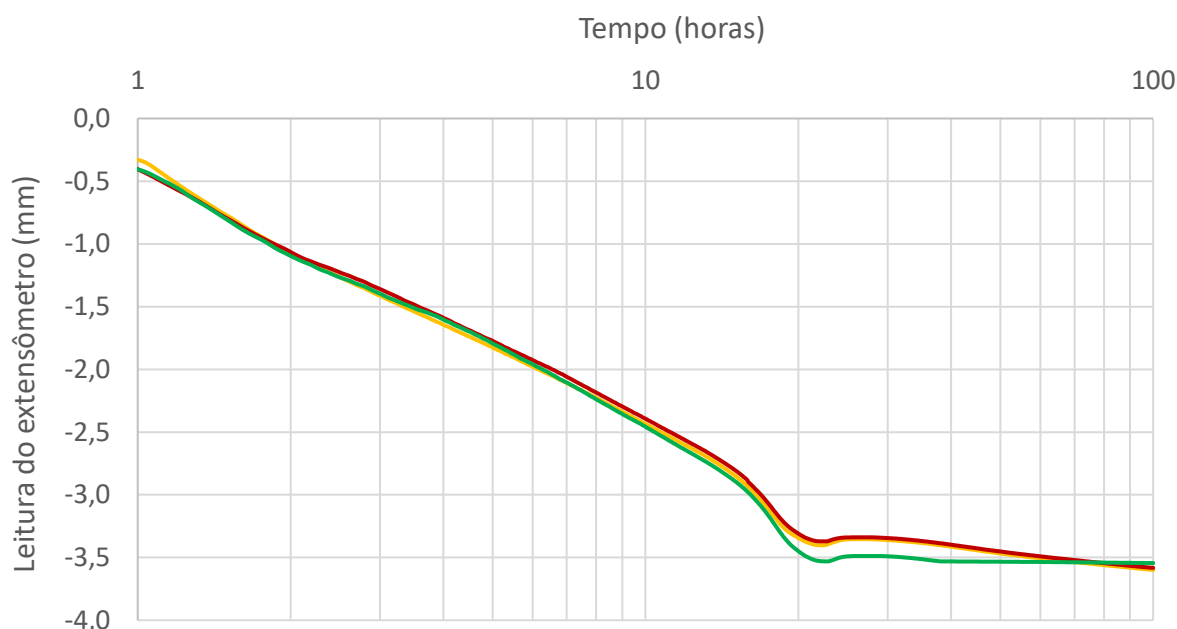


Figura 4.1: Deformação dos três corpos de prova pelo método dos tubos corrugados do traço REF-P.

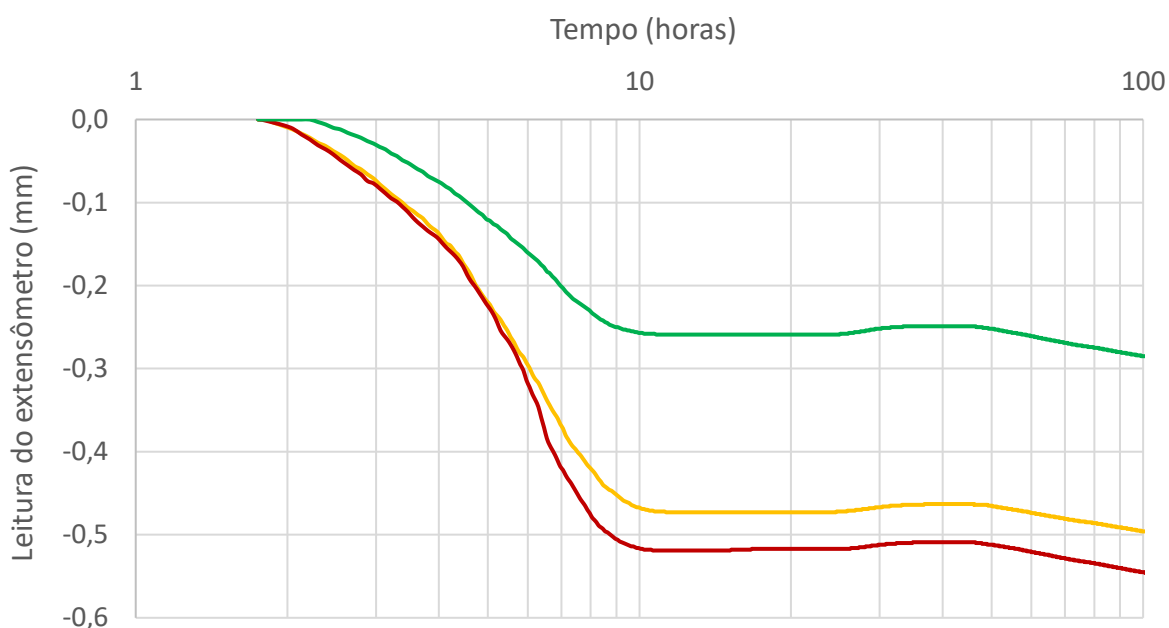


Figura 4.2: Deformação dos três corpos de prova pelo método dos tubos corrugados do traço REF-M.

Embora perceba-se, principalmente para o traço REF-M (Figura 4.2), que as curvas de deformação não estão sobrepostas, nota-se claramente que a formação do platô ocorre no mesmo horário para os três corpos de prova. O desalinhamento entre curvas nos tubos de um mesmo traço é corrigido pela determinação do tempo zero.

Para os traços apresentados nas Figura 4.1 e Figura 4.2, os tempos zero obtidos foram de 21h57 para o traço REF-P e 10h53 para o traço REF-M. Os resultados de  $t_0$  dos traços obtidos pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados de tempo zero obtidos pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação das pastas e microconcretos estudados.

Traço	Tempo zero pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação
REF-P	1317 min ou 21h57
SAP-P	719 min ou 11h59
REF-M	653 min ou 10h53
SAP-M	541 min ou 9h01

Os resultados mostraram que, para o método em questão, a adição do SAP diminuiu o tempo zero, tanto das pastas quanto dos microconcretos. Para as pastas, a adição antecipou cerca de 10 horas e, para os microconcretos, cerca de 2 horas. Em todos os traços, a relação a/c total foi a mesma, de 0,35 e, nos traços contendo adição do polímero, a relação a/c básica foi de 0,29. Sendo assim, pode-se supor que a redução no tempo zero dos traços contendo SAP se

deve a menor quantidade de água disponível na mistura, uma vez que parte da água do traço estaria dentro do polímero (absorvida). Sabe-se que a menor a quantidade de água livre presente na mistura, corresponde a uma menor distância entre partículas sólidas e maior concentração de soluto, levando à redução do tempo de formação do patamar de percolação dos materiais cimentícios, como observado nas misturas contendo SAP.

A redução no tempo zero também foi observada por Francinete Silva Junior (2017), que concluiu que o menor  $t_0$  para concretos contendo SAP em relação ao concreto sem SAP, pode ser por causa da redução do espaço entre partículas, devido a ocupação de espaço pelo polímero, permitindo um tempo de percolação inferior.

Cabe ressaltar que o teor de superplastificante utilizado nas pastas foi fixo e igual a 3,0% em relação à massa de cimento. Já para os microconcretos, foi utilizado um teor de 1,2% em relação à massa de cimento no traço de referência e de 1,35% em relação à massa de cimento no traço contendo SAP.

Esperava-se que o aditivo superplastificante não influenciasse o tempo zero das pastas, uma vez que o mesmo teor foi utilizado nas duas misturas. Entretanto, o  $t_0$  determinado para a pasta de referência foi notavelmente alto, levantando a hipótese de que o teor de superplastificante possa ter sido dosado em excesso para o traço REF-P, porém, não interferindo no resultado da pasta contendo SAP. Para os microconcretos, a diferença no teor de superplastificante nos dois traços poderia causar alguma influência, porém pequena, devido ao baixo teor utilizado e à baixa diferença entre os teores dos traços.

Além disso, comparando-se os diferentes materiais (pastas e microconcretos), percebe-se, conforme esperado, que os microconcretos apresentam tempo zero menor que o das pastas equivalentes, uma vez que a presença do agregado facilita a formação do patamar de percolação.

Esta metodologia foi a adotada para balizar o início da determinação experimental da retração autógena pelo método dos tubos corrugados.

#### 4.1.2 Propagação do pulso ultrassônico

Na Figura 4.3 é apresentada a obtenção do tempo zero pelo método da propagação do pulso ultrassônico para os microconcretos estudados. A curva é obtida traçando-se a velocidade de propagação do pulso ultrassônico na amostra, em função do tempo. O tempo zero é definido como o momento em que ocorre uma variação brusca na velocidade e pode ser facilmente observado no gráfico, quando a velocidade do pulso passa de nula a quase 1000 m/s.

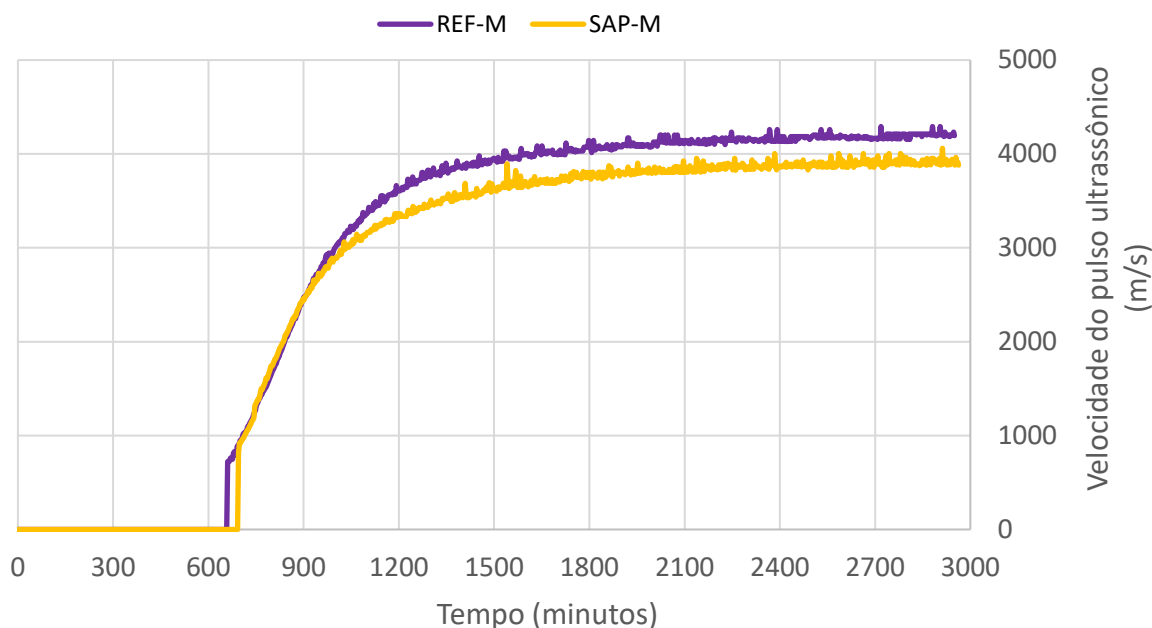


Figura 4.3: Curva da velocidade de propagação do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero dos microconcretos (traços REF-M e SAP-M).

Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados de tempo zero obtidos pelo método da propagação do pulso ultrassônico dos microconcretos.

Tabela 4.2: Resultados de tempo zero obtidos pelo método de propagação do pulso ultrassônico dos microconcretos.

Traço	Tempo zero pelo método da propagação do pulso ultrassônico
REF-M	661 min ou 11h01
SAP-M	695 min ou 11h35

Os tempos zeros obtidos foram de 661 minutos para o traço REF-M e de 695 minutos para o traço SAP-M, mostrando um aumento no tempo zero com a adição do polímero da ordem de 30 minutos. Em ambos os traços, a relação  $a_{tot}/c$  é a mesma, portanto, esperava-se que o tempo zero das duas misturas fosse o mesmo ou que a adição do SAP o reduzisse, conforme explicado no item 4.1.1. Entretanto, esse aumento provavelmente foi devido ao fato do teor de superplastificante ter variado nos microconcretos – 1,20% para o traço REF-M e 1,35% para o traço SAP-M, uma vez que não se encontrou um teor intermediário em comum que não exsudasse a mistura referência e que permitisse uma trabalhabilidade mínima adequada à mistura contendo SAP.

A presença de aditivo superplastificante normalmente faz aumentar os tempos de pega (ZHANG *et al.*, 2016) devido à adsorção de suas moléculas na superfície das partículas de cimento, retardando o contato com as moléculas de água. Esse retardo é tanto maior quanto

maior for a dosagem de superplastificante, o que vai de encontro à variação obtida no tempo zero dos microconcretos pelo método da propagação do pulso ultrassônico.

O efeito do aditivo superplastificante em atrasar o tempo zero foi comprovado por Francinete Silva Junior (2017). O autor utilizou três teores de aditivo superplastificante (1,0%; 1,25% e 1,5%) em uma mistura de argamassa de referência ( $a/c = 0,30$ ) e observou que o acréscimo na dosagem do aditivo resultou no aumento do tempo zero.

Pode-se tirar conclusões também da velocidade final de propagação do pulso ultrassônico. O valor atingido pela velocidade final depende da evolução da fração de volume sólido total dos microconcretos. Assim, a velocidade final ligeiramente maior atingida pelo traço de referência, como pode ser visto na Figura 4.3, pode ser associada ao fato dessa mistura possuir uma fração sólida um pouco maior, ou seja, uma maior densidade e, conseqüentemente, menor porosidade. Esse comportamento era esperado, uma vez que o SAP, ao desinchar, deixa poros na pasta de cimento, aumentando a porosidade do material.

A técnica da propagação do pulso ultrassônico pode ainda ser utilizada como meio de controle de qualidade do concreto, uma vez que há uma tendência geral dos concretos de massa específica mais alta, de apresentarem maior resistência desde que não se varie a massa específica do agregado (NEVILLE, 2016). Na Tabela 4.3 é apresentada uma classificação da qualidade do concreto em função da velocidade final de propagação do pulso.

Tabela 4.3: Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade do pulso ultrassônico (NEVILLE, 2016).

Velocidade de propagação do pulso ultrassônico	Qualidade do concreto
> 4500 m/s	Excelente
3500 a 4500 m/s	Boa
3000 a 3500 m/s	Duvidosa
2000 a 3000 m/s	Pobre
< 2000 m/s	Muito pobre

Ambos os microconcretos apresentaram velocidade final por volta de 4000 m/s, sendo, portanto, classificados como de boa qualidade

Esta metodologia foi a adotada para balizar o início da determinação experimental da retração autógena pelo método dos prismas.

#### 4.1.3 Comparação entre os métodos de determinação do tempo zero

Os resultados de tempo zero obtidos pelos dois métodos para os microconcretos estudados estão apresentados na Tabela 4.4. Lembrando que, independentemente do método, o tempo zero é medido em relação ao momento em que a água foi adicionada à mistura (zero do gráfico), não ao momento de início do ensaio. Vale ressaltar ainda que os ensaios de ambos os métodos foram realizados a partir de uma mesma betonada.

Tabela 4.4: Resultados de tempo zero para as pastas e microconcretos estudados por ambos os métodos.

Traço	Tempo zero	
	Taxa de desenvolvimento da deformação	Propagação do pulso ultrassônico
REF-M	653 min ou 10h53	661 min ou 11h01
SAP-M	541 min ou 9h01	695 min ou 11h35

Observando os resultados obtidos, percebe-se que o tempo zero do microconcreto de referência (REF-M) apresentou essencialmente o mesmo resultado por ambos os métodos, diferindo em apenas 7 minutos (aproximadamente 1%). Tal comportamento, entretanto, é o contrário ao observado para o traço SAP-M, onde a adição do polímero causou efeitos opostos nos dois métodos. Analisando o método da taxa de desenvolvimento da deformação, a adição do SAP causou uma antecipação de quase 2 horas no tempo zero. Já ao avaliar o método da propagação do pulso ultrassônico, notou-se um retardo no tempo zero, da ordem de 30 minutos.

Nos tópicos anteriores (itens 4.1.1 e 4.1.2) duas possíveis explicações foram levantadas para a redução e para o aumento do tempo zero devido a adição do polímero. A redução, pode ser explicada pela menor quantidade de água livre na mistura e pela ocupação do espaço pelo próprio polímero, facilitando a formação mais rápida do patamar de percolação. E o aumento, se explica pelo uso variável de aditivo superplastificante, que adsorve suas moléculas na superfície das partículas de cimento, retardando o contato com as moléculas de água e a formação do patamar.

Perante duas explicações possíveis e contrastantes, é possível perceber que os métodos são afetados diferentemente pela adição do SAP, sendo o método da taxa de desenvolvimento da deformação mais sensível à água livre presente na mistura e o método da propagação do pulso ultrassônico mais suscetível às variações no teor de superplastificante. Seria necessário realizar mais ensaios para comprovação do comportamento.

O tempo zero do traço REF-M corrobora tal conclusão, uma vez que este apresentou resultados bastante próximos por ambos os métodos, mostrando que o comportamento variou com o método apenas quando se adicionou o SAP.

Cabe ressaltar ainda que o tempo zero determinado pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação é a média do resultado de três corpos de prova, enquanto o tempo zero determinado pelo método da propagação do pulso ultrassônico é resultado de apenas um corpo de prova. Sendo assim, o primeiro resultado pode ser considerado de maior confiança por apresentar repetibilidade em seus resultados, quando o segundo não.

## 4.2 RETRAÇÃO AUTÓGENA

A determinação da retração autógena foi realizada por duas metodologias distintas, assim como o tempo zero, sendo elas a metodologia dos tubos corrugados, utilizada tanto nas pastas como nos microconcretos, e a metodologia dos prismas, utilizada apenas nos microconcretos. A apresentação e análise dos resultados está dividida por método utilizado.

### 4.2.1 Metodologia dos tubos corrugados

Os resultados apresentados de retração autógena são referentes à média dos valores obtidos de três corpos de prova ensaiados para cada um dos quatro traços. As curvas individuais de cada traço (Apêndice B) se encontraram muito próximas entre si, revelando um excelente controle das operações de ensaio.

A perda de massa de água foi determinada para cada corpo de prova, com o objetivo de verificar se a retração avaliada foi um fenômeno eminentemente autógeno ou se houve secagem considerável. A perda de água dos corpos de prova, em relação à massa total, ao final dos 28 dias do ensaio de retração, foi menor que 0,4% para todos os traços. Portanto, pode-se dizer que neste período houve uma boa selagem dos corpos de prova, sem perda de água considerável. A retração de origem térmica foi desprezada em virtude das dimensões reduzidas dos corpos de prova, conforme observado por Silva (2007).

#### a) Pastas

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados de deformação autógena para 1, 3, 7, 14 e 28 dias para os traços do programa experimental. Os valores positivos representam deformação de expansão, enquanto os valores negativos representam deformação de retração.

Para desprezar a contração Le Chatelier, que ocorre antes da transição suspensão-sólido (tempo zero) e, portanto, não causa fissuração, a idade zero dos dados corresponde ao tempo zero, determinado pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação (item 4.1.1).

Tabela 4.5: Deformação autógena média, determinada pela metodologia dos tubos corrugados, para as idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias para as pastas e microconcretos estudados.

Traço	Deformação autógena ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )					
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
REF-P	-137	-501	-720	-755	-757	-754
SAP-P	212	228	204	127	125	101
REF-M	24	-42	-128	-181	-202	-219
SAP-M	121	164	186	190	190	190

A norma de ensaio dos tubos corrugados (ASTM C1698-09) sugere usar o tempo de fim de pega determinado com a agulha de Vicat como o tempo zero. Devido à relativa arbitrariedade do tempo de fim de pega determinado por este método, que não leva em consideração os materiais constituintes e os parâmetros de mistura, questiona-se no meio científico a confiabilidade de usá-lo como o tempo zero para balizar o início da determinação experimental da retração autógena e por isso não foi utilizado nesta pesquisa.

Na Figura 4.4 são apresentados os gráficos de retração autógena das pastas de referência e com SAP, desde o tempo zero, determinado pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação, até os 28 dias.

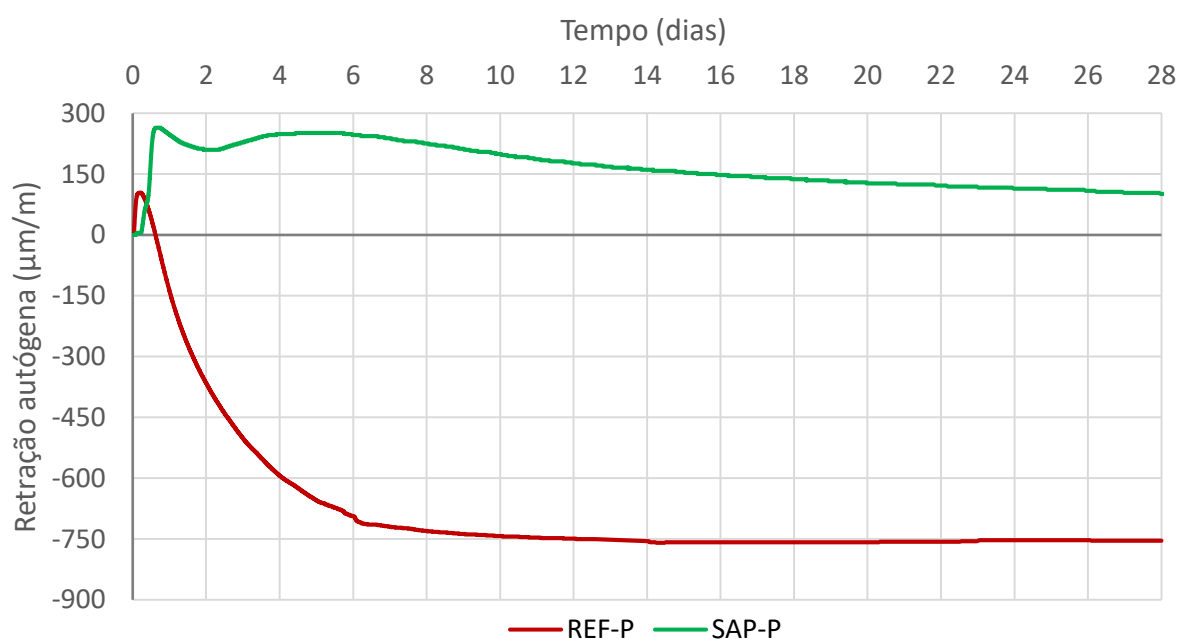


Figura 4.4: Retração autógena das pastas estudadas, desde o tempo zero até 28 dias, pela metodologia dos tubos corrugados.



Observando o gráfico, nota-se claramente o efeito do polímero em mitigar a retração autógena, conforme já havia sido comprovado pela linha de pesquisa na qual este trabalho se insere (ORDOÑEZ, 2013; SANTOS, 2016; MANZANO, 2016; FRANCINETE SILVA JUNIOR, 2017).

Analisando-se os resultados da pasta de referência, percebe-se uma expansão inicial, com o pico ocorrendo aproximadamente às 5 horas de idade e alcançando 104  $\mu\text{m}/\text{m}$ , seguida de uma forte retração, chegando a -754  $\mu\text{m}/\text{m}$  aos 28 dias. Constata-se ainda que com 1 dia, a pasta de referência retraiu 18% da retração total, aos 28 dias; com 3 dias, 66% desta já ocorreu; e com 7 dias, a pasta já havia retraído 95% do total. A evolução tão rápida da retração é bastante crítica, visto que nas primeiras idades o material cimentício ainda não desenvolveu grande parte de sua resistência mecânica e encontra-se mais suscetível à fissuração gerada por essa forte retração.

Já ao observar a curva da pasta com SAP, ainda se nota um pico de expansão inicial, entre 16 e 17 horas, porém muito mais intensa, chegando a 264  $\mu\text{m}/\text{m}$ , mais que o dobro do pico inicial de expansão do traço REF-P. A expansão é seguida por uma leve retração, até o início do segundo dia quando a pasta volta a expandir, e, após um segundo pico de expansão, próximo ao quinto dia, a pasta retrai a uma taxa muito menor que a referência, até os 28 dias, concluindo o ensaio com uma expansão em torno de 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Constata-se então que a adição do polímero não apenas eliminou completamente a retração autógena, causando até expansão ao final dos 28 dias, mas também alterou o comportamento da curva de deformação, inserindo um segundo pico de expansão.

O fenômeno da expansão nas misturas contendo SAP ainda não foi explicado pela comunidade científica. No entanto, o mecanismo mais consistente atualmente para explicar o fenômeno é baseado no crescimento de grandes cristais de hidróxido de cálcio e de etringita (trissulfo-aluminato de cálcio) durante as reações de hidratação (SILVA, 2007; SHEN *et al.*, 2016).

A redução da retração autógena nos materiais cimentícios com cura interna, ocorre devido a liberação gradativa de água por parte do SAP, à medida que a água capilar vai sendo consumida pelas reações de hidratação e a umidade relativa interna diminui. Essa liberação de água pelo polímero mantém os poros capilares cheios de água, mitigando ou até mesmo eliminando o fenômeno da autodessecação.

A eliminação total da retração autógena da pasta contendo polímero já era esperada, dado que o teor de SAP foi escolhido de modo a fornecer uma quantidade de água tal para cura interna que eliminasse totalmente a retração, conforme descrito no item 2.4.1 – Cura interna com polímero superabsorvente (SAP). O teor de polímero, e consequente quantidade água incorporada, mostrou-se inclusive excessivo, uma vez que ao final do ensaio, a pasta continuou apresentando expansão. Um teor um pouco menor provavelmente eliminaria totalmente a retração, reduziria o uso do material e diminuiria o prejuízo na resistência à compressão (como será visto adiante no item 4.4.1). A trabalhabilidade também melhoraria, já que não foi adicionada água extra para cura interna do polímero, tornando a mistura mais seca.

#### b) Microconcretos

Na Figura 4.5 são apresentados os gráficos de retração autógena dos microconcretos de referência e com SAP, desde o tempo zero, determinado pelo método da taxa de desenvolvimento da deformação, até os 28 dias.

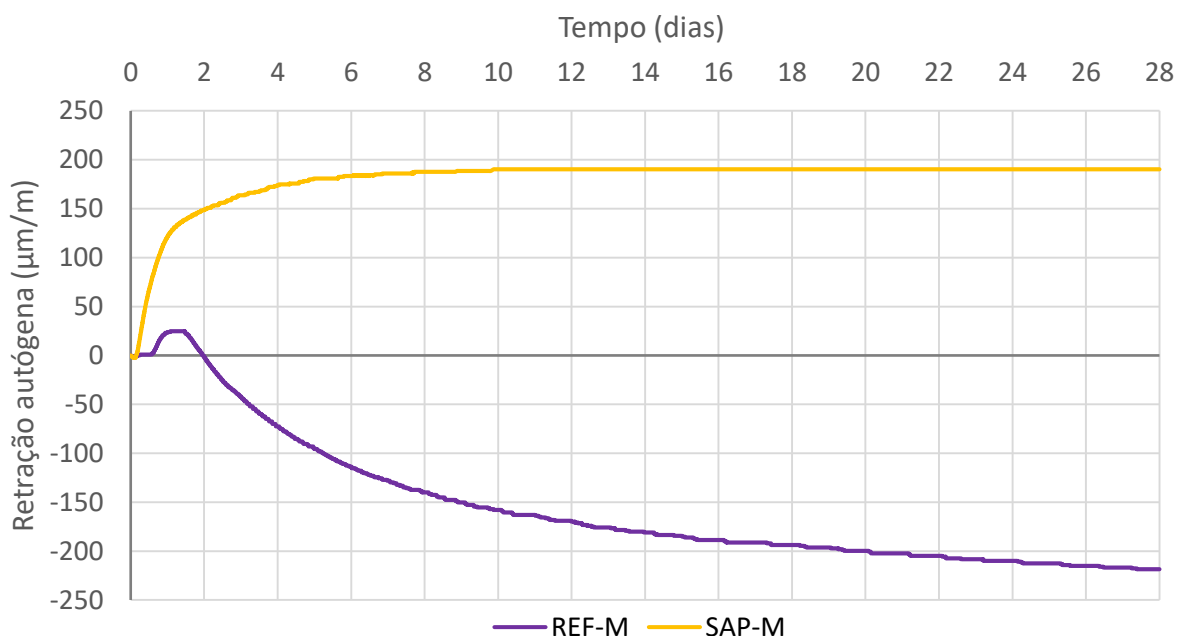


Figura 4.5: Retração autógena dos microconcretos, desde o tempo zero até 28 dias, pela metodologia dos tubos corrugados.

Semelhante ao que ocorreu para as pastas de cimento, a adição do SAP mostrou-se bastante eficiente na mitigação da retração autógena também nos microconcretos. Tal mitigação ocorre devido a liberação gradativa de água por parte do SAP, à medida que água capilar vai sendo consumida pelas reações de hidratação e a umidade relativa interna diminui.

Analisando a Figura 4.5, inicialmente a curva REF-M, percebe-se que houve um pico de expansão inicial entre às 26 e 35 horas de idade, chegando a 25  $\mu\text{m}$ , e então se inicia a retração,

que atinge seu valor máximo, de  $-219 \mu\text{m}$ , aos 28 dias. Aos 3 dias, a retração atingiu 19% do seu valor final, aos 28 dias; aos 7 dias, esse valor já atingiu 58%; e aos 14 dias, mais de 80%. A evolução mais lenta da retração do microconcreto de referência, quando comparada com a da pasta de referência, é benéfica, uma vez que os primeiros dias são os mais críticos, devido à baixa resistência mecânica. Com mais tempo para desenvolver sua resistência, o material se torna menos suscetível a fissuração devido à retração autógena.

Já ao observar a curva do microconcreto com SAP, não se percebe a ocorrência de um pico de expansão, verifica-se uma expansão a uma taxa constante e alta até o primeiro dia, seguida de uma taxa mais branda e uma estabilização da expansão já aos 10 dias. A 1 dia de idade 64% da expansão total já ocorreu; aos 3 dias, a expansão já chegou a 86% do total; e aos 7 dias, 98%.

Como para o caso das pastas, a eliminação total da retração autógena do traço contendo polímero já era esperada, dado que o teor de SAP foi calculado com esse objetivo específico. O teor de polímero mostrou-se também excessivo, pois o microconcreto contendo SAP continuou apresentando expansão ao final do ensaio. Um teor um pouco menor provavelmente eliminaria a retração, melhoraria a trabalhabilidade e resistência, e ainda seria mais vantajoso economicamente.

A ausência de retração da mistura SAP-M faz supor que a liberação de água pelo polímero manteve a umidade relativa interna elevada durante toda a hidratação dos compostos, não permitindo a ocorrência do fenômeno da autodessecação. Tal fato comprova que foi utilizado mais SAP do que o necessário para mitigar a retração autógena.

#### c) Comparação entre pastas e microconcretos

Na Figura 4.6 são apresentadas as curvas de retração autógena pelo método dos tubos corrugados, tanto das pastas como dos microconcretos, desde o tempo zero até os 28 dias.

Comparando os dois traços de referência (REF-P e REF-M), observa-se que ambas as curvas possuem o mesmo comportamento, variando-se apenas a intensidade, onde os valores de retração do microconcretos são bem inferiores aos da pasta. A diferença na magnitude da retração está associada à presença do agregado nos microconcretos, que atua como agente de restrição à deformação da pasta, reduzindo a deformação no microconcreto e, também, devido aos diferentes volumes de pasta (LIU e HANSEN, 2016).

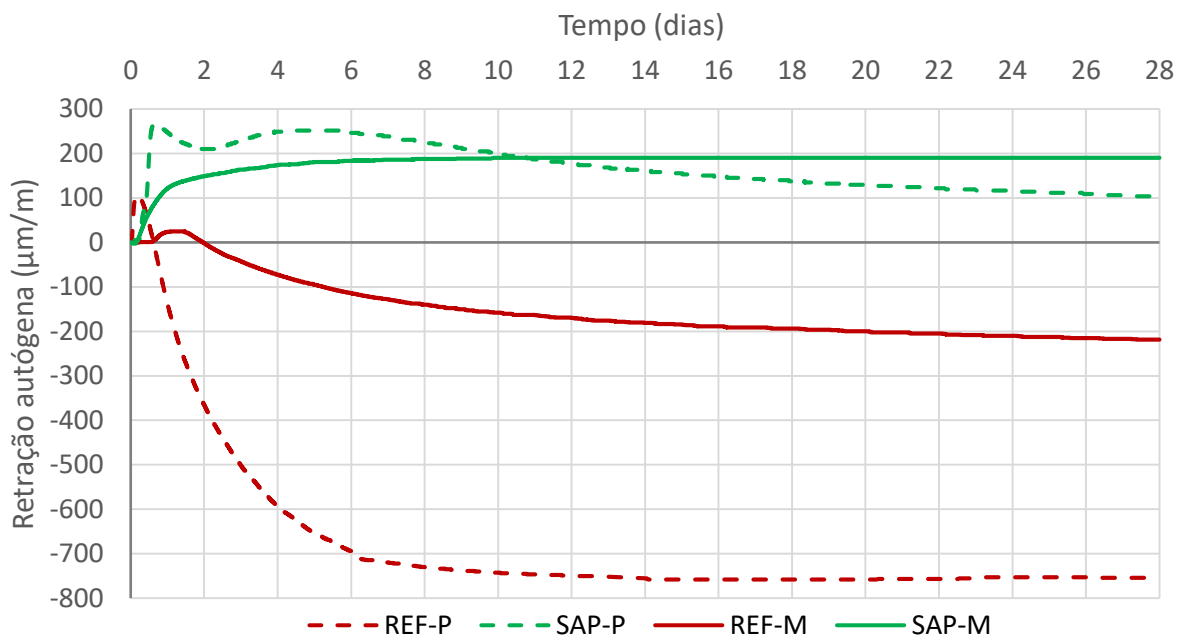


Figura 4.6: Retração autóloga das pastas e microconcretos estudados pela metodologia dos tubos corrugados.

Quanto ao comportamento das curvas contendo polímero (SAP-P e SAP-M), embora em ambos os casos o polímero tenha sido eficiente na eliminação total da retração autóloga, a pasta apresentou a formação de dois picos de expansão, enquanto o microconcreto apresentou apenas uma forte taxa de expansão em um primeiro momento seguida por uma estabilização já aos 10 dias, sem posterior expansão ou retração. O efeito restritivo do agregado não foi observado nas misturas contendo SAP.

Por fim, analisando a Figura 4.6 e a Tabela 4.5 verifica-se ainda que a maior parte da deformação ocorre até os 14 dias, podendo o ensaio ser realizado apenas até tal idade, uma vez que a retração autóloga só é crítica nas primeiras idades, não causando fissuração depois disso.

#### 4.2.2 Metodologia dos prismas

Os resultados apresentados de retração autóloga são referentes à média dos valores obtidos de dois corpos de prova ensaiados para cada um dos dois microconcretos. As curvas individuais de cada traço (Apêndice B), se encontraram bastante próximas entre si, revelando um ótimo controle das operações de ensaio.

A perda de massa de água foi determinada para cada corpo de prova, com o objetivo de verificar se a retração avaliada foi um fenômeno eminentemente autógeno ou se houve perda de água por evaporação considerável. A perda de água dos corpos de prova, em relação à massa total, ao final dos 28 dias do ensaio de retração, foi em média 0,1%. Portanto, pode-se dizer que neste período, houve uma boa selagem dos corpos de prova, com perda de água desprezível. A

retração de origem térmica foi desprezada em virtude das dimensões reduzidas dos corpos de prova, conforme observado por Silva (2007).

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados de deformação autógena para 1, 3, 7, 14 e 28 dias para os dois microconcretos estudados. Os valores positivos representam deformação de expansão, enquanto os valores negativos representam deformação de retração.

Tabela 4.6: Deformação autógena média, determinada pela metodologia dos prismas, para as idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias para os microconcretos estudados

Traço	Deformação autógena ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )					
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
REF-M	201	149	79	8	-32	-53
SAP-M	231	262	285	283	280	282

Para desprezar a contração Le Chatelier, que ocorre antes da transição suspensão-sólido (tempo zero) e, portanto, não causa fissuração, a idade zero dos dados corresponde ao tempo zero, determinado pelo método da propagação do pulso ultrassônico.

Na Figura 4.7 são apresentados os gráficos de retração autógena dos microconcretos de referência e com SAP, desde o tempo zero até os 28 dias.

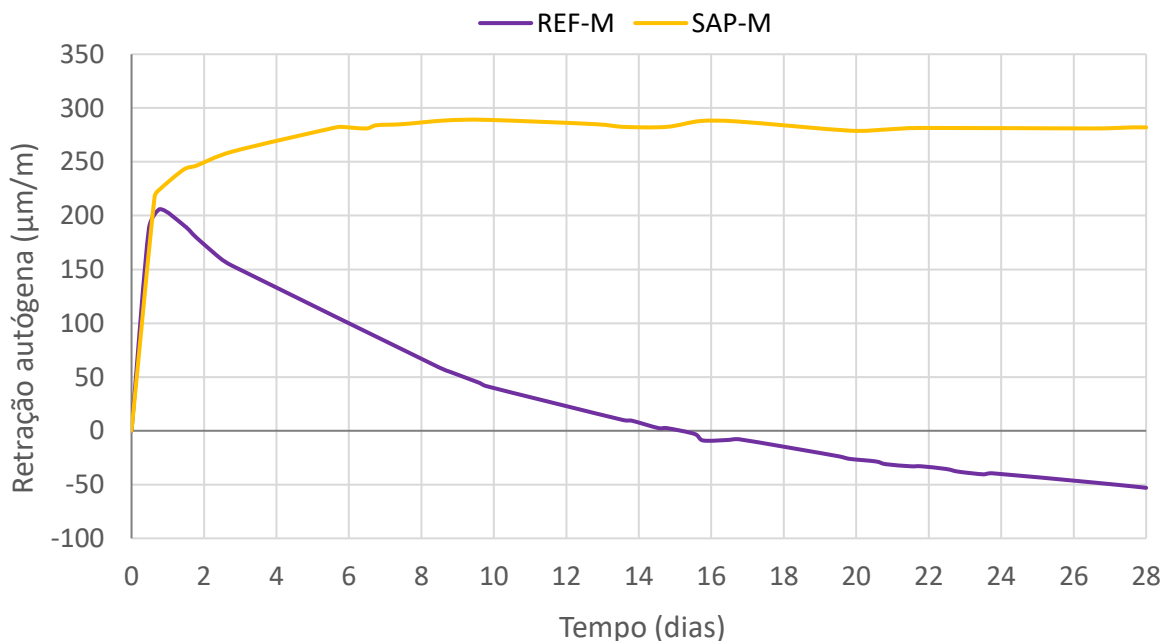


Figura 4.7: Retração autógena dos microconcretos estudados, desde o tempo zero até 28 dias, pela metodologia dos prismas.

Observa-se conforme esperado, que a adição do polímero se mostrou eficiente na mitigação da retração autógena. Embora a retração no traço de referência (REF-M) tenha sido pequena, a adição do SAP a eliminou completamente.

Analisando separadamente o comportamento das curvas, percebe-se que o traço REF-M apresentou um pico de expansão de 206  $\mu\text{m}$ , com aproximadamente 14 horas de idade, seguido por uma retração que só compensou a expansão inicial aos 15 dias. Após isso, o microconcreto continuou retraindo até atingir sua retração máxima, de -53  $\mu\text{m}$ , aos 28 dias. A alta expansão inicial acabou por compensar em grande parte a retração autógena do microconcreto, não chegando a valores críticos e só passando a ser uma deformação de retração aos 15 dias, quando provavelmente o microconcreto já atingiu valores consideráveis de resistência, se tornando menos suscetível a fissuração.

Esperava-se, para o traço de referência, um pico de expansão menor e uma retração consideravelmente maior, conforme observado em trabalhos anteriores dessa linha de pesquisa. Manzano (2016), em sua tese de doutorado, realizou o mesmo ensaio com um traço similar, de mesma relação a/c (0,35), porém com um maior teor de sílica ativa (10%, contra 6% utilizado neste trabalho). Seus resultados mostraram um pico de expansão de 104  $\mu\text{m}/\text{m}$ , seguida por uma forte retração, chegando a -423  $\mu\text{m}/\text{m}$ , aos 28 dias. Com 1 dia de idade, 52% dessa retração já havia ocorrido; com 3 dias, 76% do total; e com 7 dias, 96%.

Zhang, Tam e Leow (2003) mostraram que um aumento no teor de sílica ativa de 5% para 10%, em concretos de relação a/c de 0,35, pode gerar um aumento na retração autógena da ordem de 20%. Devido ao menor teor de sílica ativa utilizado nesta pesquisa, em comparação com o trabalho de Manzano (2016), esperava-se uma retração menor. Entretanto, a diferença na magnitude dos resultados foi muito expressiva, sendo necessária a repetição do ensaio para verificação do comportamento observado.

Ao observar a curva do microconcreto com SAP, verifica-se uma expansão a uma taxa constante e alta até 14 horas de idade, seguida de uma taxa mais branda e uma estabilização da expansão já aos 7 dias. Com 1 dia de idade, mais de 80% da expansão total já havia ocorrido.

Como comentado anteriormente, não há consenso sobre a explicação do fenômeno da expansão nas misturas contendo SAP e o mecanismo mais consistente atualmente é explicado pelo crescimento de grandes cristais de hidróxido de cálcio e de etringita durante as reações de hidratação (SILVA, 2007; SHEN *et al.*, 2016).

A diferença de comportamento observado com a adição do SAP era prevista, uma vez que o teor de polímero foi determinado de modo que eliminasse completamente a retração autógena. A alta expansão, ao final dos 28 dias, do traço SAP-M comprovou ainda que o teor utilizado foi maior que o necessário. A utilização de um teor menor poderia mitigar a retração de forma eficiente e melhorar a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas, de maneira mais econômica.

O fato de não ter havido retração na mistura SAP-M se deve a liberação de água pelo polímero, que manteve a umidade relativa interna elevada durante toda o processo de hidratação, não permitindo a ocorrência do fenômeno da autodessecação.

Na Figura 4.7 também é possível notar que a expansão inicial de ambos os traços é praticamente igual, ocorrendo a uma mesma taxa até aproximadamente 14 horas. Pode-se supor que a mudança de expansão para retração no caso da referência e a diminuição na taxa de expansão para o microconcreto com SAP representam uma mudança no mecanismo de deformação: do crescimento de grandes cristais de hidróxido de cálcio e de etringita para a queda na umidade relativa interna e consequente autodessecação, no caso do traço REF-M; e do crescimento dos cristais para a preservação de uma alta UR interna e ausência da autodessecação, no caso do traço SAP-M.

#### 4.2.3 Comparação entre as metodologias de determinação da retração autógena

As curvas de retração autógena dos microconcretos determinadas pelas duas metodologias, dos tubos corrugados e dos prismas, estão apresentadas na Figura 4.8. Cabe ressaltar que o zero no eixo das abcissas corresponde ao tempo zero (item 4.1).

Analisando-se o gráfico, nota-se que as curvas de mesmo traço apresentaram comportamentos parecidos, contudo, diferentes magnitudes. Os traços de referência exibiram o mesmo formato de curva, porém, o determinado pelo método dos prismas apresentou um pico de expansão 4 vezes maior do que o determinado pelo método dos tubos corrugados. Assim, mesmo possuindo taxas de retração parecidas, a curva REF-M obtida pelos prismas demorou 15 dias para compensar a expansão e apresentar retração, enquanto aquela obtida pelos tubos corrugados levou apenas 2 dias para tal. Seguindo a mesma proporção, o valor da retração final, aos 28 dias, foi de 4 vezes maior no microconcreto ensaiado nos tubos corrugados do que no microconcreto ensaiado nos prismas, mostrando a manutenção da taxa na retração.

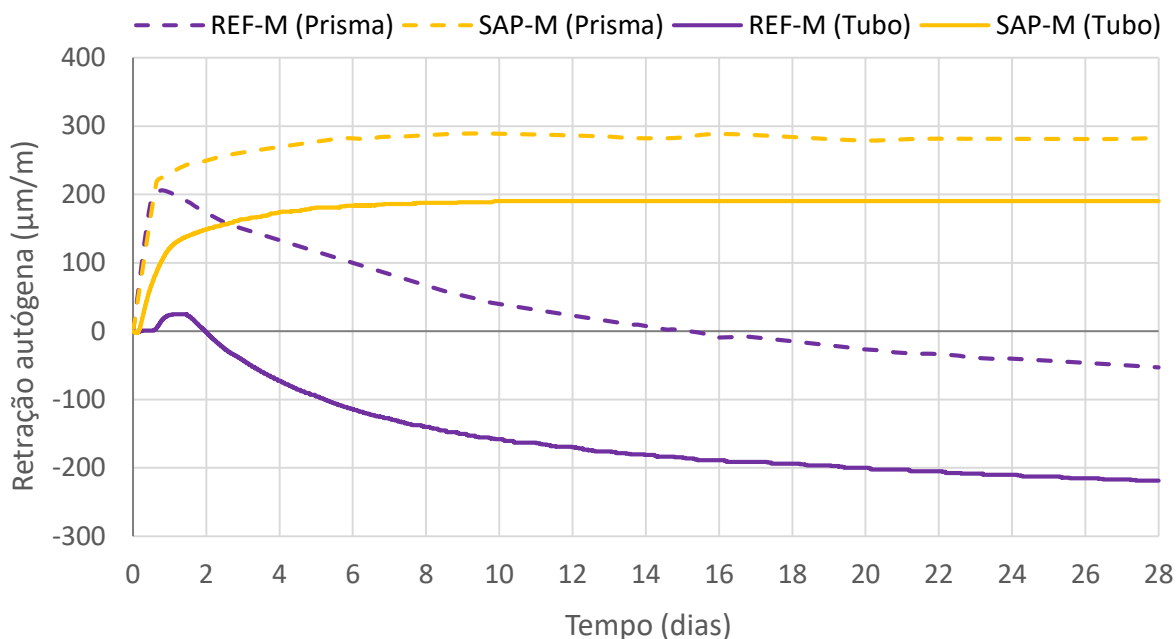


Figura 4.8: Retração autóloga dos microconcretos estudados pela metodologia dos tubos corrugados e dos prismas.

Conforme apontado no item 4.2.2, esperava-se uma retração maior do microconcreto de referência, determinada pelo método dos prismas. A expressiva diferença na magnitude do traço REF-M, quando comparada à trabalhos anteriores e aos resultados obtidos pela metodologia dos tubos corrugados, pode indicar alguma falha na realização do ensaio, havendo a necessidade de repetição deste.

Para os traços contendo adição de SAP foi possível notar uma maior semelhança de comportamento entre as metodologias utilizadas. A diferença de valores para a expansão dos microconcretos após a primeira forte taxa de crescimento é mais suave, embora alta. A primeira expansão do traço obtido pelos tubos corrugados chegou a cerca de 125 µm, enquanto que aquela do traço obtido pelos prismas chegou a 225 µm, 1,8 vezes a primeira. Já o valor da expansão final, aos 28 dias, foi 1,5 vezes maior no microconcreto ensaiado nos prismas do que no microconcreto ensaiado nos tubos corrugados.

A diferença de magnitude observada entre as metodologias é devida também às diferenças nos formatos e volumes dos corpos de prova e nos aparatos de medição – extensômetro embutido para o método dos primas e relógio comparador para o método dos tubos corrugados. Embora a diferença de magnitude seja considerável, a semelhança de comportamento vista no formato das curvas é notável e é um sinal de que ambos os métodos são eficazes.

Enfatiza-se ainda, que ambas as metodologias mostraram claramente o efeito da adição do SAP como agente mitigador da retração autóloga, pois em ambos os casos esta foi completamente eliminada.



Considera-se assim a metodologia dos tubos corrugados, novidade na determinação da retração autógena na linha de pesquisa na qual este trabalho se insere, apropriada e competente para mensuração de tal propriedade, contendo ou não adições, uma vez que mesmo havendo diferenças de magnitude, o comportamento observado entre as curvas dos dois métodos foi similar.

A qualidade dos resultados obtidos pelo método dos tubos corrugados, considerando principalmente a baixa variabilidade dos mesmos entre os três corpos de prova, e a automatização da aquisição de dados, que permite obtenção destes em pequenos intervalos de tempo, corrobora a eficácia e validade do método.

#### 4.3 CALORIMETRIA

O ensaio de calorimetria isotérmica foi realizado para avaliar o efeito da adição do SAP na cinética da hidratação das pastas de cimento Portland. Além das duas pastas do programa experimental (REF-P e SAP-P), foi realizada uma mistura extra, excepcionalmente para este ensaio, a mistura REF-BAS. Tal mistura não contém SAP, possui relação a/c de 0,29, contra 0,35 das pastas originais do programa, e possui o mesmo teor de aditivo superplastificante das demais (3,0% em relação à massa de cimento).

A relação a/c de 0,29 do traço extra equivale a relação a/c básica do traço contendo SAP, sendo assim, será possível comparar o traço SAP-P à duas referências, uma de mesma relação a/c total (REF-P) e a outra de mesma relação a/c básica (REF-BAS). A inclusão dessa mistura no programa experimental teve como objetivo esclarecer se a água absorvida pelo SAP participa ou não das reações de hidratação.

Na Figura 4.9 são apresentadas as curvas de fluxo de calor liberado ao longo do tempo para os sete dias (168 horas) de ensaio das três pastas estudadas. Na Figura 4.10 são apresentadas as mesmas curvas, porém apenas até os dois primeiros dias (48 horas) de ensaio, para melhor visualização do pico formação de C-S-H, onde também são apresentados os tempos de ocorrência deste pico para as três curvas.

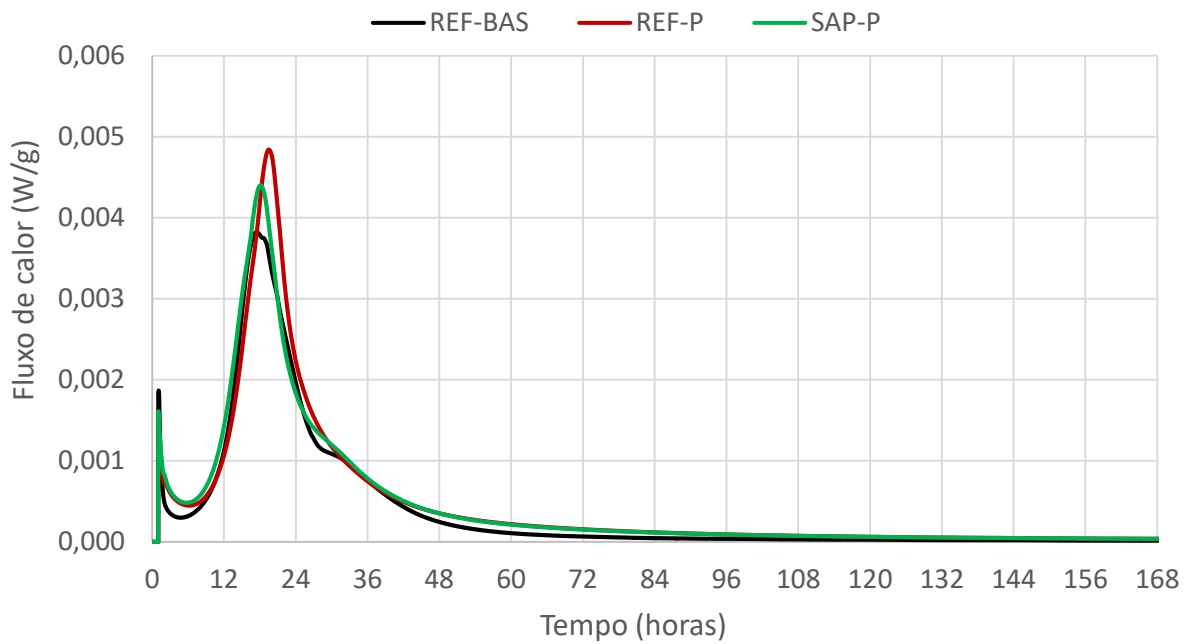


Figura 4.9: Curvas de fluxo de calor liberado até 7 dias para as três pastas de cimento estudadas.

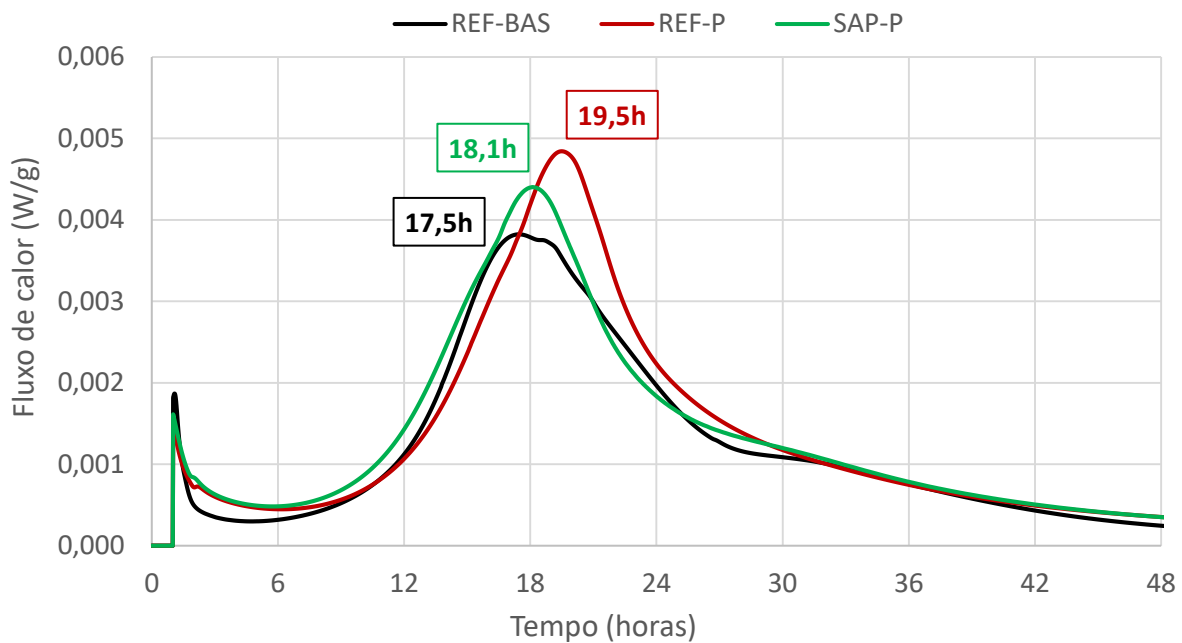


Figura 4.10: Curvas de fluxo de calor liberado até 2 dias para as três pastas de cimento estudadas.

Além da apresentação gráfica das curvas de cinética de hidratação, foram calculados o calor total acumulado, o tempo do fim da indução, o tempo do pico de formação de C-S-H e o fluxo de calor neste pico, e a taxa de aceleração, pelo método gráfico das tangentes, apresentado no item 3.5.4. Os resultados das análises gráficas estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Parâmetros extraídos das curvas calorimétricas das pastas de cimento estudadas.

Traço	Calor acumulado total (J/g)	Tempo do final da indução (h)	Fluxo de calor no pico de C-S-H (mW/g)	Tempo do pico de formação de C-S-H (h)	Taxa de aceleração (‰)
REF-P	282	11,7	4,84	19,5	0,59
SAP-P	279	10,4	4,40	18,1	0,52
REF-BAS	234	11,0	3,82	17,5	0,69

Analisando a Figura 4.10, percebe-se que a pasta contendo SAP apresentou um comportamento intermediário em relação às duas referências com diferentes a/c. Em relação à pasta com relação a/c básica (REF-BAS), a adição do polímero causou um retardo de cerca de 40 minutos na ocorrência do pico de formação de C-S-H e um aumento de 15% do fluxo de calor neste pico. Também, a taxa de aceleração da pasta contendo SAP foi 25% menor do que a pasta REF-BAS.

Comparando-se a curva contendo SAP com a referência de mesma relação a/c total (REF-P), percebe-se um comportamento oposto ao anterior. Neste caso, a adição do polímero antecipou as reações de hidratação, com o pico de formação de C-S-H ocorrendo 1h20 antes na pasta SAP-P do que na pasta REF-P. Além disso, o polímero causou uma queda de 10% no fluxo de calor neste pico. A taxa de aceleração do pico de formação de C-S-H foi menor na pasta SAP-P do que na pasta REF-P, assim, o menor pico da pasta contendo adição do polímero é compensado por uma inclinação mais tênue.

Segundo Kang, Hong e Moon (2018), a água de cura interna é liberada para o meio cimentício durante o período de aceleração, sendo consumida durante o período de desaceleração, essa constatação pode justificar o menor fluxo de calor no pico principal de formação de C-S-H do traço SAP-P em relação ao traço REF-P e também a menor taxa de aceleração, pois o fato do polímero manter os poros capilares cheios de água pode reduzir o calor liberado.

A aceleração do tempo final da indução da pasta contendo SAP em relação às duas pastas de referência (REF-P e REF-BAS) pode ser justificada pelo aumento da concentração iônica da pasta com adição do polímero, uma vez que parte da água da mistura está absorvida pelo SAP, e o restante, disponível para a mistura, estará mais concentrada, acelerando as reações de hidratação. A leve antecipação do final do período de indução da pasta contendo SAP, em

relação à pasta REF-BAS, enfatiza que a capacidade de absorção do polímero pode variar de acordo com a concentração iônica da mistura e que o SAP pode absorver íons alcalinos da mistura, hipótese levantada por Justs *et al.* (2014).

O tempo do final da indução está relacionado ao tempo de início de pega das misturas, assim, a antecipação do final da indução causado pela adição do SAP está de acordo com o tempo zero encontrado nas pastas no item 4.1, no qual constatou-se que a adição do polímero reduziu o tempo zero das pastas de cimento.

Na Figura 4.11 são apresentadas as curvas de calor acumulado após 7 dias para as três pastas. O calor acumulado ao final do ensaio foi de 234,1 J/g para o traço REF-BAS, 279,5 J/g para o traço SAP-P e 282,0 J/g para o traço REF-P.

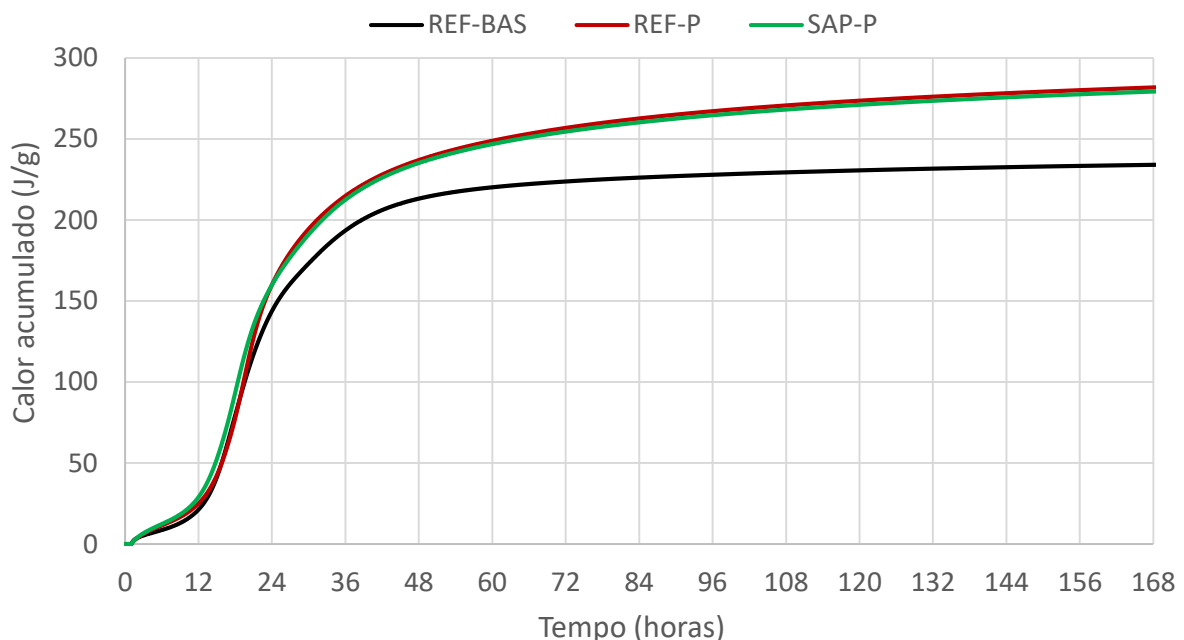


Figura 4.11: Curvas de calor acumulado até 7 dias para as três pastas de cimento estudadas.

Ao analisar o gráfico, nota-se que o traço com relação a/c básica (REF-BAS) apresentou menor calor acumulado, enquanto os traços de mesma relação a/c total apresentaram praticamente o mesmo calor acumulado, da ordem de 20% superior ao do traço REF-BAS. Esse resultado mostra a participação da água de cura interna nas reações de hidratação, uma vez que as pastas com mesma relação a/c total apresentaram praticamente o mesmo calor, mostrando que, ao ser liberada, a água antes absorvida pelo polímero reagiu, formando mais hidratos. Se a água de cura interna não participasse das reações, era esperado que o traço contendo SAP apresentasse mesmo calor acumulado total que a pasta com relação a/c básica, o que não ocorreu.

O comportamento parecido dos traços com mesma relação a/c total ao final do ensaio, visto nas curvas de calor acumulado (Figura 4.11), porém distinto no início, como mostrado nas curvas de fluxo de calor liberado (Figura 4.10), pode ser justificado pelo fato de que, no início do ensaio, a água de cura interna ainda estar dentro do SAP e só ser liberada à medida que a hidratação avança, para o meio cimentício, resultando em uma formação total de hidratos muito próxima, aos 7 dias.

#### 4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, ambos em corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm, aos 7 e 28 dias, apenas nos microconcretos. Os resultados e análise obtidos estão apresentados nos tópicos a seguir.

##### 4.4.1 Resistência a compressão

Os resultados de resistência a compressão dos microconcretos estão apresentados Tabela 4.8, para os 7 e 28 dias. No caso do microconcreto de referência (REF-M) o ensaio foi realizado aos 9 e 28 dias, devido a ocorrência de um feriado. São apresentados os resultados individuais dos dois corpos de prova (CP), a média, o desvio padrão e uma comparação dos resultados do microconcreto com SAP (SAP-M), em relação ao microconcreto de referência (REF-M). Os valores de desvio padrão obtidos indicam que não houve grande dispersão dos dados individuais.

Tabela 4.8: Resultados de resistência a compressão dos microconcretos estudados.

Microconcreto	Idade (dias)	Resistência a compressão (MPa)			Desvio padrão	Comparação com a referência
		CP 1	CP 2	Média		
REF-M	9	51,8	51,0	51,4	0,38	100%
SAP-M	7	29,4	28,2	28,8	0,59	56%
REF-M	28	55,0	60,4	57,7	2,71	100%
SAP-M		30,8	33,1	31,9	1,16	55%

Verificou-se que o SAP causou um decréscimo na resistência à compressão. Aos 28 dias, enquanto a mistura de referência obteve uma resistência de 57,7 MPa, a mistura contendo polímero apresentou resistência de 31,9 MPa, o que representa uma perda de 45%. Já a

comparação ao que seriam 7 dias acabou ficando impertinente, uma vez que o traço REF-M teve sua resistência medida na realidade aos 9 dias e o SAP-M aos 7 dias. Logo, o traço de referência tem maior resistência não apenas por não ter adição do polímero, mas também por ter tido mais tempo de endurecimento.

A redução expressiva na resistência à compressão se deve ao teor excessivo de SAP utilizado, muito superior ao necessário para fins de mitigar a retração autógena, conforme mostrado no item 4.2, causando um incremento na porosidade da pasta.

As partículas de polímero, ao entrarem em contato com a solução dos poros, absorvem a água e incham. Durante a hidratação do cimento, quando a umidade relativa no interior dos poros diminui, o polímero começa a liberar a solução que foi absorvida e vai reduzindo seu volume. Ao desinchar o polímero gera vazios na estrutura interna da pasta. Esses vazios podem explicar a redução da resistência mecânica de pastas com polímero (HASHOLT, JESPERSEN e JENSEN, 2010).

A demasiada queda na resistência provavelmente pode ser também devido ao ar incorporado pelo uso de aditivo superplastificante. Para o traço contendo adição de SAP, a trabalhabilidade foi muito prejudicada, sendo então adicionado aditivo superplastificante extra para que se obtivesse uma trabalhabilidade mínima adequada para moldagem dos ensaios. Para o traço REF-M fez-se o uso de 1,2% de Glenium 51 e para o traço SAP-M foi necessário 1,35%. O aumento no ar incorporado foi percebido visualmente durante a mistura, mas não foi determinado experimentalmente.

Enfatiza-se ainda que os dois traços possuem a mesma relação a/c total, sendo então a queda na resistência devido à adição do polímero e do aditivo superplastificante, e não à uma comparação injusta entre traços com diferentes relações a/c devido ao acréscimo de água extra para cura interna.

#### 4.4.2 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade dos microconcretos estão apresentados Tabela 4.9, para os 7 e 28 dias. No caso do microconcreto de referência (REF-M), como já citado, o ensaio foi realizado aos 9 dias em vez dos 7 dias, devido a ocorrência de um feriado. São apresentados os resultados individuais dos três corpos de prova (CP), a média, o desvio padrão e uma comparação dos resultados do microconcreto com SAP (SAP-M) em relação ao microconcreto de referência (REF-M). Os valores de desvio padrão indicam que não houve grande dispersão dos dados individuais.

Tabela 4.9: Resultados de módulo de elasticidade dos microconcretos estudados.

Microconcreto	Idade (dias)	Módulo de elasticidade (GPa)				Desvio padrão	Comparação com a referência
		CP 1	CP 2	CP 3	Média		
REF-M	9	25,2	25,7	25,0	25,3	0,27	100%
SAP-M	7	17,1	18,2	17,1	17,5	0,49	69%
REF-M	28	27,7	27,4	27,2	27,4	0,18	100%
SAP-M		19,0	18,7	19,0	18,9	0,13	69%

Verificou-se que, assim como ocorreu na resistência a compressão, a adição do SAP causou uma diminuição no módulo de elasticidade dos microconcretos, porém menos acentuada. Aos 28 dias, a mistura de referência obteve um módulo de elasticidade de 27,4 GPa, enquanto a mistura contendo polímero obteve de 18,9 GPa, representando uma perda de 31%, contra uma perda 45% para o caso da resistência a compressão.

Conforme já explicado para a resistência a compressão, a comparação para os 7 dias acabou ficando impertinente, uma vez que o traço REF-M teve seu módulo de elasticidade obtido aos 9 dias. Logo, o traço de referência tem maior módulo não apenas por não ter adição do polímero, mas também por ter tido mais tempo de endurecimento.

A queda do módulo de elasticidade já era esperada, haja vista que essa propriedade está diretamente relacionada com a resistência à compressão do material. Porém, a redução foi maior na resistência do que no módulo de elasticidade.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

A metodologia da taxa de desenvolvimento da deformação, utilizada para determinação do tempo zero ( $t_0$ ) tanto nas pastas como nos microconcretos do programa experimental desta pesquisa, se mostrou como uma alternativa simples e confiável para determinação do  $t_0$ . Uma vez que este método se trata apenas de uma análise gráfica das curvas de deformação obtidas no ensaio de determinação da retração autógena pelos tubos corrugados, não foi necessária a realização de um ensaio à parte para determinação do  $t_0$ , representando economia e agilidade.

Além disso, os resultados dos ensaios de tempo zero pelo método da taxa de deformação se mostraram coerentes em ambos os materiais cimentícios. A adição do polímero superabsorvente (SAP) resultou na redução do tempo zero tanto nas pastas quanto nos microconcretos, causando redução de 9h58 nas pastas e 1h52 nos microconcretos.

Já o método da propagação do pulso ultrassônico (usado para determinação do tempo zero dos microconcretos), apresentou comportamento oposto ao observado no primeiro método. A adição do polímero causou um aumento de 34 minutos no tempo zero dos microconcretos.

A incorporação de água de cura interna por meio do SAP se mostrou uma estratégia eficiente na mitigação e, no caso dos resultados deste trabalho, até mesmo na eliminação da retração autógena de materiais cimentícios de alto desempenho. O teor de 0,4% de polímero adotado, calculado com base no modelo de Powers adaptado por Jensen e Hansen (2001a), foi escolhido objetivando eliminar completamente a retração autógena e foi eficaz em seu propósito. Tal teor foi inclusive excessivo, uma vez que as pastas e microconcretos com adição de SAP apresentaram uma alta expansão ao final dos 28 dias de ensaio, independente da metodologia ou material cimentício utilizado.

A metodologia dos tubos corrugados, normalizada pela ASTM e implementada pela primeira vez no Brasil, se mostrou uma alternativa promissora para determinação da retração autógena. O ensaio apresentou resultados bastante coerentes com os esperados, baixa variabilidade entre os corpos de prova e uma baixa perda de água.

Os resultados dos tubos corrugados mostraram para a pasta de referência um pico de expansão seguido de uma forte retração, que atingiu  $-754 \mu\text{m/m}$  aos 28 dias. Com a adição do polímero, a pasta apresentou, após dois picos de expansão, uma deformação final em torno de  $100 \mu\text{m/m}$ . O microconcreto de referência apresentou comportamento muito parecido com o da pasta de referência, porém de menor magnitude, após um pico de expansão inicial, o material atingiu ao final dos 28 dias uma retração de  $219 \mu\text{m/m}$ . Já o microconcreto contendo SAP



apresentou comportamento um pouco diferente da pasta com SAP, pois não apresentou a formação do segundo pico de expansão, apenas uma expansão contínua até uma estabilização da mesma em 190  $\mu\text{m}/\text{m}$ , que se manteve até os 28 dias. O ensaio comprovou o efeito restritivo dos agregados, que diminuiu consideravelmente a magnitude dos resultados.

O ensaio dos prismas para determinação da retração autógena teve como propósito confirmar se o comportamento apresentado pelo ensaio dos tubos corrugados seria coerente com o primeiro, sendo ambas as metodologias aplicadas aos microconcretos. Concluiu-se que os ensaios obtiveram comportamento semelhante, porém apresentando diferentes valores absolutos, como já era previsto, devido a diferenças nos equipamentos e formatos e volumes dos corpos de prova. Contudo, em virtude da semelhança nas curvas obtidas pelos dois métodos, valida-se a metodologia dos tubos corrugados como apropriada para determinação da retração.

Em contrapartida à eficiência do SAP como agente mitigador da retração autógena, comprovada pelas duas metodologias aplicadas para tal, sua adição causou uma considerável redução nas propriedades mecânicas do microconcreto contendo SAP em relação à referência. Essa redução, após 28 dias, foi de 45% para a resistência a compressão e de 21% para o módulo de elasticidade. O aumento da porosidade, consequência do vazio deixado após o desinchamento do polímero, é o maior responsável pela redução das propriedades mecânicas. O teor de SAP excessivo, superior ao necessário para mitigação da retração autógena, majorou a redução observada nas propriedades mecânicas.

Os resultados de calorimetria trouxeram, como principal contribuição a este trabalho, a comprovação de que a água de cura interna do SAP participa das reações de hidratação. Esta comprovação pôde ser feita com base nos resultados de calor acumulado, comparando-se a pasta contendo SAP com uma referência de mesma relação a/c básica e com uma referência de mesma relação a/c total. A partir dessa análise, notou-se que o calor total acumulado da pasta contendo SAP foi o mesmo da pasta de mesmo a/c total, o que mostra uma mesma quantidade total de hidratos formados, comprovando a participação da água de cura interna nas reações. Os resultados de calorimetria também mostraram o efeito da adição do polímero na cinética de hidratação, que causou uma redução no pico de formação de C-S-H e uma antecipação da ocorrência deste, quando comparado a referência de mesma relação a/c total.

Por último, vale ressaltar que o alto teor de superplastificante utilizado, consequência da busca por um teor fixo para todas as pastas, pode ter influenciado negativamente os resultados desta pesquisa. Isso mostra que a busca por um teor fixo pode ser mais prejudicial que vantajosa.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como maior contribuição dessa dissertação, sugere-se a disseminação da utilização da metodologia dos tubos corrugados para determinação da retração autógena no Brasil, uma vez que se provou ser uma metodologia confiável e eficiente, além de normatizada, para determinação dessa propriedade.

Contudo, como foi necessário importar os tubos e as tampas de fechamento para realização do ensaio, sendo este um impedimento para disseminação do método, sugere-se testar outros tubos e tampas mais facilmente encontrados, como tubos para respirador utilizados na área da saúde, ou que respeitem as restrições prescritas na norma (ASTM C1698-09, 2014), com intuito de reduzir o custo do ensaio.

Sugere-se também testar teores intermediário de SAP aos utilizados nesta pesquisa (0,0% e 0,4%), a fim de se encontrar um teor que apenas mitigue ou zere a retração autógena ao final dos 28 dias. O teor de 0,4% adotado foi excessivo, sendo sua redução vantajosa em vários aspectos: economia de material, melhora da trabalhabilidade e ainda melhora das propriedades mecânicas.

Por último, sugere-se determinar o tempo de fim de pega pelo aparelho de Vicat, conforme recomenda a norma dos tubos corrugados para início da determinação da retração autógena, compará-lo com os resultado de tempo zero pelos métodos utilizados e avaliar as diferenças causadas na curva de retração com a alteração do método de determinação do tempo zero.

## REFERÊNCIAS

ACKER, P. **Comportement mécanique du béton**. Rapport de Recherche LCPC, apports de l'approche physico-chimique, N° 152, 1988.

AGOSTINHO, L. B. **Estudo reológico de pastas de cimento contendo polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

AGOSTINHO, L. B. **Monitoramento da hidratação de pastas de cimento Portland contendo polímero superabsorvente e nanosilica**. Exame de qualificação (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

AITCIN, P. C. **High-performance concrete**. 1. ed. Londres, Inglaterra: E & FN Spon, 1998.

AITCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. 1. ed. Oxon, Reino Unido: Taylor & Francis, 2008.

AITCIN, P. C. **High performance concrete (HPC) (Revisited in 2011)**. 36th Conference on Our World in Concrete & Structures. Singapore. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **C1698 - 09**: Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM, 2014.

ANDRADE NETO, W. N. **Caracterização de polímero superabsorvente para mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência**. Trabalho de Conclusão de Curso Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 58**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland - determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BENTUR, A. **Comprehensive approach to prediction and control of early-age cracking in cementitious materials**. Cambridge (MA), USA: F.J. Ulm, Z.P. Bazant e F.H. Wittmann (Eds), Concreep, Proceedings of the Sixth International Conference on Creep, Shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials, p. 589-597, 2001.

BENTZ, D. P.; SCHLITTER, J. L.; WEISS, W. J. Quantifying Stress Development and Remaining Stress Capacity in Restrained, Internally Cured Mortars. **ACI Materials Journal**, p. 3-11, 2013.

BETTENCOURT, A.; GONÇALVES, A. **Autogenous shrinkage measurements on cement pastes: influence of w/c, cement fineness, C3A content, and superplasticizer dosage**. LNEC. Lisboa, 47 p., 2010.

BIANCHI, G. Q. **Application of nano-silica in concrete**. Tese (PhD em Materiais de Construção) - Departamento do Ambiente Construído, Universidade de Tecnologia de Eindhoven, Eindhoven, Holanda, 2014.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, p. 1208-1223, 2011.

CASSON, R. B. J.; DOMONE, P. I. J. **Ultrasonic monitoring of the early age properties of concrete**. Paris: Proc. RILEM Int. Conf. Concrete of Early Ages, p. 129-135, 1982.

COUTO, P. B. **Caracterização reológica de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

FISHER, L. R.; ISRAELACHVILI, J. N. Experimental studies on the applicability of the Kelvin equation to highly curved concave menisci. **Journal of Colloid and Interface Science**, p. 528-541, 1981.

FRANCINETE SILVA JUNIOR, P. **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

FRIEDRICH, S. V. Superabsorbent polymers (SAP). In: MECHTCHERINE, V. **State of the art report of RILEM technical committee 225-SAP**. RILEM, 2012.

FURNAS. **IT.MC.201 Concreto – Determinação da variação autógena**: Instrução de Trabalho – MC – Métodos Construtivos. FURNAS Centrais Elétricas S.A. Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica, 2015.

HAMMER, ; BJØNTEGAARD, Ø.; SELLEVOLD, E. J. **Measurement methods for testing of early age autogenous strain**. Early age cracking in cementitious systems. RILEM TC 181-EAS Committee, p. 234-245, 2002.

HASHOLT, M. T.; JESPERSEN, M. H. S.; JENSEN, O. M. **Mechanical Properties of Concrete with SAP Part I: Development of Compressive Strength**. International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. 2010.

HOLT, E. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. **Cement and Concrete Research**, p. 464-472, 2005.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2011.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2011.

JCI - COMMITTEE REPORT OF JAPAN CONCRETE INSTITUTE. **Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete**. Hiroshima, Japan: Taylor & Francis, 1998.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Autogenous Deformation and Change of the Relative Humidity in Silica Fume-Modified Cement Paste. **ACI Materials Journal**, p. 539-543, 1996.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. **Cement and Concrete Research**, p. 1859-1865, 2001b.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. **Materials and Structures**, p. 406-409, 1995.

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

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

JENSEN, O. M.; LURA, P. Measuring techniques for autogenous strain of cement paste. **Materials and Structures**, p. 431-440, 2007.

JIANG, C.; YANG, Y.; WANG, Y.; ZHOU, Y.; MA, C. Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures. **Construction and Building Materials**, p. 260-269, 2014.

JUSTS, J.; WYRZYKOWSKI, M.; WINNEFELD, F.; BAJARE, D.; LURA, P. Influence of superabsorbent polymers on hydration of cement pastes with low water-to-binder ratio: A calorimetry study. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, p. 425-432, 2014.

JUSTS, J.; WYRZYKOWSKI, M.; BAJARE, D.; LURA, P. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 82-90, 2015.

KANG, S.-H.; HONG, S.-G.; MOON, J. Importance of drying to control internal curing effects on field casting ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 20-30, 2018.

KEATING, J.; HANNANT, D. J.; HIBBERT, A. P. Comparison of shear modulus and pulse velocity techniques to measure the build-up structure in fresh cement pastes used in oil well cementing. **Cement and Concrete Research**, p. 554-566, 1989.

KIM, J.-K.; LEE, C.-S. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages. **Cement and Concrete Research**, p. 1921-1927, 1999.

KONG, X.-M.; ZHANG, Z.-L.; LU, Z.-C. Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete. **Materials and Structures**, p. 2741-2758, 2014.

LI, Y.; LI, J. Capillary tension theory for prediction of early autogenous shrinkage of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, p. 511-516, 2014.

LIU, Z.; HANSEN, W. Aggregate and slag cement effects on autogenous shrinkage in cementitious materials. **Construction and Building Materials**, p. 429-436, 2016.

LIU, J.; SHI, C.; MA, X.; KHAYAT, K. H.; ZHANG, J.; WANG, D. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. **Construction and Building Materials**, p. 702-712, 2017.

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

LURA, P. **Autogenous deformation and internal curing of concrete**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Tecnologia de Delft, Universidade de Delft, Delft, Holanda, 2003.

LURA, P.; JENSEN, O. M.; BREUGEL, K. V. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation. **Cement and Concrete Research**, p. 223-232, 2003.

MANZANO, M. A. R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência modificados com Polímeros Superabsorventes (PSAs) como Agentes de Cura Interna**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MANZANO, M. A. R.; TRALDI, C. L.; SILVA, E.F.; LOPES, A. N. M. Mecanismo de atuação dos polímeros superabsorventes na hidratação de materiais cimentícios. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto 56CBC2014, 2014, Natal. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2014.

MARUYAMA, I.; TERAMOTO, A. Temperature dependence of autogenous shrinkage of silica fume cement pastes with a very low water–binder ratio. **Cement and Concrete Composites**, p. 41-50, 2013.

MAZLOOM, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BROOKS, J. J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, p. 347-357, 2004.

MECHTCHERINE, V.; GORGES, M.; SCHROEFL, C.; ASSMANN, A.; BRAMESHUBER, W.; RIBEIRO, A. B.; CUSSON, D.; CUSTÓDIO, J.; SILVA, E. F.; ICHIMIYA, K.; IGARASHI, S. -I.; 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**, p. 541-562, 2013.

MEDDAH, M. S.; TAGNIT-HAMOU, A. Pore Structure of Concrete with Mineral Admixtures and Its Effect on Self-Desiccation Shrinkage. **ACI Materials Journal**, p. 241-250, 2009.

MEHTA, P. K.; BURROWS, R. W. Building durable structures in the 21st century. **The Indian Concrete Journal**, p. 437-443, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MÖNNIG, S. **Superabsorbing additions in concrete - applications, modelling and comparison of different internal water sources**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Stuttgart, Stuttgart, Alemanha, 2009.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ORDOÑEZ, S. T. L. **Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e aditivo redutor de retração**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

POWERS, T. C.; BROWNYARD, T. L. Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. **Research Laboratories of the Portland Cement Association**, p. 101-132, 1948.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland - estudo em pasta**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RAO, G. A. Long-term drying shrinkage of mortar - influence of silica fume and size of fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, p. 171-175, 2001.

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

RILEM. **Internal curing of concrete**: state of the art report of RILEM Technical committee TC 196-ICC. Londres, Inglaterra: Springer, 2007.

RILEM. **Application of superabsorbent polymer (SAP) in concrete construction**: state of the art report technical committee TC-225-SAP. Londres, Inglaterra: Springer, 2012.

RILEM. **NDT 1 Testing of concrete by the ultrasonic pulse method**. Londres, Inglaterra: E & FN Spon, 1972.

SANTOS, T. A. C. **Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e Nano Partículas de Sílica para Melhorar Propriedades de Concretos de Alto Desempenho**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SHEN, D.; WANG, X.; CHENG, D.; ZHANG, J.; JIANG, G. Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age. **Construction and Building Materials**, p. 512-522, 2016.

SIKORA, K. S.; KLEMM, A. J. Effect of Superabsorbent Polymers on Workability and Hydration Process in Fly Ash Cementitious Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2015.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, E.F. ; LOPES, A. N. M. ; TOLÊDO FILHO, R.D. ; FAIRBAIRN, E. M. R. . Uso de onda ultra-sônica para determinar o tempo-zero em concretos de alto desempenho (CAD) contendo aditivo redutor de retração (ARR). In: XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, 2010, San Juan. **Anais da XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural**, 2010. v. 1. p. 105-120.

SUAREZ, M. L. G. **Polímeros Super Absorventes (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos de alta resistência**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

TAM, C. M.; TAM, V. W. Y.; NG, K. M. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. **Construction and Building Materials**, p. 79-89, 2012.

TAZAWA, E.-I. **Autogenous shrinkage of concrete**. Oxfordshire, Reino Unido: Taylor & Francis, 1999.

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



TOLEDO FILHO, R. D.; 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 HW. Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction, 2012. **RILEM State of the Art Reports**, vol 2. Dordrecht: Springer.

VAN BREUGEL, K.; VAN TUAN, N. Autogenous Shrinkage of HPC and Ways to Mitigate it. **Trans Tech Publications**, p. 3-20, 2015.

VERNET, C.; CADORET, G. **Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des B.H.P. pendant les premiers jours**. In: Les Bétons à Hautes Performances – Caractérisation, Durabilité, Applications; Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris; p. 255-266. 1992.

WANG, F.; YANG, J.; HU, S.; LI, X.; CHENG, H. Influence of superabsorbent polymers on the surrounding cement paste. **Cement and Concrete Research**, p. 112-121, 2016.

WU, L.; FARZADNIA, N.; SHI, C.; ZHANG, Z.; WANG, H. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials**, p. 62-75, 2017.

WYRZYKOWSKI, M.; HU, Z.; GHOURECHIAN, S.; SCRIVENER, K.; LURA, P. Corrugated tube protocol for autogenous shrinkage measurements: review and statistical assessment. **Materials and Structures**, 2017.

ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; LEOW, M. P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 1687-1694, 2003.

ZHANG, Y.; ZHU, W.; LIU, G.; OROZCO, C.; MONTEIRO, P. J. M. Effect of superplasticisers on the hydration process, products and microstructure of tricalcium aluminate paste in the presence of gypsum. **Advances in Cement Research**, p. 298-309, 2016.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K. Hydration kinetics of high-performance cementitious systems under different curing conditions. **Materials and Structures**, p. 1599–1611, 2013.

## APÊNDICE A – Modelo de Powers e quantidade de água incorporada

### Modelo volumétrico de Powers para pastas de cimento e pastas de cimento modificadas com sílica ativa

Os modelos descritos nesse apêndice são baseados no trabalho de Jensen e Hansen (2001a).

#### Composição de fases para pasta de cimento Portland endurecida

O seguinte conjunto de fórmulas descreve o modelo de Powers para a composição de fases de uma pasta de cimento Portland endurecida:

$$\text{Contração química: } V_{cq} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha$$

$$\text{Água capilar: } V_{ac} = p - 1,32 \cdot (1 - p) \cdot \alpha$$

$$\text{Água de gel: } V_{ag} = 0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha$$

$$\text{Sólidos de gel: } V_{sg} = 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha$$

$$\text{Cimento anidro: } V_c = (1 - p) \cdot (1 - \alpha)$$

$$\text{Onde } \sum V_i = 1 \text{ e } p = \frac{a/c}{(a/c) + (\rho_a/\rho_c)}$$

$p$  = porosidade inicial;

$\alpha$  = grau de hidratação do cimento (massa de cimento hidratado/massa cimento anidro);

$a$  e  $c$  se referem às massas de água e cimento;

Massa específica da água =  $\rho_a \cong 1000 \text{ kg/m}^3$ ;

Massa específica do cimento =  $\rho_c \cong 3150 \text{ kg/m}^3$ .

As constantes no modelo volumétrico de Powers são derivadas dos seguintes dados:

Água não-evaporável:  $a_{ne} = 0,23 \text{ g/g de cimento hidratado}$ ;

Água de gel:  $a_g = 0,19 \text{ g/g de cimento hidratado}$ ;

Contração química:  $\Delta V = 6,4 \text{ mL/100 g de cimento hidratado}$ .

#### Composição de fases para pasta de cimento Portland endurecida com adição de sílica ativa

O seguinte conjunto de fórmulas descreve o modelo volumétrico de Powers para a composição de fases de uma pasta de cimento Portland endurecida com adição de sílica ativa. Nas fórmulas assume-se que a sílica ativa reage proporcionalmente ao cimento:

Contração química:  $V_{cq} = k \cdot (0,20 + 0,69 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \alpha$

Água capilar:  $V_{ac} = p - k \cdot (1,32 + 1,57 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \alpha$

Água de gel:  $V_{ag} = k \cdot (0,60 + 1,57 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \alpha$

Sólidos de gel:  $V_{sg} = k \cdot (1,52 + 0,74 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \alpha$

Cimento anidro:  $V_c = k \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)$

Sílica ativa:  $V_s = k \cdot (1,43 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha)$

Onde  $\sum V_i = 1$ ,  $p = \frac{a/c}{(a/c) + (\rho_a/\rho_c) + (\rho_a/\rho_s) \cdot (s/c)}$  e  $k = \frac{1}{1 + (\rho_c/\rho_s) + (s/c)}$

$s$  se refere à massa de sílica ativa;

Massa específica da sílica =  $\rho_s \cong 2200 \text{ kg/m}^3$ .

As constantes no modelo são derivadas dos dados mostrados anteriormente, com a adição de dados semelhantes para a reação pozolânica da sílica ativa:

Água não-evaporável:  $a_{ne} = 0 \text{ g/g de sílica ativa reagida}$ ;

Água de gel:  $a_g = 0,5 \text{ g/g de sílica ativa reagida}$ ;

Contração química:  $\Delta V = 22 \text{ mL/100 g de sílica ativa reagida}$ .

## **Modelo para calcular a quantidade de água incorporada necessária para evitar a autodessecação**

### **Água incorporada em pasta de cimento sem adição**

A quantidade de água incorporada necessária para evitar a autodessecação é igual à contração química de uma pasta de cimento em condições saturadas. Assume-se que a hidratação a baixas relações  $a/c$  para quando toda a água capilar é consumida e o espaço disponível é ocupado por água de gel, sólidos de gel e cimento anidro. Para uma pasta de cimento Portland, usando o modelo de Powers, tem-se (JENSEN e HANSEN, 2001a):

$$\alpha = \alpha_{max} \quad \text{para} \quad V_{ag} + V_{sg} + V_c = 1 \quad (A.1)$$

$$0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + (1 - p) \cdot (1 - \alpha_{max}) = 1 \quad (A.2)$$

Assim, em um sistema aberto com uma baixa relação  $a/c$ :

$$\alpha_{max} = \frac{p}{1,12 \cdot (1 - p)} \quad (A.3)$$

O volume relativo de água incorporada inicialmente,  $V_{ai,0}$ , é igual a contração química desenvolvida no grau máximo de hidratação, dado por A.3. Como  $p = V_{ac,0}$ , resulta em:

$$V_{ai,0} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} = 0,18 \cdot p = 0,18 \cdot V_{ac,0} \quad (A.4)$$

Numa relação a/c básica (kg de água/kg de cimento), a água incorporada e a água capilar inicial podem ser expressas como:

$$(a/c)_i = \frac{V_{ai,0} \cdot \rho_a}{V_{c,0} \cdot \rho_c}; \quad (a/c) = \frac{V_{ac,0} \cdot \rho_a}{V_{c,0} \cdot \rho_c} \quad (A.5)$$

Portanto, de A.4 e A.5, a quantidade de água incorporada necessária para obter o  $\alpha_{max}$  como em A.3 é:

$$(w/c)_i = 0,18 \cdot (w/c) \quad \text{para } (w/c) < 0,36 \quad (A.6)$$

A equação A.6 só é relevante para  $a/c < 0,36$ . Acima dessa relação a/c, a hidratação completa pode ser alcançada com menos água incorporada do que apresentado em A.6. De acordo com o modelo da Powers, a hidratação completa em um sistema aberto é possível na faixa de  $0,36 < (a/c) < 0,42$  se  $(a/c) + (a/c)_i = 0,42$ . A condição necessária para obter  $\alpha_{max} = 1$  nessa faixa de relação a/c é:

$$(a/c)_i = 0,42 - (a/c) \quad \text{para } 0,36 \leq a/c \leq 0,42 \quad (A.7)$$

### Água incorporada em pasta de cimento modificada com sílica ativa

A equação A.1 é reescrita de acordo com o modelo da Powers para pasta de cimento modificada com sílica (ver equações e definições no início do apêndice):

$$\alpha = \alpha_{max} \quad \text{para } V_{ag} + V_{sg} + V_c + V_s = 1 \quad (A.8)$$

$$k \cdot (0,60 + 1,57 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + k \cdot (1,52 + 0,74 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + k \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha_{max}) + k \cdot (1,43 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot (1 - \alpha_{max}) = 1 \quad (A.9)$$

$$\alpha_{max} = \frac{1 - k \cdot (1 + 1,43 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p)}{k \cdot (1,12 + 0,9 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p)} = \frac{p}{k \cdot (1,12 + 0,88 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p)} \quad (A.10)$$

Por comparação com A.3, é evidente que o grau máximo de hidratação atingível em condições saturadas para uma determinada relação a/c é reduzido pela adição de sílica ativa.

O volume relativo de água inicialmente incorporada,  $V_{ai,0}$ , que é igual a contração química desenvolvido no grau máximo de hidratação, é reescrito como:

$$V_{ai,0} = k \cdot (0,2 + 0,69 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max}$$

$$V_{ai,0} = k \cdot (0,2 + 0,69 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p) \cdot \frac{p}{k \cdot (1,12 + 0,88 \cdot (s/c)) \cdot (1 - p)}$$

$$V_{ai,0} = \frac{k \cdot (0,2 + 0,69 \cdot (s/c)) \cdot p}{k \cdot (1,12 + 0,88 \cdot (s/c))} \quad (A.11)$$

Também neste caso,  $p = V_{ac,0}$ . Por aplicação posterior da equação A.5, a quantidade de água incorporada para uma pasta de cimento modificada com sílica e baixa relação a/c pode ser escrita como:

$$(a/c)_i = \frac{0,2 + 0,69 \cdot (s/c)}{1,12 + 0,88 \cdot (s/c)} \cdot (a/c) \quad \text{para} \quad (a/c) \leq 0,36 + 0,28 \cdot (s/c) \quad (A.12)$$

A equação A.12 só é relevante somente para relação a/c menor que a suficiente para obter hidratação completa em condição saturada, o que foi encontrado impondo  $\alpha_{max} = 1$  em A.10.

Para uma pasta de cimento modificada com sílica ativa, a relação a/c necessária para a hidratação completa em condição isolada pode ser obtida impondo que toda a água capilar seja consumida em um grau de hidratação  $\alpha = 1$ . A relação a/c mínima resultante em condição isolada,  $(a/c)_{min,iso}$ , é:

$$(a/c)_{min,iso} = 0,42 + 0,73 \cdot (s/c) \quad (A.13)$$

Acima dessa relação a/c, a hidratação completa pode ser alcançada com menos água incorporada do que afirmado em A.12. De acordo com o modelo da Powers, a hidratação completa em um sistema aberto é possível no intervalo  $(0,36 + 0,28 \cdot (s/c)) \leq (a/c) \leq (0,42 + 0,73 \cdot (s/c))$  se:

$$(a/c) + (a/c)_i = 0,42 + 0,73 \cdot (s/c) \quad (A.14)$$

Portanto, a condição necessária para obter  $\alpha_{max} = 1$  nessa faixa de a/c é:

$$(a/c)_i = 0,42 + 0,73 \cdot (s/c) - (a/c) \quad (A.15)$$

## APÊNDICE B – Resultados individuais de retração autógena

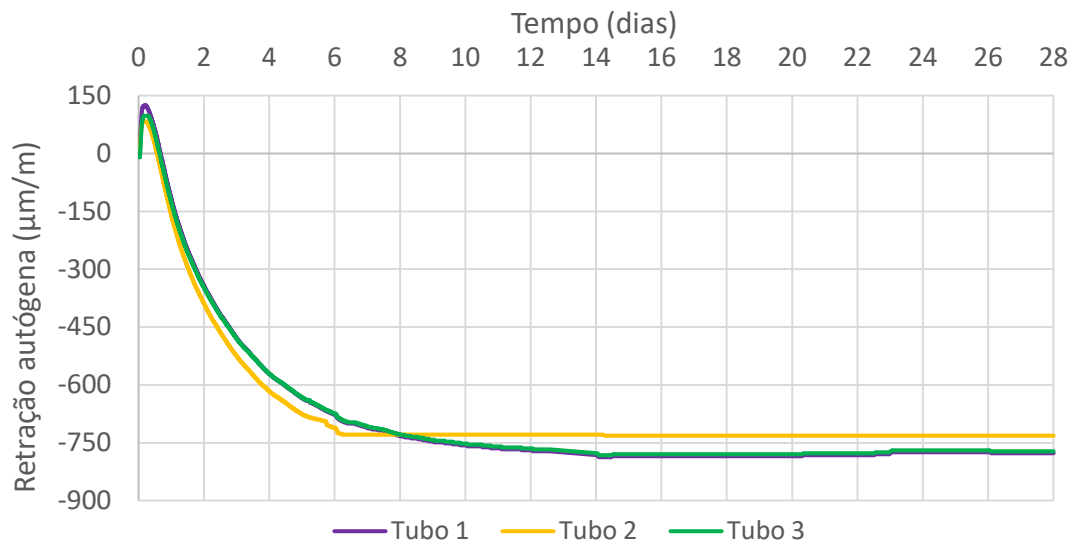


Figura B.1: Resultados individuais de retração autógena do traço REF-P pelo método dos tubos corrugados.

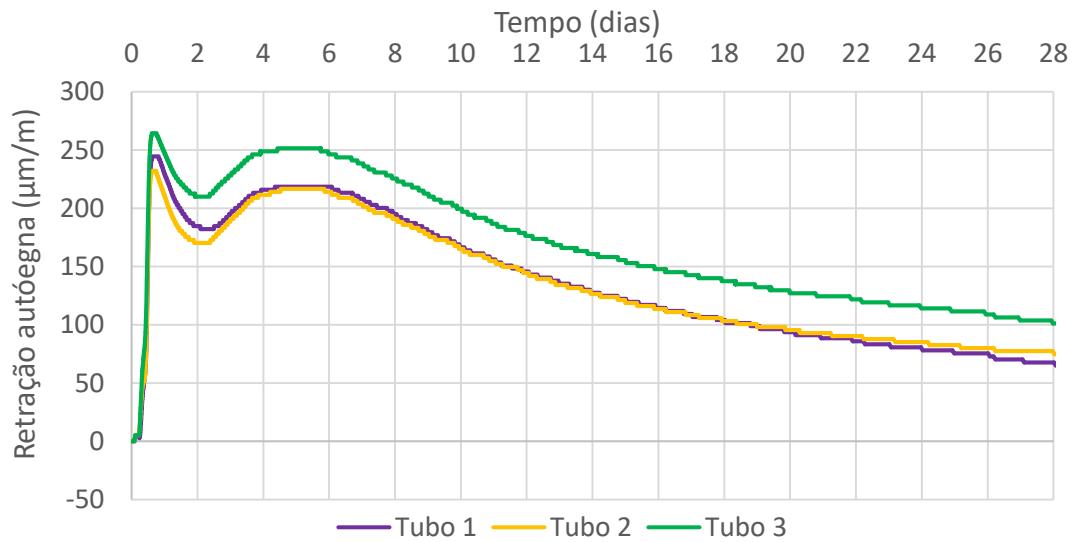


Figura B.2: Resultados individuais de retração autógena do traço SAP-P pelo método dos tubos corrugados.

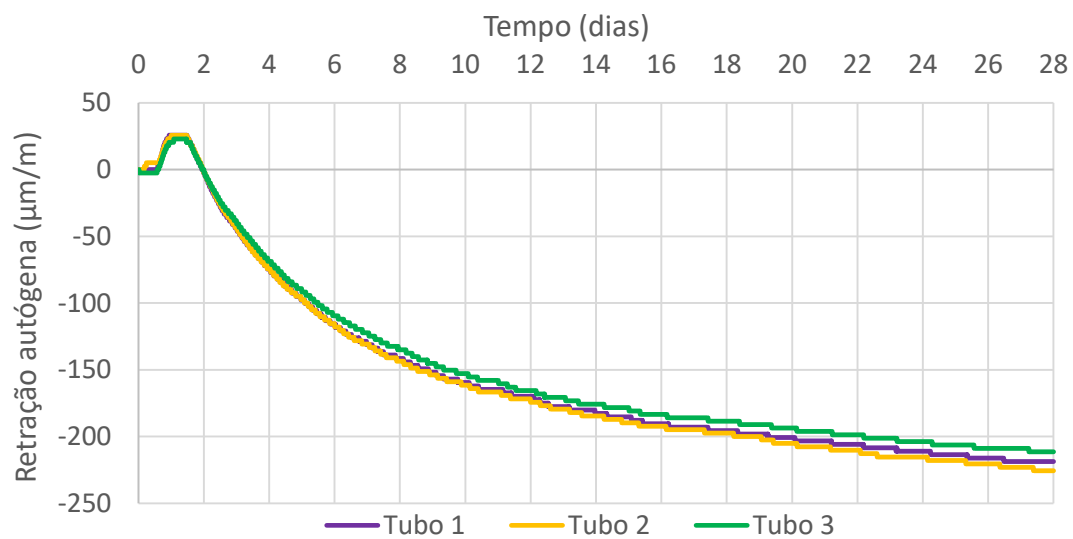


Figura B.3: Resultados individuais de retração autógena do traço REF-M pelo método dos tubos corrugados.

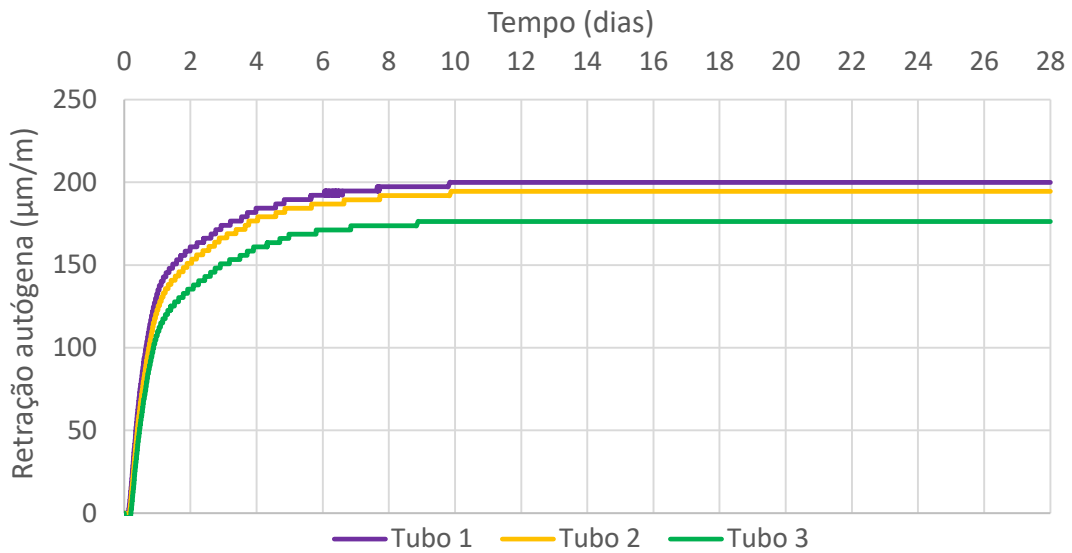


Figura B.4: Resultados individuais de retração autógena do traço SAP-M pelo método dos tubos corrugados.

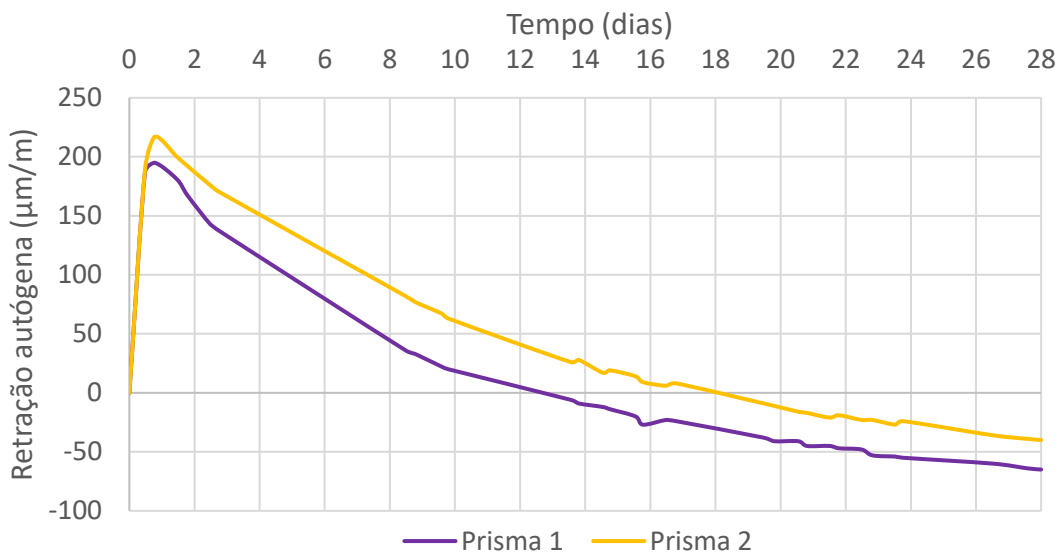


Figura B.5: Resultados individuais de retração autógena do traço REF-M pelo método dos prismas.

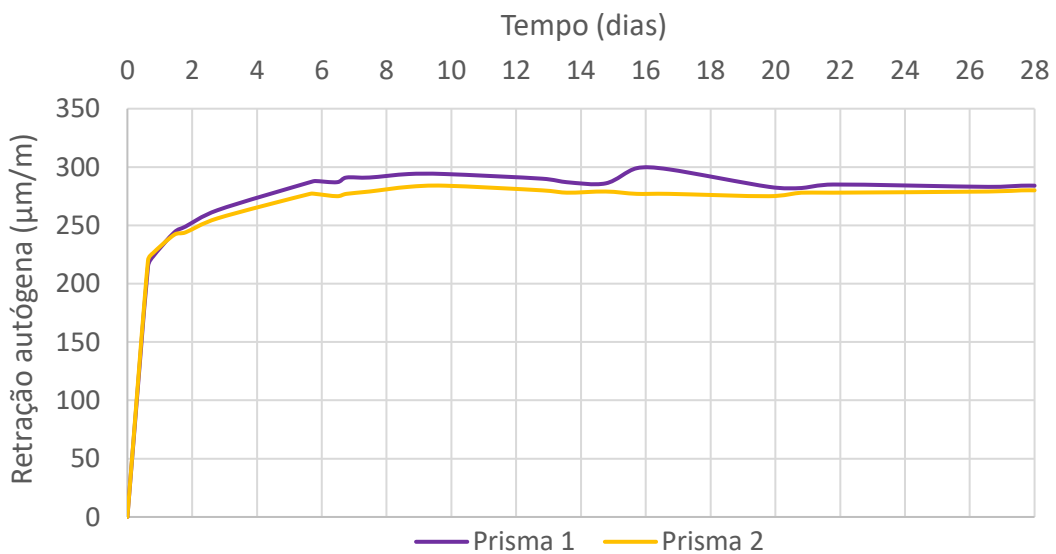


Figura B.6: Resultados individuais de retração autógena do traço SAP-M pelo método dos prismas.