

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E  
NANOPARTÍCULAS DE SÍLICA**

**PAULO FRANCINETE SILVA JUNIOR**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E  
NANOPARTÍCULAS DE SÍLICA**

**PAULO FRANCINETE SILVA JUNIOR**

**ORIENTADORA: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA  
CO-ORIENTADORA: ANNE NEIRY DE MENDONÇA LOPES**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**BRASÍLIA/DF, NOVEMBRO - 2017**

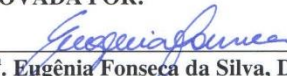
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

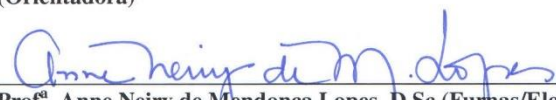
ESTUDO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E  
NANOPARTÍCULAS DE SÍLICA

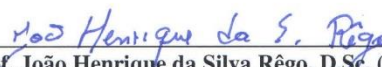
PAULO FRANCINETE SILVA JUNIOR

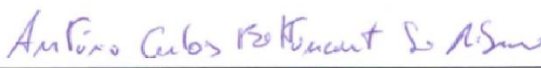
TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO  
CIVIL

APROVADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>ª</sup> Eugênia Fonseca da Silva, D.Sc. (ENC/UnB)  
(Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>ª</sup> Anne Neiry de Mendonça Lopes, D.Sc (Furnas/Eletróbrás)  
(Co-orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. João Henrique da Silva Rêgo, D.Sc. (ENC/UnB)  
(Examinador Interno)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro, D.Sc. (LNEC/PT)  
(Examinador externo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, D.Sc. (COPPE/UFRJ)  
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 27 DE NOVEMBRO - 2017

## FICHA CATALOGRÁFICA

	Francinete Silva Junior, Paulo
FP331e	Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica / Paulo Francinete Silva Júnior; orientador Eugênicia Fonseca da Silva; co-orientador Anne Neiry de Mendonça Lopes. - - Brasília, 2017.
	345p.
	Tese (Doutorado - Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, 2017.
	1. Retração autógena. 2. Polímero Superabsorvente. 3. Nanossílica. 4. Concreto de alta resistência. 5. Cura interna. I. Fonseca

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Francinete Silva Junior, Paulo (2017). Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD 005A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 345 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Francinete Silva Junior

TÍTULO: Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica

GRAU: Doutor ANO: 2017

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



---

Paulo Francinete Silva Junior  
Rua 75, n. 46, Centro,  
CEP 74055-110 – Goiânia – GO – Brasil.  
paulo.junior@ifg.edu.br

*Não sou nada.  
Nunca serei nada.  
Não posso querer ser nada.  
À parte isso, tenho em mim todos os sonhos do mundo.*

*Álvaro de Campos*

## **AGRADECIMENTOS**

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eugênia Fonseca da Silva, pelo acolhimento, pela orientação, confiança e amizade construída durante a orientação.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Anne Neiry de Mendonça Lopes, pela co-orientação, amizade e pelo apoio à pesquisa para o seu desenvolvimento nos laboratórios de Furnas.

Ao Prof. Dr. António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro, pelo acolhimento e orientação no LNEC em Portugal, pelas várias sugestões e enriquecimento do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília (UnB) por oferecer a oportunidade de fazer o doutoramento.

Ao Instituto Federal de Goiás pela concessão de licença integral para dedicação ao programa de doutoramento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de doutoramento no Brasil e em Portugal.

À Furnas Centrais Elétricas pelo desenvolvimento do programa experimental em seus laboratórios.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela acolhida para a realização do estágio em Portugal.

Às empresas Ciplan Cimentos, Lemos Areia e Cascalho, Pedreira Guapó, CiaImper, AkzoNobel Brasil e Basf Brasil, pela doação dos materiais empregados na pesquisa.

Ao Prof. Dr. Ole Mejlhede Jensen, Universidade Técnica da Dinamarca, pela doação do polímero superabsorvente.

À equipe de Furnas, em especial Luciana dos Anjos Farias, Solanda de Oliveira, Sílvio Cândido Portes, Edson Gonçalves, Paulo Arcanjo, Renato Batista, Flávio Mamede, Eduardo Gambale.

À equipe do LNEC, em especial Fernanda Simões Lopes, Gil Jeurissen Rosa, João Ferreira Balsinha, João Pereira Custódio, Manuel Vieira, Maria Sofia Ribeiro, André Valente Monteiro, Isabel Milagre Martins, Paula Cristina Vieira Miguel, Arlindo Freitas Gonçalves, António Santos Baptista.

À secretaria do PECC, especialmente ao servidor Ricardo de Almeida Gomes.

Aos Professores Doutores João Henrique da Silva Rêgo, Eduardo de Moraes Rego Fairbairn e Francisco Evangelista Junior, pelas sugestões ao trabalho no exame de qualificação.

Ao amigo José Sérgio dos Passos de Oliveira, pela acolhida em sua morada em Brasília.

Aos colegas da pós-graduação e pesquisadores do PECC: Alejandro Manzano, Jéssica Siqueira de Sousa, Lilian de Sousa Alves, Lívia Borba Agostinho, Mirellen Mara Moreira, Pablo Borges Couto, Thyala Anarelli Cunha e Santos, pela amizade.

À toda minha família, pela força.

## RESUMO

### ESTUDO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA COM ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE E NANOPARTÍCULAS DE SÍLICA

**Autor: Paulo Francinete Silva Júnior**

**Orientadora: Eugênia Fonseca da Silva**

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

**Brasília, novembro de 2017.**

O presente trabalho se insere na área de Construção Civil, na linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção”, tendo como tema o Estudo da Estabilidade Dimensional de Concretos de Alta Resistência com a Adição de Polímero Superabsorvente e Nano Partículas de Sílica. Buscou-se observar a ação combinada da adição de polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica em concretos de alta resistência, para controlar a estabilidade dimensional do concreto e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas. O uso de polímeros superabsorvente (SAP) no concreto é hoje reconhecido no meio técnico como a mais eficaz estratégia de mitigação ou mesmo de eliminação da retração autógena. No entanto, alguns estudos mostram que a incorporação do polímero superabsorvente na mistura prejudica as propriedades mecânicas dos concretos, especialmente a resistência à compressão. Buscando compensar a perda de resistência causada pela adição do polímero, foi desenvolvido um programa experimental incorporando ao concreto nano partículas de sílica junto com o polímero superabsorvente. A proposta é que a incorporação de nano partículas em materiais cimentícios possa representar um papel decisivo na mitigação da retração autógena com o uso do polímero, sem prejudicar as propriedades mecânicas do concreto. Foram produzidas misturas de concretos e argamassas de alta resistência com e sem a adição de polímero e de nanossílica, além de misturas combinando as duas adições. Avaliou-se os efeitos dessas adições nas propriedades no estado fresco (consistência, teor de ar, densidade e tempo zero), na estabilidade dimensional (retração autógena, retração por secagem e fluência) e nas propriedades mecânicas e elásticas (resistência à compressão, à tração e módulo de deformação). Ainda foi realizado ensaios de microestrutura dos concretos (Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV). Os resultados confirmam a eficiência do polímero superabsorvente para mitigação ou eliminação da retração autógena. No presente estudo a menor eficiência na mitigação da retração autógena por meio da adição de SAP como agente de cura interna foi de 97% aos 28 dias de idade. Apesar dos resultados e da análise estatística apontarem a tendência da redução da resistência dos concretos com a adição de SAP, do ponto de vista tecnológico na maioria dos casos não há comprometimento no desempenho da resistência dos concretos. A adição de nanossílica nos concretos com SAP como agente de cura interna, mostrou com potencial para compensar a perda de resistência à compressão dos concretos estudados.

**Palavras-chave:** Retração autógena, polímero superabsorvente, nanossílica, concreto de alta resistência, Cura interna

## **ABSTRACT**

### **STUDY OF THE DIMENSIONAL STABILITY OF HIGH STRENGTH CONCRETES WITH THE ADDITION OF SUPERABSORBENT POLYMER AND NANO PARTICLES OF SILICA**

**Author: Paulo Francinete Silva Júnior**

**Supervisor: Eugênia Fonseca da Silva**

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

**Brasília, november 2017.**

The present work is part of the "Construction Technology, Processes, Components and Construction Materials" research line, focusing on the Study of the Dimensional Stability of High Strength Concretos with the Addition of Superabsorbent Polymer and Nano Particles of Silica. It was sought to observe the combined action of the addition of superabsorbent polymer and silica nano particles in high strength concrete to control the dimensional stability of the concrete and its effects on the mechanical properties. The use of superabsorbent polymers (SAPs) in concrete is now recognized in the technical field as the most effective mitigation strategy or even elimination of autogenous shrinkage. However, some studies have shown that the incorporation of the superabsorbent polymer into the blend impairs the mechanical properties of the concretos, especially the compressive strength. To compensate for the loss of strength caused by the addition of the polymer, an experimental program was developed incorporating nano silica particles together with the superabsorbent polymer. The proposal is that the incorporation of nano particles in cementitious materials can play a decisive role in mitigating the autogenous shrinkage with the use of the polymer, without damaging the mechanical properties of the concrete. Mixtures of high strength concretos and mortars were produced with and without the addition of polymer and nanosilica, in addition to blends combining the two additions. The effects of these additions on properties both in the fresh state (consistency, air content, density and zero time) and in the hardened state (autogenous shrinkage, drying shrinkage, creep, compressive strength, tensile strength and elastic modulus) were evaluated. Microstructure tests of the concretos (MEV) were also carried out. The results confirm the efficiency of the superabsorbent polymer for mitigation or elimination of autogenous shrinkage. In the present study, the lowest efficiency in the mitigation of autogenous shrinkage through the addition of SAP as internal curing agent was 97% at 28 days of age. Although the results and the statistical analysis indicate the tendency of the reduction of the concrete strength with the addition of SAP, from the technological point of view in most cases there was no damage performance strength of the concrete. The addition of nanosilica in the concretos with SAP as internal curing agent showed with potential to compensate the loss of compressive strength of the concretos studied.

**Key words:** autogenous shrinkage, superabsorbent polymers, high strength concrete, nano silica, internal curing.



## SUMÁRIO

1.0 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - JUSTIFICATIVA .....	1
1.2 - RELEVÂNCIA DO PROJETO .....	3
1.3 - OBJETIVOS .....	6
1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO .....	7
2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 - VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS EM MEIOS CIMENTÍCIOS.....	9
2.1.1 - Deformações autógenas volumétricas químicas .....	13
2.1.2 - Mecanismos da Retração Autógena .....	15
2.1.3 - Fatores que afetam a retração autógena .....	21
2.1.4 - Soluções para Mitigação da Retração Autógena .....	26
2.1.5 - Metodologias Para Determinação da Variação Autógena em Pastas, Argamassas e Concretos .....	27
2.2 - POLÍMEROS SUPERABSORVENTES .....	36
2.2.1 - Mecanismo de absorção e dessorção dos polímeros superabsorventes em soluções aquosas.....	38
2.2.2 - Efeitos do polímero superabsorvente nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios .....	44
2.3 - CURA INTERNA .....	55
2.3.1 - Cura Interna com Polímeros Superabsorventes (SAP).....	56
2.4 - NANOSSÍLICA.....	62
2.4.1 - Efeitos da nanossílica nas propriedades dos concretos e argamassas .....	65
2.4.2 - Efeito combinado da adição de nanossílica e polímero superabsorvente .....	71
2.5 - DEFORMAÇÃO DO CONCRETO SOB CARGA CONSTANTE .....	73
2.5.1 - Mecanismo da fluência .....	76
2.5.2 - Fatores Influentes .....	79
3.0 - PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	90
3.1 - Variáveis do Estudo.....	90
3.1.1 - Variáveis Independente ou Variáveis de Controle.....	90
3.1.2 - Variáveis de Resposta ou dependentes .....	92
3.2 - Matriz Experimental.....	94
3.3 - Materiais Empregados .....	95
3.4 - Composição das Misturas .....	100
3.4.1 - Argamassas .....	103
3.4.2 - Concretos .....	105

3.5 - Métodos .....	109
3.5.1 - Propriedades no estado fresco .....	109
3.5.2 - Propriedades no estado endurecido.....	116
3.5.3 – Microestrutura .....	130
4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	132
4.1 - Propriedades no Estado Fresco.....	132
4.1.1 - Consistência .....	133
4.1.2 – Teor de ar e Densidade .....	136
4.1.3 - Tempo de Transição Suspensão-Sólido ou Tempo Zero ( $T_{zero}$ ) .....	142
4.2 - Propriedades no Estado Endurecido.....	155
4.2.1 - Retração Autógena.....	155
4.2.2 - Retração por Secagem .....	171
4.2.3 – Variação de massa dos corpos de prova com extensômetro embutido.....	187
4.2.4 – Resistência à compressão .....	189
4.2.5 – Resistência à tração.....	203
4.2.6 – Módulo de deformação.....	217
4.2.7 – Fluência Básica .....	231
4.2.8 - Microestrutura .....	238
4.3 – Resumo dos resultados .....	246
5.0 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO.....	252
5.1 – SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS.....	254
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	256
APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	274
APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS.....	277

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da quantidade de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave Autogenous Shrinkage Concrete, de acordo com consulta à plataforma ScienceDirect .....	4
Figura 2 - Evolução da quantidade de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave Polymer Superabsorbent and Concrete, de acordo com consulta à plataforma ScienceDirect .....	4
Figura 3 - Evolução da quantidade de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave Nano sílica and Concrete, de acordo com consulta à plataforma ScienceDirect ..	5
Figura 4 - Tipos de sistemas segundo os conceitos de termodinâmica (SILVA, 2007).....	10
Figura 5 - Resumo esquemático da proposta de Silva (2007) para a ocorrência das deformações autógenas e não autógenas em função do tipo de sistema.....	11
Figura 6 – Representação esquemática da classificação das deformações volumétricas em meios cimentícios proposta por Silva (2007). .....	12
Figura 7 - Menisco formado entre dois sólidos esféricos devido a tensão capilar (ESTEVES, 2011) .....	16
Figura 8 - Representação esquemática da equação de Young-Laplace, para o caso de um menisco formado entre duas superfícies esféricas (ESPING, 2007) .....	16
Figura 9 - Raio de poro como função da umidade relativa (à direita) e tensão capilar como função do raio do poro (à esquerda) (ASSMANN, 2013).....	18
Figura 10 - Ilustração de uma molécula no interior e na superfície do líquido.....	19
Figura 11 - Movimento de entrada e saída de água entre as lamelas no modelo proposto por Feldman e Sereda (1970) para o C-S-H .....	21
Figura 12 - Resultados de retração autógena para misturas com diferentes relações água/cimento, em função da idade (HOLT, 2005) .....	22
Figura 13 - Variação Autógena em função da finura do cimento (BENTZ et al. 2001). .....	23
Figura 14 - Variação Autógena para cinco pastas de cimento com relação a/c = 0,30 e substituições de C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S e C <sub>3</sub> A (JENSEN, 2000). .....	24
Figura 15 - Correlação entre retração autógena do concreto e o teor de sílica ativa aos 40 dias de idade (BROOKS et al., 1999).....	25
Figura 16 – Resultados de retração autógena em pastas e argamassa com relação a/c = 0,35 (a) e em argamassa e concreto com relação a/c = 0,35 (b) (HOLT, 2005).....	25
Figura 17- Membrana de poliuretano com reservatório (direita) e membrana de látex sem reservatório (esquerda), preenchidas com pasta de cimento para ensaio de variação autógena por medidas de deformação volumétrica (LURA e JENSEN, 2007) .....	28
Figura 18 - Conjunto de balança hidrostática para determinação da variação autógena por meio do princípio de Arquimedes e uma representação esquemática (LURA e JENSEN, 2007) .....	28
Figura 19 - Sistema de medição de deformação linear por meio de pinos embutidos em corpos de prova prismáticos de 100x100x500 mm (HAMMER et al., 2002) .....	31
Figura 20 – Sistema de medida com placas terminais móveis em corpos de prova prismáticos de 40x40x10 mm (HAMMER et al., 2002) .....	31
Figura 21 – Sistema de medida horizontal com LVDT em prismas de 150x150x500 mm (HAMMER et al., 2002) .....	32
Figura 22 - Sistema de medição linear vertical com LVDT em lajes de 270x270x100mm (HAMMER et al., 2002) .....	32
Figura 23 - Moldes e corpos de prova para os ensaios de retração realizados por KOJIMA et al. (2001) .....	33
Figura 24 - Sistema de medida em tubos flexíveis 100 x 375mm. Medição linear vertical por meio de transdutores de deslocamento no topo (HAMMER et al., 2002) .....	33

Figura 25 – Representação esquemática da metodologia proposta pelo Instituto Japonês do Concreto e adaptada por Silva (2007) para medição linear da variação autógena (adaptado de SILVA et al. 2011a) .....	35
Figura 26 - Dilatômetro. Equipamento desenvolvido por Jensen e Hansen (1995) utilizado na medida de deformação linear da variação autógena em pastas e argamassas (LURA et al., 2006a) .....	36
Figura 27 - O béquer à esquerda mostra um polímero seco e o béquer à direita mostra a mesma quantidade de polímero seco após a absorção de água (MÖNNIG, 2009) .....	37
Figura 28 - Polímero superabsorvente no estado seco, com partículas variando de 0 a 300µm. A coluna à direita mostra a transição do estado seco para inchado, caracterizado por uma mudança rápida de sólido para gel. A morfologia em ambos estados é de partículas esféricas (ESTEVES, 2011) .....	38
Figura 29 – Representação esquemática da estrutura reticulada do polímero superabsorvente no estado seco e no estado inchado (KLEMM e SIKORA, 2012).....	39
Figura 30 - Micrografia de dois diferentes tipos de polímeros superabsorvente em processo de inchamento (KLEMM e SIKORA, 2012) .....	40
Figura 31 - Efeito do tamanho da partícula de polímero superabsorvente sobre a redução da retração autógena. É sugerido uma dimensão ótima da partícula de aproximadamente 100µm no estado inchado (JENSEN e HANSEN, 2002) .....	41
Figura 32 - Partícula de polímero superabsorvente, ampliada 130 vezes, numa pasta de cimento no estado fresco (à esquerda) e a mesma partícula após 24 horas (à direita). Os círculos indicam o diâmetro original da partícula (168µm) e o diâmetro da região de influência (280µm) (MÖNNING, 2009 adaptado por MANZANO, 2016) .....	42
Figura 33 - Modelo esquemático do mecanismo de atuação do PSA como agente de cura interna em um concreto de alta resistência (MANZANO, 2016).....	43
Figura 34 - Desenvolvimento da resistência à compressão, em função do tempo, de concretos com SAP em comparação com dois concretos de referência. Adaptado de Lam e Hooton (2005) .....	46
Figura 35 - Evolução da resistência à compressão de misturas de argamassas com polímero superabsorvente e a mistura de referência (adaptado de MANZANO, 2016).....	48
Figura 36 - Desenvolvimento da resistência à tração por compressão diametral de concretos com dois teores de polímero e duas relações água/cimento, curados em umidade relativa de 50% e temperatura de 23 °C . Adaptado de Lam e Hooton (2005) .....	53
Figura 37 - Distribuição volumétrica da estrutura interna de duas pastas de cimento em função do grau de hidratação, a partir das equações do modelo de Powers. A esquerda, pasta com relação a/c = 0,36 e, a direita, pasta com relação a/c = 0,36 e água de cura interna igual a 0,06 (ASSMANN, 2013) .....	57
Figura 38 - Quantidade teoricamente necessária de água incorporada em pastas de cimento em função da relação água/cimento, para evitar a autodessecação (JENSEN e HANSEN, 2001).....	59
Figura 39 - Relação $a_{in}/c$ necessária para evitar a retração autógena em função da relação a/c, para pastas de cimento com diferentes teores de sílica ativa (LURA, 2003) .....	60
Figura 40 - Deformação autógena para um conjunto de pastas de cimento com relação a/c básica de 0,30 e diferentes teores de adição de polímero superabsorvente (JENSEN e HANSEN, 2002).....	61
Figura 41 - Resultados de deformação autógena de argamassas com relação sílica ativa/cimento igual a 0,10 e $a/c_{básica} = 0,30$ , com diferentes teores de SAP (MANZANO, 2016) .....	62
Figura 42 - Representação esquemática da polarização da superfície de uma partícula de nanossílica (BREGNA e ROBERTS, 2006) .....	63
Figura 43 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas (QUERCIA, 2014) .....	65
Figura 44 - Evolução da retração autógena ao longo do tempo para misturas de argamassas com 1% (NS1) e 2% (NS2) de nanossílica, em relação à massa de cimento, em comparação com traço de referência (SANTOS, 2016).....	71

Figura 45 - Resultados de retração autógena ao longo do tempo para misturas contendo 0,3% de SAP e diferentes teores de nanossílica (1% e 2% de NS), em comparação com o traço de referência (SANTOS, 2016).....	73
Figura 46- Representação esquemática da deformação do concreto ao longo do tempo, exposto ao ambiente e sob condições de carregamento constante .....	74
Figura 47 - Combinação de condições de umidade, fluência e retração (Adaptado de Mehta e Monteiro, 2014).....	75
Figura 48 - Influência do volume de pasta da mistura na fluência do concreto. Relação a/c 0,70; Idade de carregamento 28 dias; agregado granito (FURNAS, 1997).....	80
Figura 49 – Relação entre fluência básica e teor de agregados, onde g é a concentração de agregado (ACI, 2005) .....	81
Figura 50 - Fluência de concreto com traços iguais, preparados com diversos agregados, carregados aos 28 dias de idade, temperatura 21°C, umidade relativa 50% (ACI, 2005) .....	81
Figura 51 - Efeito da relação água/cimento na fluência (MEHTA e MONTEIRO, 2014) .....	82
Figura 52 -Efeito do tipo de cimento na fluência (MEHTA e MONTEIRO, 2014) .....	83
Figura 53 - Influência dos aditivos redutores de água sobre a fluência do concreto. Relação água/aglomerante 0,30; idade de carregamento 7 dias; umidade relativa do ar ( $60 \pm 5$ ) %; temperatura ( $20 \pm 1$ ) °C (QIAN et. al., 2016).....	84
Figura 54 - Efeito da umidade do ar sobre a fluência (ACI, 2005) .....	85
Figura 55 – Desenvolvimento da (a) função de fluência e (b) coeficiente de fluência de concretos sob diferentes idades de carregamento e histórico de temperatura. A temperatura entre o parêntesis indica a temperatura no início do carregamento e a fora do parêntesis a temperatura antes do carregamento (WEI et al., 2016) .....	86
Figura 56 - Comportamento da fluência básica à tração de concreto com polímero superabsorvente comparado com duas referências (ASSMANN e REINHARDT, 2014) .....	89
Figura 57 - Combinação das variáveis independentes do estudo .....	91
Figura 58 – Representação esquemática das variáveis de resposta do estudo .....	93
Figura 59 - Curva granulométrica da areia utilizada na produção dos concretos.....	96
Figura 60 - Curva da composição de agregado miúdo preparada com as frações do padrão europeu, em comparação com a curva granulométrica da areia natural empregada na produção dos concretos .....	96
Figura 61 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado no estudo .....	97
Figura 62 - Perfil difratométrico da nanossílica empregada no estudo .....	98
Figura 63 - Misturador utilizado na produção das argamassas (a) com detalhe dos materiais na cuba (b).....	104
Figura 64 - Medida da consistência das argamassas pelo espalhamento na mesa .....	105
Figura 65 - Representação esquemática do roteiro de mistura dos concretos .....	106
Figura 66 - Etapas da produção dos concretos: a) determinação da umidade superficial da areia; b) materiais secos no interior do misturador, antes da mistura; c) misturador utilizado; d) determinação do abatimento do concreto.....	106
Figura 67 - Enchimento das formas cilíndricas 10x20 cm (a) e adensamento com vibrador de agulha de imersão (b) .....	108
Figura 68 – Identificação do tempo zero por meio do desvio entre a retração química e a deformação autógena - adaptado (SANT et al., 2006a) .....	110
Figura 69 - Deformação absoluta da argamassa REF 0,345 .....	111
Figura 70 - Taxa de deformação absoluta da argamassa REF 0,345.....	112
Figura 71 – Deformações após a determinação do Tempo zero .....	113
Figura 72 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa SAP(0,30+0,067)1NS .....	114

Figura 73 - Forma empregada no ensaio de determinação do patamar de percolação.....	115
Figura 74 – Preparação para determinação do patamar de percolação: a) detalhe da fixação dos transdutores; b) selagem do corpo de prova; c) corpo de prova selado; d) ensaio em andamento.	116
Figura 75 – Conjunto de tubos corrugados e tampas utilizados como moldes para determinação da deformação autógena segundo a ASTM C1698.....	118
Figura 76 - Tubo corrugado preenchido com argamassa, pronto para o ensaio de deformação autógena segundo ASTM C1698 .....	119
Figura 77 - Equipamento para determinação da deformação autógena segundo ASTM C1698 (a) e conjunto de quatro corpos de prova em ensaio (b).....	120
Figura 78 - Sequência de preparação para o ensaio de variação autógena proposto por Silva (2007): a) forma prismática; b) forma forrada com poliestireno expandido e com pinos; c) determinação da distância entre os pinos; d) corpo-de-prova moldado .....	121
Figura 79 - Representação esquemática do ensaio de determinação da variação autógena (SILVA et al., 2011a).....	122
Figura 80 - Ensaio de determinação da variação autógena pelo método dos relógios comparadores .....	123
Figura 81 - Forma prismática 75x75x285mm (a) e a mesma forma forrada com poliestireno expandido (b) .....	123
Figura 82 - Extensômetro colocado no interior do molde (a), com detalhe da fixação e saída do cabo de leitura (b).....	124
Figura 83 - Moldagem do corpo-de-prova com extensômetro embutido.....	124
Figura 84 - Ensaio de determinação da variação autógena com extensômetro embutido (a) e detalhe da leitora de deformação (b).....	125
Figura 85 - Sistema de codificação do extensômetro tipo strain gage da marca Kyowa empregado na pesquisa .....	127
Figura 86 - Extensômetros testados para determinação da variação autógena com extensômetro embutido: a) modelo KM 120-H2-11-L100-3; b) modelo Carlson M-4.....	128
Figura 87 - Variação autógena ao longo do tempo determinada por meio de dois tipos de extensômetros: KM120 e Carlson .....	128
Figura 88- Comportamento da variação autógena ao longo do tempo obtido da média de dois corpos de prova para cada tipo de extensômetro testado .....	129
Figura 89 - Comparação da variação autógena ao longo do tempo considerando e não considerado o efeito da temperatura.....	129
Figura 90 - Valores de abatimento, em mm, e teor de superplastificante das misturas principais de concreto. As linhas tracejadas indicam o intervalo do abatimento fixado .....	133
Figura 91 – Espalhamento de argamassas com mesmo teor de superplastificante .....	136
Figura 92 – Abatimento dos concretos com o mesmo teor de superplastificante .....	136
Figura 93 – Comportamento do teor de ar aprisionado e densidade em função da adição de polímero superabsorvente .....	137
Figura 94 – Teor de ar aprisionado e densidade, no estado fresco, de concretos com e sem polímero superabsorvente, com a mesma dosagem de aditivo superplastificante.....	138
Figura 95 - Comportamento do teor de ar aprisionado e densidade em função da adição de nanossílica.....	139
Figura 96 – Efeito da adição de nanossílica no teor de ar aprisionado e densidade em concretos com o mesmo teor de aditivo superplastificante .....	140
Figura 97 - Influência da adição combinada de polímero superabsorvente e de nanossílica sobre o teor de ar aprisionado e densidade dos concretos no estado fresco.....	140
Figura 98 - Efeito da adição combinada de SAP e nanossílica no teor de ar aprisionado e densidade em concretos com a mesma dosagem de superplastificante.....	141

Figura 99 - Curva típica dos resultados de determinação do Tempo zero pelo método da velocidade do pulso ultrassônico.....	143
Figura 100 - Tempo zero dos concretos estudados .....	143
Figura 101 - Tempo zero das argamassas estudadas.....	144
Figura 102 - Comportamento do tempo zero dos traços de referência dos concretos e argamassas em função da dosagem de superplastificante .....	145
Figura 103 - Tempo zero da argamassa REF 0,30 com diferentes teores de aditivo superplastificante.....	145
Figura 104 - Comportamento da curva de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos de referência .....	146
Figura 105 - Influência do teor de água incorporada no tempo zero dos concretos.....	147
Figura 106 - Comportamento da curva de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos com e sem polímero superabsorvente.....	149
Figura 107 - Tempo zero e teor de aditivo superplastificante dos traços de concreto com e sem adição de nanossílica.....	150
Figura 108 - Curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para concretos com e sem nanossílica.....	150
Figura 109 – Efeito da adição de polímero superabsorvente no tempo zero de concretos com teores fixos de nanossílica .....	152
Figura 110 - Comportamento das curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos com teores fixos de 1% e 2% de nanossílica .....	153
Figura 111 - Efeito da adição de nanossílica no tempo zero nos concretos com teores fixos de polímero superabsorvente .....	153
Figura 112 - Comportamento das curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos com quantidades fixas de polímero superabsorvente .....	154
Figura 113 – Efeito da adição combinada de nanossílica e polímero superabsorvente no $T_{zero}$ de argamassas com o mesmo teor de aditivo superplastificante .....	155
Figura 114 - Resultados médios da variação autógena dos onze concretos estudados, a partir de $T_0$ até 28 dias.....	157
Figura 115 - Resultados médios de variação autógena das argamassas estudadas .....	158
Figura 116 - Resultados médios de variação autógena, em função do tempo, para três concretos de referência e dois com adição de SAP.....	161
Figura 117 - Representação esquemática da evolução da retração autógena dos concretos de referência com identificação dos três estágios observados .....	163
Figura 118 - Comparação múltiplas de médias associadas com a relação água/cimento básica....	164
Figura 119 - Comparação múltiplas de médias associadas com o teor de água incorporada.....	164
Figura 120 – Resumo da variação múltiplas de média para os concretos de referência e os concretos com água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna.....	165
Figura 121 - Resultados médios da variação autógena das misturas contendo apenas adição de nanossílica em comparação com o traço de referência REF 0,30 .....	166
Figura 122 - Comparação múltiplas de médias associadas com a adição de nanossílica.....	167
Figura 123 –Resultados médios da variação autógena das misturas de concreto com adição de nanossílica e concreto de referência em comparação com misturas de argamassa de alta resistência com adição de nanossílica e respectiva referência .....	168
Figura 124 - Resultados médios da variação autógena das misturas contendo água de cura interna com e sem adição de nanossílica, em comparação com as misturas 0,30 1NS, 0,30 2NS e REF 0,30 .....	169
Figura 125 - Comparação múltiplas de médias associadas com as misturas híbridas.....	170

Figura 126 - Comparação entre o método da ASTM C 157 e o método do extensômetro embutido para determinação da retração por secagem dos concretos .....	172
Figura 127 - Resultados médios de retração por secagem de todos os concretos estudados .....	175
Figura 128 - Resultados de retração por secagem dos concretos com a adição de SAP em comparação com os concretos de referência .....	176
Figura 129 - Porosidade aberta de materiais cimentícios com e sem SAP (MA et al., 2017).....	177
Figura 130 - Resultados de retração por secagem, obtidos pelo método da ASTM C157, para os concretos 0,30 1NS, 0,30 2NS e REF 0,30 .....	178
Figura 131 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,045 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com as misturas somente com adição de nanossílica .	179
Figura 132 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,067 combinado com 1% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com a mistura somente com adição de nanossílica .....	180
Figura 133 - Resultados médios de retração por secagem de todos os concretos estudados .....	181
Figura 134 - Resultados de retração por secagem dos concretos com a adição de SAP em comparação com o concreto de referência REF 0,30 .....	182
Figura 135 – Evolução da retração por secagem em concretos com SAP em comparação com concretos sem SAP, relação $a/c_{total}$ 0,345 (a esquerda) e $a/c_{total}$ 0,367 (a direita) .....	183
Figura 136 – Evolução da retração por secagem dos concretos 0,30 1NS, 0,30 2NS e REF 0,30	184
Figura 137 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,045 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com as misturas somente com adição de nanossílica .	186
Figura 138 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,067 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com as misturas somente com adição de nanossílica .	187
Figura 139 - Resultados médios de variação de massa de água em relação à água total dos concretos, determinados em corpos-de-prova prismáticos curados ao ar numa sala com UR 50% ± 4% e T = 21°C ± 2°C .....	188
Figura 140 - Relação entre retração por secagem e perda de massa de água .....	188
Figura 141 - Relação linear entre perda de massa e retração por secagem, a esquerda, para todos os concretos e, a direita, separando dois grupos formados pelos concretos com água incorporada igual a 0,067 (preto) e os demais concretos (vermelho).....	189
Figura 142 - Resultados de resistência à compressão para concretos com e sem água de cura interna para uma relação água/cimento básica igual a 0,30 .....	192
Figura 143 - Evolução da resistência à compressão com a idade dos concretos SAP(0,30+0,045), SAP(0,30+0,067) e REF 0,30 .....	193
Figura 144 - Variação múltiplas de média para resistência à compressão, associada à relação $a_{inc}/c$ para concretos com a mesma relação $a/c_{básica}$ .....	194
Figura 145 - Resultados de resistência à compressão para concretos com e sem água de cura interna para uma mesma relação água/cimento total.....	195
Figura 146 - Variação múltiplas de média para resistência à compressão, associada à relação $a_{inc}/c$ para concretos com a mesma relação $a/c_{total}$ .....	198
Figura 147 Resultados de resistência à compressão para concretos com adição de nanossílica em comparação com o concreto REF 0,30.....	198
Figura 148 - Variação múltiplas de média para resistência à compressão, associada à adição de nanossílica .....	199
Figura 149 - Influência da ação combinada da adição de nanossílica e teor de água incorporada por meio de SAP na resistência à compressão dos concretos.....	200



Figura 150 - Resultados médios de resistência à compressão dos concretos com $a_{inc}/c = 0,045$ (a) e $a_{inc}/c = 0,067$ (b) em comparação com o concreto REF 0,30 .....	201
Figura 151 - Variação múltiplas de médias para resistência à compressão, associada ao efeito combinado ao teor de água incorporada e à adição de nanossílica .....	203
Figura 152 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral para concretos com e sem água de cura interna para uma relação água/cimento básica igual a 0,30 .....	206
Figura 153 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à relação $a_{inc}/c$ para concretos com a mesma relação $a/c_{básica}$ .....	207
Figura 154 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral para concretos com e sem água de cura interna para a mesma relação água/cimento total.....	208
Figura 155 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à relação $a_{inc}/c$ para concretos com a mesma relação $a/c_{total}$ .....	211
Figura 156 - Resultados de resistência à tração para concretos com adição de nanossílica em comparação com o concreto REF 0,30.....	212
Figura 157 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à adição de nanossílica para concretos com a mesma relação $a/c_{básica}$ .....	213
Figura 158 - Influência da ação combinada da adição de nanossílica e teor de água incorporada por meio de SAP na resistência à tração por compressão diametral dos concretos.....	214
Figura 159 - Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral das misturas híbridas em comparação com os concretos de mesma relação $a/c_{total} = 0,345$ (a) e de mesma relação $a/c_{total} = 0,367$ (b).....	215
Figura 160 - Variação múltiplas de médias dos concretos para resistência à tração, associada ao teor de água incorporada e adição de nanossílica.....	217
Figura 161 - Resultados de módulo de deformação para concretos com e sem água de cura interna para uma relação água/cimento básica igual a 0,30 .....	221
Figura 162 - Resultados de módulo de deformação para concretos com e sem água de cura interna para a mesma relação água/cimento total.....	222
Figura 163 - Variação múltiplas de média para módulo de deformação, associada à relação $A_{inc}/C$ para concretos com a mesma relação $a/c$ básica.....	224
Figura 164 - Variação múltiplas de média para módulo de deformação, associada à relação $A_{inc}/C$ para concretos com a mesma relação $a/c$ total .....	224
Figura 165 - Resultados de módulo de deformação para concretos com adição de nanossílica em comparação com o concreto REF 0,30.....	225
Figura 166 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à adição de nanossílica para concretos com a mesma relação $a/c$ .....	227
Figura 167 - Influência da ação combinada da adição de nanossílica e teor de água incorporada por meio de SAP no módulo de deformação dos concretos .....	228
Figura 168 - Resultados médios de módulo de deformação das misturas híbridas em comparação com os concretos de mesma relação $a/c_{total} = 0,345$ (a) e de mesma relação $a/c_{total} = 0,367$ (b) ...	229
Figura 169 - Variação múltiplas de médias dos concretos para módulo de deformação, associada ao teor de água incorporada e adição de nanossílica.....	231
Figura 170 - Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes, segundo o modelo proposto pelo ACI 209.2R (ACI, 2008), para o concreto REF 0,30 nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias	232
Figura 171 - Coeficiente de fluência dos concretos de referência.....	233
Figura 172 - Comportamento do coeficiente de fluência dos concretos com adição de polímero superabsorvente em comparação com o concreto REF 0,30.....	234
Figura 173 - Coeficiente de fluência dos concretos com SAP em comparação com os concretos de referência com a mesma relação água/cimento total .....	235

Figura 174 - Coeficiente de fluência do concreto com adição de nanossílica em comparação com o concreto de referência .....	236
Figura 175 - Efeito da adição combinada de SAP e nanossílica no coeficiente de fluência .....	237
Figura 176 – Aspecto geral da microestrutura dos concretos com 1 dia de idade .....	239
Figura 177 – Detalhe da estrutura mais porosa do concreto SAP(0,30+0,045) (a) em comparação com o concreto REF 0,30 (b) .....	240
Figura 178 - (a) Aspecto geral de poros vazios (característicos de ar aprisionado) em amostra do concreto REF 0,30, com 28 dias de idade. (b) Presença de poros vazio e outro parcialmente preenchido (típico de poros deixados pelo SAP) em amostra do concreto SAP(0,30+0,045), com 1 dia de idade .....	241
Figura 179 – Concreto SAP(0,30+0,045) com presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em processo de transformação (“a” e “c”) e de C-S-H (“b”), identificados por meio de EDS, no interior de poro deixado pelo SAP, amostra com 1 dia de idade. ....	242
Figura 180 – Poro característico da presença do SAP em amostra do concreto SAP(0,30+0,045)INS, aos 28 dias de idade, com uma espécie de casca e ao fundo produtos semelhantes a hidróxido de cálcio. ....	243
Figura 181 - Presença de grãos de cimento anidro nas amostras dos concretos de referência REF 0,30 (esquerda) e REF 0,345 (direita), aos 28 dias de idade. ....	244
Figura 182 - Presença de aglomeração de sílica e de grãos de cimento anidro em concreto com adição de nanossílica (0,30 INS) .....	244
Figura 183 - Aspecto denso e sem imperfeições da interface agregado graúdo-pasta das amostras de concreto analisadas.....	245

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre pastas com dois valores de relação água/material cimentante, umidade relativa (UR), raio do poro (r) e a depressão capilar ( $\Delta P$ ), com 20 dias de idade (BUIL, 1990 apud BOIVIN, 2001) .....	22
Tabela 2 - Resultados de resistência à compressão de misturas com e sem polímero (MECHTCHERINE et al. 2013) .....	50
Tabela 3 - Resultados de resistência à compressão de misturas com e sem polímero (MANZANO, 2016) .....	50
Tabela 4 - Razões porque o polímero superabsorvente influencia a resistência à compressão do concreto (HASHOLT et al., 2010) .....	51
Tabela 5 - Resistência à tração direta e na flexão de concretos produzidos com e sem SAP, com diferentes condições de cura (MECHTCHERINE et al.2006) .....	52
Tabela 6 - Resistência à tração por compressão diametral de concretos produzidos com e sem polímero superabsorvente (IGARASHI E WATANABE, 2006).....	52
Tabela 7 – Comparação da finura da nanossílica com outros materiais reconhecidamente finos, por meio da área superficial BET. ....	62
Tabela 8 - Tipos de deformação sob o efeito de carregamento (NEVILLE, 1997) .....	74
Tabela 9 - Classificação dos poros em pastas de cimento hidratadas (adaptada de Young et al., 1988; Mehta e Monteiro, 2014).....	77
Tabela 10 - Nomenclatura adotada no presente estudo para identificação dos traços .....	92
Tabela 11 - Matriz experimental do estudo.....	94
Tabela 12 - Características da nanossílica de acordo com o fabricante .....	98
Tabela 13 - Características do superplastificante empregado .....	99
Tabela 14 - Características do Polímero Superabsorvente (MANZANO, 2016) .....	100
Tabela 15 - Composição recomendada pelo comitê TC 225 SAP (RILEM, 2012) .....	100
Tabela 16 - Traço unitário dos concretos do estudo.....	102
Tabela 17 - Traço unitário das argamassas em estudo .....	103
Tabela 18 - Roteiro de mistura das argamassas .....	104
Tabela 19 - Propriedades, idade de ensaio, número de corpos de prova, idade, dimensões e formatos dos corpos de prova do estudo .....	107
Tabela 20 - Propriedades e métodos de ensaios empregados na caracterização dos concretos e argamassas no estado fresco.....	109
Tabela 21 - Métodos empregados na determinação das propriedades dos concretos e argamassas no estado endurecido.....	117
Tabela 22 - Características do extensômetro tipo Carlson M-4 (FURNAS, 1997).....	126
Tabela 23 - Característica do extensômetro tipo strain gage de temperatura auto compensável em função do tipo de material compatível (FURNAS, 1997).....	127
Tabela 24 - Propriedades dos concretos no estado fresco .....	132
Tabela 25 - Espalhamento das argamassas na mesa de consistência .....	133
Tabela 26 - Tempo zero dos traços de concreto e argamassa.....	142
Tabela 27 - Resultados médios de variação autógena em diversas idades.....	156
Tabela 28 - Análise de Variância verificando a influência da relação água/cimento básica e idade sobre a retração autógena .....	159
Tabela 29 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre a retração autógena, concretos com $a/c_{básica} = 0,30$ .....	159
Tabela 30 - Comparação da retração medida pela ASTM C157 após 28 dias de cura submersa e a retração autógena medida pelo método do extensômetro embutido .....	173
Tabela 31 - Resultados médios de retração por secagem em diversos tempos de ensaio .....	174

Tabela 32 - Resultados médios de retração por secagem em diversos tempos de ensaio .....	180
Tabela 33 - Resultados médios de resistência à compressão dos concretos estudados .....	190
Tabela 34 - Análise de Variância verificando a significância do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre a resistência à compressão, para concretos com a/c básica = 0,30 .....	190
Tabela 35 - Redução da resistência à compressão dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c básica ( $a/c_{básica} = 0,30$ ) .....	192
Tabela 36 - Comportamento da resistência à compressão dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c total .....	195
Tabela 37 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à compressão, para a mesma relação a/c total ( $a/c_{total} = 0,345$ ) .....	196
Tabela 38 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à compressão, para a mesma relação a/c total ( $a/c_{total} = 0,367$ ) .....	197
Tabela 39 - Comportamento da resistência à compressão dos concretos com adição de nanossílica em relação ao concreto de referência REF 0,30 .....	199
Tabela 40 - Redução da resistência à compressão dos concretos com adição combinada de nanossílica e SAP em relação ao concreto de referência com relação a/c básica = 0,30 .....	202
Tabela 41 - Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral .....	204
Tabela 42 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade na resistência à tração, concretos com a/c básica = 0,30 .....	204
Tabela 43 - Incremento da resistência à tração dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c básica ( $a/c_{básica} = 0,30$ ) .....	206
Tabela 44 - Comportamento da resistência à tração dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c total .....	208
Tabela 45 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à tração, para concretos com a mesma relação a/c total = 0,345 .....	209
Tabela 46 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à tração, para concretos com a mesma relação a/c total = 0,367 .....	210
Tabela 47 - Comportamento da resistência à tração dos concretos com adição de nanossílica em relação ao concreto de referência REF 0,30 .....	212
Tabela 48 - Comportamento da resistência à tração dos concretos com adição de de nanossílica e SAP, em relação ao concreto com SAP e mesma relação a/c total .....	216
Tabela 49 - Resultados médios de módulo de deformação .....	218
Tabela 50 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre o módulo de deformação, para concretos com relação a/c básica = 0,30 .....	219
Tabela 51 - Análise de Variância verificando a influência da água incorporada e idade sobre o módulo de deformação, para concretos com a mesma relação a/c total = 0,345 .....	219
Tabela 52 - Análise de Variância verificando a influência da água incorporada e idade sobre o módulo de deformação, para concretos com a mesma relação a/c total = 0,367 .....	220
Tabela 53 – Redução do módulo de deformação dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c básica ( $a/c_{básica} = 0,30$ ) .....	221
Tabela 54 - Comportamento do módulo de deformação dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c total .....	222
Tabela 55 - Comportamento do módulo de deformação dos concretos com adição de nanossílica em relação ao concreto de referência REF 0,30 .....	225
Tabela 56 - Análise de Variância verificando a influência da adição de nanossílica e idade sobre o módulo de deformação, concretos com e sem adição de nanossílica e relação a/c básica = 0,30 .....	226
Tabela 57 - Comportamento do módulo de deformação dos concretos com adição de nanossílica e SAP, em relação ao concreto com SAP e mesma relação a/c total .....	230
Tabela 58 –Fluência dos concretos nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias .....	233

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

$\phi_{(t,t_0)}$	Coefficiente de fluência
$\mathcal{E}_{(ti+15)}$	Deformação 15 minutos após o tempo $i$
$\mathcal{E}_{ti}$	Deformação no tempo $i$
$\alpha$	Grau de hidratação
$\alpha_{\max}$	Grau de hidratação máximo
$\Delta L$	Deformação relativa de comprimento
$\Delta M$	Varição de massa
$\Delta P_c$	Gradiente de pressão capilar
$\Delta U$	Varição de energia interna
$\Delta W$	Varição de trabalho
$\theta$	Ângulo de contato
$\rho$	Massa específica do líquido
$\sigma$	Tensão superficial da água
a/c	Relação água/cimento
a/c <sub>básica</sub>	Relação água/cimento básica
a/c <sub>Total</sub>	Relação água/cimento total
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFt	Etringita
a <sub>inc</sub> /c	Relação água incorporada/cimento
ANOVA	Análise de variância
ARR	Aditivos redutores de retração
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
ATG	Análise Termogravimétrica
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico

CAR	Concreto de Alta Resistência
CEB/FIP	<i>International Federation for Structural Concrete</i>
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difratometria de Raios-X
Ec	Módulo de deformação do concreto
EDS	Espectrografia por Dispersão de Energias
Fc	Resistência do concreto à compressão
fck	Resistência característica do concreto à compressão
Fc,sp	Resistência do concreto à tração por compressão diametral
G	Comprimento inicial entre as extremidades internas dos pinos metálicos
J	Função de fluência;
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	<i>Linear variable differential transformers</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg-S-H	Silicato de magnésio hidratado
NBR	Norma Brasileira Registrada no INMETRO
NS	Nanossílica
p	Porosidade
R	Constante dos gases perfeitos
r	Raios de curvatura
RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
s/c	Relação sílica ativa/cimento
SAP	Polímero superabsorvente
SP	Superplastificante
SSS	Saturado superfície seca
t	Idade do concreto;
T	Temperatura
t <sub>0</sub>	Idade do concreto no início do carregamento

$t_1; t_2$	Instantes 1 e 2
Tzero	Transição suspensão sólido/ tempo zero
UR	Umidade relativa
$V_{ac}$	Volume de água capilar
$V_{ag}$	Volume de água de gel
$V_{ca}$	Volume de cimento anidro
$V_m$	Volume molar do líquido
$V_{rq}$	Volume de retração química
$V_{sg}$	Volume de sólidos de gel
$X_{0a}, X_{0b}$	Leituras iniciais nos extensômetros.
$X_{ia}, X_{ib}$	Leituras nos extensômetros horizontais no tempo i.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 - JUSTIFICATIVA**

A pesquisa em questão se insere na área de Construção Civil, especificamente na linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção”, tendo como tema o Estudo da Estabilidade Dimensional de Concretos de Alta Resistência com Adição de Polímero Superabsorvente e Nanopartículas de Sílica.

Os avanços na tecnologia do concreto têm permitido a produção de concretos com melhores desempenhos e elevadas resistências. Inclusive a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) incorporou em seu texto a possibilidade do uso de concretos com resistência à compressão de até 90 MPa.

Os concretos de alta resistência (CAR) apresentam uma baixa relação água/cimento e considerável consumo de materiais cimentícios (cimento Portland e adições minerais), resultando numa microestrutura bastante densa e de poros finos. Essas características fazem com que a retração autógena nos CAR seja significativa, podendo provocar, especificamente nas idades iniciais, fissuração do concreto, o que trará prejuízos às suas características mecânicas, de durabilidade e estéticas (SILVA, 2007; LOPES, 2011).

A retração autógena do concreto é definida como a redução volumétrica do concreto, após a transição suspensão-sólido, sem que ocorra variação de volume devido à perda ou ao ingresso de substâncias, variação de temperatura ou aplicação de cargas externas (HASPARYK et. al., 2005). Os primeiros registros da retração autógena no concreto são do início do século XX, no entanto, somente no final dos anos 80 e início dos anos 90 sua importância foi reconhecida e os estudos sobre o tema foram intensificados, devido ao advento do concreto de alta resistência e a retração autógena representar a principal causa da sua fissuração, nas primeiras idades.

A ocorrência da retração autógena em concretos de cimento Portland não é fácil de ser evitada, pois esta é um fenômeno intrínseco do processo de hidratação do cimento. Esse fato, associado aos prejuízos que essa retração pode ocasionar aos CAR, mostra a importância de melhor compreendê-la e aprofundar os estudos sobre o tema, com o objetivo de controlá-la a níveis aceitáveis.



A retração autógena é causada pelo fenômeno da autodessecação, que é a redução da umidade relativa, durante o endurecimento da pasta de cimento, devido ao consumo de água capilar no processo da hidratação do cimento, associado ao fato do volume molar dos reagentes ser maior do que o volume molar dos produtos de hidratação formados (TAZAWA, 1999). Mesmo considerando a complexidade do fenômeno, existem algumas opções para reduzi-la, sendo que os principais métodos são a utilização de aditivos químicos e a cura interna.

Em relação aos aditivos químicos, destacam-se os Aditivos Redutores de Retração (ARR) e alguns aditivos expansivos usados na fabricação de concretos com retração compensada. Esses aditivos a princípio, foram usados para combater o fenômeno da retração por secagem, no entanto, devido à semelhança ao fenômeno da retração autógena, esses aditivos também têm sido recomendados para combater a retração autógena (HUA et. al., 1995).

A cura interna consiste na incorporação, no concreto fresco, de um agente que atuará como um reservatório de água que será liberada gradualmente, à medida que o processo de hidratação do cimento avança e a água disponível para as reações vai sendo consumida. Esses métodos utilizam como agente de cura interna agregados leves e, mais recentemente, polímeros superabsorventes (SAP<sup>1</sup>).

Os polímeros superabsorventes (SAP) são materiais poliméricos com grande capacidade de absorção de líquido do ambiente e de reter esse líquido sem se dissolver. Os primeiros relatos da utilização do SAP, como agente de cura interna, para diminuir a retração autógena em CAR foram feitos por Jensen e Hansen (2001), no início dos anos 2000. O uso do SAP é hoje reconhecido no meio técnico como a mais eficaz estratégia de mitigação ou mesmo de eliminação da retração autógena. No entanto, alguns estudos (JENSEN e HANSEN, 2002; MECHTCHERINE, et al, 2006; PIÉRARD, et al., 2006) têm mostrado que a incorporação do polímero superabsorvente na mistura prejudica a resistência à compressão dos concretos.

---

<sup>1</sup> A sigla SAP vem do inglês “*SuperAbsorbent Polymer*”. No Brasil alguns autores têm adotado a sigla PSA (Polímero SuperAbsorvente). No entanto a sigla SAP é utilizada no meio técnico internacional e está se popularizando no meio técnico nacional. Desse modo, no presente estudo a sigla SAP será adotada para se referenciar aos polímeros superabsorventes.

Buscando compensar a perda de resistência causada pela adição do polímero, Pourjavadi *et al.* (2012) e, mais recentemente, Santos (2016) desenvolveram estudos incorporando ao concreto nano partículas de sílica e o polímero superabsorvente. A proposta dos pesquisadores é que a incorporação de nano partículas em materiais cimentícios, possa representar um papel decisivo na mitigação da retração autógena com o uso do polímero, sem prejudicar as propriedades mecânicas do concreto. Pourjavadi *et al.* (2012) e Santos (2016) mostraram-se animados com os primeiros resultados obtidos e apontam para a possibilidade do uso combinado dessas adições.

Apesar dos estudos que vêm sendo desenvolvidos, o conhecimento e compreensão do comportamento e desempenho do concreto com adição de SAP, de nano partículas de sílica e a combinação de ambos, ainda são incipientes e muitas questões permanecem sem respostas. Assim sendo, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas científicas, com embasamento teórico e experimental, para melhor compreender o comportamento e a influência dessas adições no concreto.

## **1.2 - RELEVÂNCIA DO PROJETO**

O tema em questão tem se mostrado relevante no meio técnico internacional. Desde o ano de 2010 quatro conferências internacionais tratando especificamente sobre este assunto foram promovidas pela *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM). Em 2012 foi publicado um relatório sobre o estado da arte do tema: *Application of superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction: state-of-the-art report* (RILEM, 2012), fruto do trabalho do comitê técnico da RILEM (TC 225-SAP), criado em 2007 para promover o estudo e a tecnologia do SAP em materiais cimentícios. Ainda como resultado do trabalho desse comitê, foi publicado em 2013 um artigo compilando os resultados de um estudo interlaboratorial de pesquisadores de diferentes países (MECHTCHERINE *et al.*, 2013). Além disso, um novo comitê técnico da RILEM - *RILEM TC RSC – Recommendations for Use of Superabsorbent Polymers in Concrete Construction* - foi criado em 2014 para elaborar as recomendações aos construtores no que se refere a utilização do SAP.

A atualidade e relevância do tema também é notada na evolução do número de artigos científicos publicados nos últimos anos envolvendo retração autógena, polímero

superabsorvente e nano partículas de sílica. Uma rápida consulta ao *ScienceDirect*<sup>2</sup> envolvendo as palavras-chave *Autogenous Shrinkage and Concrete*; *Polymer Superabsorbent and Concrete*; *Nano silica and Concrete* deixa evidente a crescente quantidade de artigos publicados sobre o tema em periódicos internacionais, como mostram as Figuras 1 a 3. É possível perceber, portanto, um amplo esforço da comunidade científica em se aprofundar no assunto.

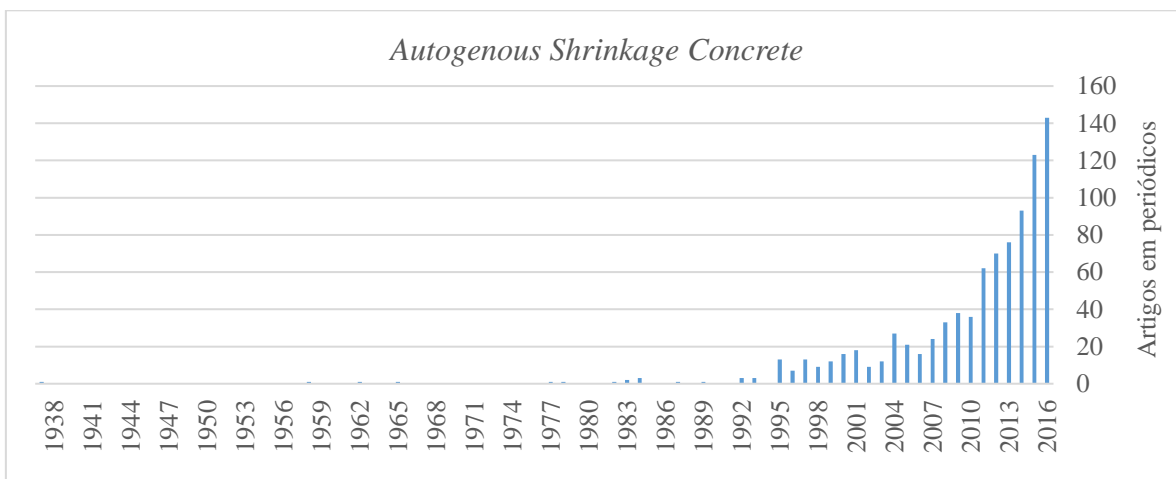


Figura 1 – Evolução da quantidade de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave *Autogenous Shrinkage Concrete*, de acordo com consulta à plataforma *ScienceDirect*

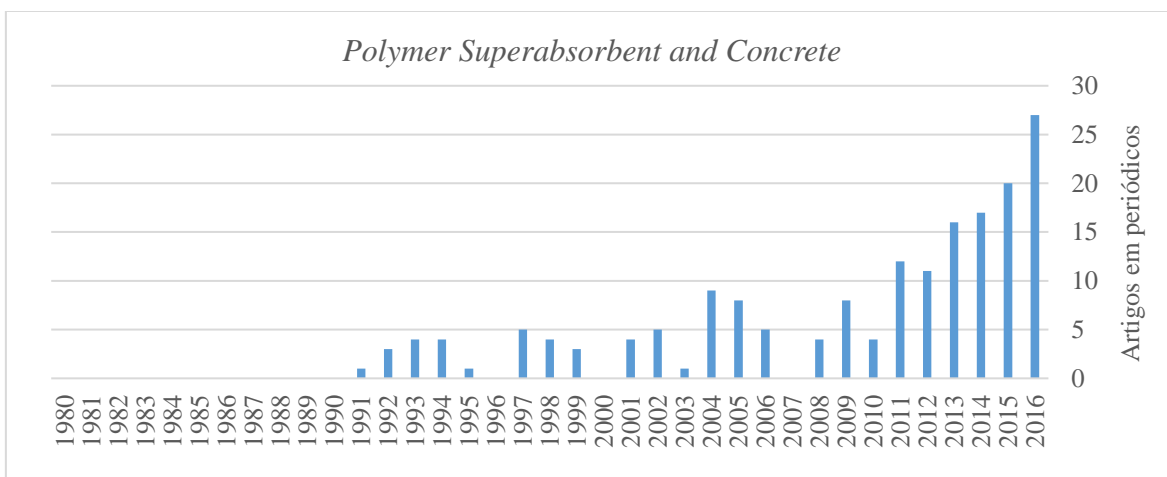


Figura 2 - Evolução da quantidade de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave *Polymer Superabsorbent and Concrete*, de acordo com consulta à plataforma *ScienceDirect*

<sup>2</sup> *ScienceDirect* é uma página web operada pela editora anglo-holandesa Elsevier, que fornece acesso a um grande banco de dados de pesquisa científica. Ele hospeda mais de 12 milhões de peças de conteúdo de 3.500 revistas acadêmicas e 34.000 e-books. Os periódicos são agrupados em quatro seções principais: Ciências Físicas e Engenharia, Ciências Biológicas, Ciências da Saúde e Ciências Sociais e Humanas.

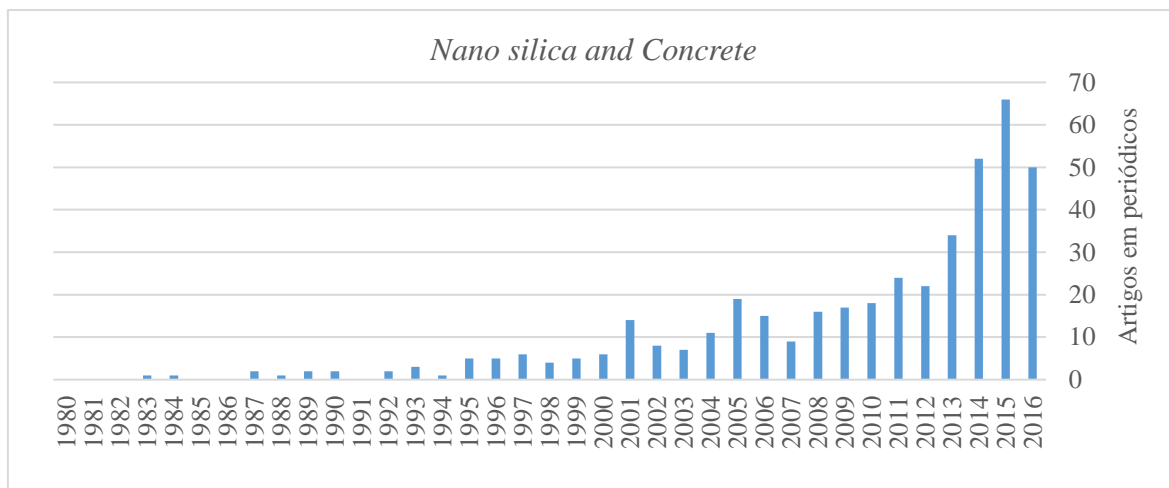


Figura 3 - Evolução da quantidade de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave *Nano sílica and Concrete*, de acordo com consulta à plataforma *ScienceDirect*

Apesar do avanço do estudo da adição de SAP nos meios cimentícios, várias questões permanecem em aberto. Na literatura técnica se encontra apenas um artigo publicado que avaliou o efeito da adição de SAP na fluência do concreto e sem o uso de nano partículas (ASSMANN E REINHARDT, 2014). Ainda assim, os autores desenvolveram seus estudos observando a fluência na tração e o trabalho em desenvolvimento proposto aqui tem sido inovador, observando a fluência na compressão.

No que se refere ao uso combinado de SAP e de nano partículas de sílica, com o intuito de compensar a perda de resistência mecânica, também se encontra na literatura apenas um artigo publicado (POURJAVADI et al., 2012) e um trabalho de mestrado (SANTOS, 2016). Pourjavadi et al. (2012) se limitaram a estudar o efeito combinado dessas adições nas propriedades mecânicas, não fizeram nenhuma avaliação de como estas duas adições podem interferir na retração autógena. A dissertação de Santos (2016) é o primeiro registro do estudo da influência da ação combinada de SAP e nano partículas de sílica sobre a retração autógena, porém seus estudos foram desenvolvidos em argamassas de alta resistência. O trabalho proposto também inova nesse aspecto, pois se avaliou a ação combinada de SAP e nano partículas de sílica em concretos e não se limitou a avaliar a retração autógena. As observações foram ampliadas para outras propriedades relacionadas com a estabilidade dimensional do concreto, a saber: retração autógena, retração por secagem e fluência. Além da verificação das resistências mecânicas à compressão e à tração, e também da microestrutura.

O presente trabalho é parte integrante de uma linha de pesquisa da Universidade de Brasília, que desde o ano de 2008, 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), uma tese de doutorado (MANZANO, 2016), além de artigos publicados em periódicos internacionais (MECHTCHERINE et al., 2013; LOPES et al., 2013) e em vários congressos nacionais e internacionais (SANTOS et. al., 2016; MANZANO et al., 2015; MANZANO et al., 2014; SILVA et al., 2014; GONZALEZ et al., 2014; TRALDI et al., 2014; SILVA et al., 2013a; SILVA et al., 2013b; ORDOÑEZ et al., 2013; ORDOÑEZ et al., 2012; SILVA et al., 2012; LOPES et al., 2012; SILVA et al., 2011a; SILVA et al., 2011b; SILVA et al., 2011c; SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2008).

Diante do exposto, e tratando-se do emprego da adição de materiais relativamente novos no concreto, espera-se que os resultados alcançados nessa pesquisa possam contribuir efetivamente com o desenvolvimento científico e tecnológico de concretos com esses materiais, possibilitando, assim, o uso seguro e eficaz dos mesmos num futuro próximo.

### **1.3 - OBJETIVOS**

O objetivo geral da presente pesquisa foi avaliar a ação combinada da adição de polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica em concretos de alta resistência para controlar a estabilidade dimensional do concreto e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas.

Para alcançar o objetivo geral foram necessários os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a eficiência do uso de polímero superabsorvente como agente de cura interna para mitigar a retração autógena de concretos de alta resistência, bem como a influência da ação combina de SAP com nanopartículas de sílica na retração autógena de concretos de alta de resistência;
- Avaliar a influência do uso de SAP e de nanopartículas de sílica na deformação lenta (fluência) de concretos de alta resistência;

- Avaliar a influência de SAP, de nanopartículas de sílica e a ação combinada dessas adições na retração por secagem de concretos de alta resistência;
- Avaliar a influência do uso de SAP e de nanopartículas de sílica nas propriedades de concretos de alta resistência no estado fresco;
- Avaliar a influência do uso de SAP e de nanopartículas de sílica nas resistências mecânicas à tração e à compressão, bem como no módulo de deformação de concretos de alta resistência;
- Estudar a influência do SAP e de nanopartículas de sílica na microestrutura de concretos de alta resistência.

#### **1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está estruturado em 5 capítulos e 2 apêndices. No capítulo 2, na sequência do presente capítulo que é a introdução, trata-se da revisão do estado da arte que começa apresentando as variações volumétrica nos meios cimentícios, passando a abordar especificamente a retração autógena: mecanismos, fatores influentes, soluções mitigadoras e metodologias de determinação. É apresentada uma revisão do uso do polímero superabsorvente como agente de cura interna para mitigar a retração autógena e sua influência nas propriedades mecânicas dos sistemas cimentícios. Na sequência se apresenta a revisão sobre o uso da adição de nanossílica nos concretos, seus efeitos e ação combinada com polímeros superabsorventes. Por fim, se encerra o capítulo com a revisão da deformação do concreto sob carga constante com apresentação de conceitos, mecanismos e fatores influentes.

No capítulo 3 é mostrado o programa experimental, onde são apresentadas as variáveis de estudo, os materiais utilizados e sua caracterização, os concretos e argamassas de estudo, os métodos e procedimentos empregados para a realização dos ensaios.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e as discussões sobre os efeitos das variáveis de estudo no ar aprisionado, na consistência, no tempo de transição suspensão-sólido, na retração autógena, na retração por secagem, na resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral, no módulo de deformação e na fluência.

São também mostrados e discutidos resultados da técnica de microestrutura, microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As principais conclusões e as sugestões para novos estudos na linha de pesquisa são apresentadas no Capítulo 5. Por fim, se encerra o trabalho mostrando as referências bibliográficas.

No Apêndice A, constam a caracterização dos materiais constituintes dos concretos e argamassas empregados no estudo e no Apêndice B, os resultados individuais dos ensaios realizados.

## **2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - VARIAÇÕES VOLUMÉTRICAS EM MEIOS CIMENTÍCIOS**

São diversos os tipos e mecanismos de deformação que podem ser observados nas pastas, argamassas e concretos, ainda mais quando se trata das deformações nas idades iniciais. No entanto, na literatura técnica não há consenso no que se refere a terminologia e classificação sobre o tema. Pode-se encontrar um mesmo fenômeno designado por diferentes termos ou um mesmo termo para designar diferentes fenômenos, assim como alguns termos, não apresentam definição consistente com a literatura convencional, usada para os sistemas cimentícios. Por exemplo, há uma confusão de conceito entre os termos contração *Le Chatelier* e retração química, assim como há ainda uma variedade de definições para descrever a retração autógena, a deformação autógena e a autodessecação. Silva (2007) e Lopes (2011) apresentam uma discussão aprofundada sobre as diversas terminologias, definições e classificações de alguns pesquisadores, deixando evidente a falta de consenso sobre o assunto.

No presente estudo, a classificação e a terminologia para as variações volumétricas em sistemas de materiais cimentícios adotada é a proposta por Silva (2007) em sua tese de doutoramento. A pesquisadora apresentou uma proposta de classificação considerando:

- a) Escala de tempo;
- b) Escala de tamanho; e
- c) Conceitos da termodinâmica.

Para o entendimento da classificação e terminologia a ser adotada no presente trabalho é suficiente apresentar, a seguir, a discussão considerando os conceitos da termodinâmica. Para o entendimento da classificação que propõe considerar escala de tamanho e escala de tempo recomenda-se consultar o trabalho de Silva (2007).

Nos conceitos da termodinâmica, o universo é separado em duas partes: o sistema e o meio externo. O sistema é toda quantidade definida de matéria do universo que se tem interesse especial, enquanto que o meio externo é a parte do universo próxima ao sistema



(vizinhança) que interage com o mesmo e onde se faz as observações. O sistema e o meio externo são separados por uma superfície denominada de fronteira, que pode ser real ou imaginária (COSTA, 1974). As características da fronteira determinam o tipo de sistema. O sistema é denominado *aberto* quando a fronteira permite que massa e energia sejam trocadas entre o sistema e a vizinhança. Quando somente energia é trocada mas existe conservação de massa, o sistema é denominado *fechado*. Quando a fronteira não permite que nem massa nem energia sejam trocados entre o sistema e a vizinhança, o sistema é denominado *isolado*. A Figura 4 mostra uma representação esquemática dos três tipos de sistemas possíveis (SILVA, 2007).

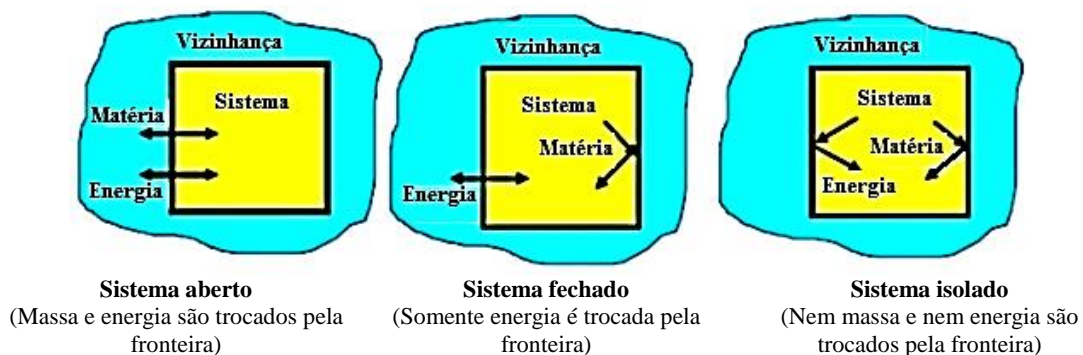


Figura 4 - Tipos de sistemas segundo os conceitos de termodinâmica (SILVA, 2007)

Num sistema isolado há conservação de massa e da energia interna do sistema, ou seja, não há variação de massa ( $\Delta M = 0$ ) e nem variação da energia interna ( $\Delta U = 0$ ), embora possa ocorrer transformação de energia, por exemplo, potencial química (causa retração autógena) em energia térmica (causa deformação térmica). Se há conservação de energia ( $\Delta U = 0$ ), significa também que não há variação de trabalho ( $\Delta W = 0$ ). Assim, em sistemas isolados, só podem ocorrer deformações cujos mecanismos atendem as condições de variações de massa, de energia interna e de trabalho nulas ( $\Delta M = 0$ ,  $\Delta U = 0$  e  $\Delta W = 0$ ). Silva (2007) em sua proposta classifica essas deformações de *autógenas*. Por outro lado, nos sistemas abertos ( $\Delta M \neq 0$ ,  $\Delta U \neq 0$  e  $\Delta W \neq 0$ ) e fechados ( $\Delta M = 0$ ,  $\Delta U \neq 0$  e  $\Delta W \neq 0$ ) além das deformações autógenas, podem ocorrer deformações cujos os mecanismos estejam envolvidos variação de massa (troca de umidade com o meio externo, por exemplo) e/ou variação de energia interna e de trabalho (aquecimento oriundo do meio externo, por exemplo) que são classificadas pela autora como deformações *não autógenas*. A Figura 5 mostra um resumo esquemático da possibilidade de ocorrência das deformações em função dos tipos de sistemas.

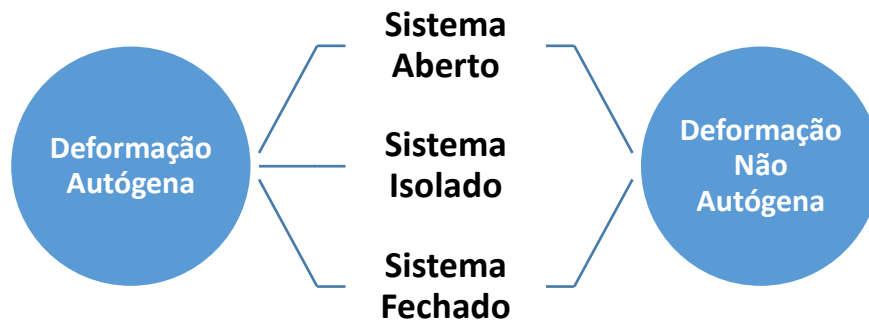


Figura 5 - Resumo esquemático da proposta de Silva (2007) para a ocorrência das deformações autógenas e não autógenas em função do tipo de sistema.

As deformações autógenas são classificadas em três grupos:

- a) volumétricas químicas, devido ao balanço volumétrico das reações de hidratação,
- b) térmicas, devido à liberação do calor de hidratação do cimento;
- c) de degradação, devido à ação de agentes internos (reação álcali-sílica, CaO e MgO livres, formação de etringita secundária, com fonte interna de  $\text{SO}_4^{2-}$ ).

As deformações não autógenas também podem ser classificadas em três grupos, em função da variação de:

- a) massa;
- b) calor;
- c) trabalho.

As deformações não autógenas devido à variação de massa podem ser do tipo contração e retração por secagem, dependendo do estado do material: suspensão ou sólido, respectivamente, podendo ainda ser resultado de mecanismos de degradação devido à ação de agentes externos. A contração e a retração por secagem são geradas por evaporação ou sucção de água. A reação expansiva de degradação pode ser devido à formação de etringita secundária, retração por carbonatação, formação de Mg-S-H, ataque de microrganismos e reação álcali-sílica, apenas destacando que a origem do

agente deve sempre ser externo. As deformações não autógenas devido à variação de calor são chamadas de deformações térmicas, resultantes de aquecimento devido a fontes externas de calor. Por fim, a variação de trabalho resulta em deformações não autógenas denominadas de viscoplásticas, no estado de suspensão e de deformações elásticas, plásticas e por fluência, no estado sólido (SILVA, 2007).

A Figura 6 apresenta a proposta de Silva (2007) para a classificação das deformações autógenas e não autógenas nos sistemas cimentícios.

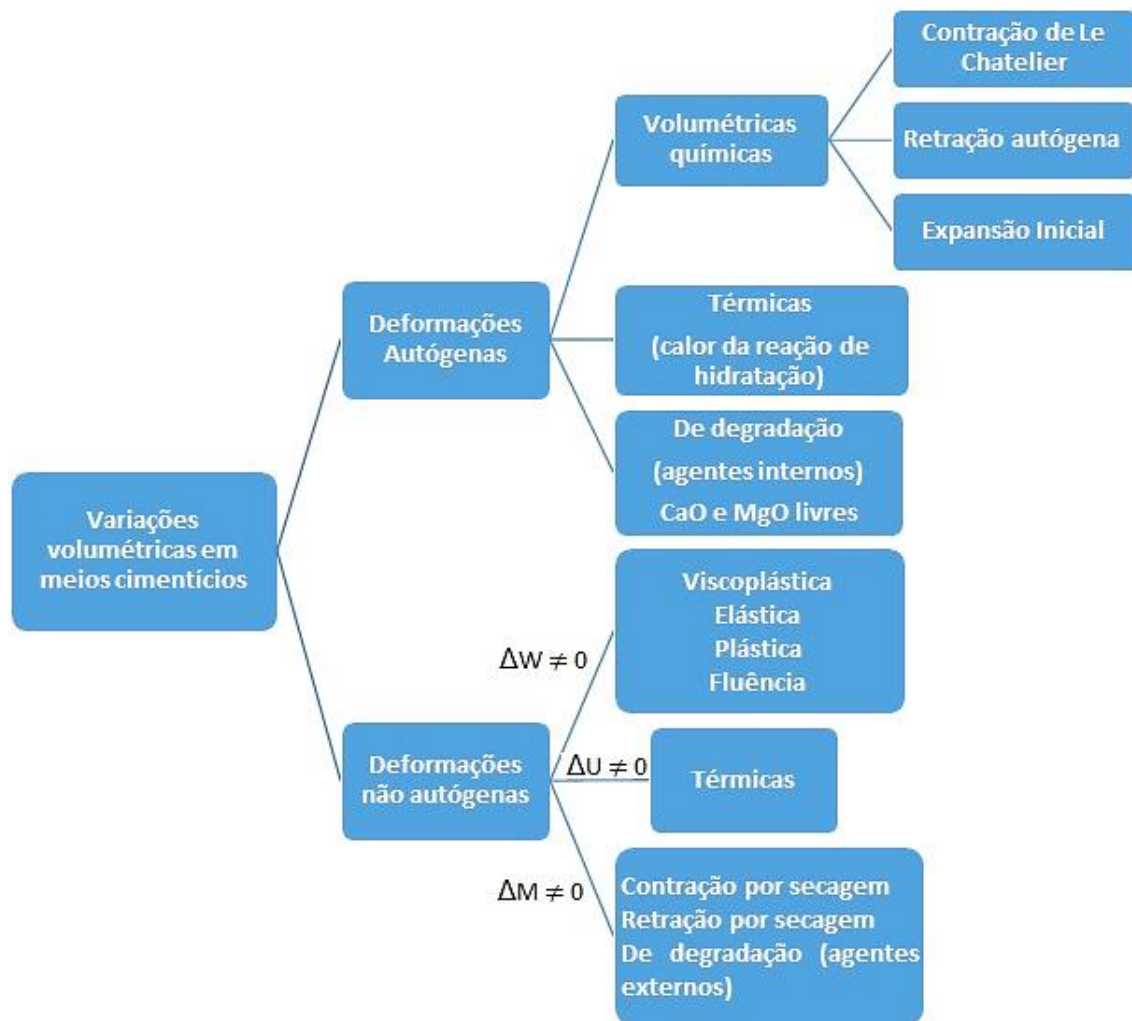


Figura 6 – Representação esquemática da classificação das deformações volumétricas em meios cimentícios proposta por Silva (2007).

O presente trabalho se buscou estudar o efeito combinado de um Polímero Superabsorvente e de nano partículas de sílica na mitigação da retração autógena, nas propriedades mecânicas e na fluência de concretos de alto desempenho. Desse modo,

apresenta-se a seguir uma discussão sobre as deformações autógenas volumétricas químicas. A fluência (deformação não autógena) será discutida no item 2.5.

### **2.1.1 - Deformações autógenas volumétricas químicas**

As deformações autógenas volumétricas químicas são consequência do balanço das reações de hidratação do material cimentício e sua classificação depende do estado do material. Quando o material ainda é uma suspensão, ocorre a Contração de *Le Chatelier*. Ao se tornar sólido, ocorrem a expansão inicial e a retração autógena

#### **2.1.1.1 - Contração Le Chatelier**

É a redução inicial do volume da pasta que ocorre nos primeiros estágios da hidratação do cimento. O fenômeno se dá devido ao fato de que o volume dos produtos do cimento hidratado é menor do que a soma dos volumes do cimento anidro mais o volume da água usada na mistura. *Le Chatelier*, em 1900, foi quem fez a primeira avaliação experimental da redução de volume causada pela hidratação (BOIVIN et al., 1999).

A contração de *Le Chatelier* é também conhecida no meio técnico e acadêmico como retração química. No entanto, esse termo não parece adequado, uma vez que quando o fenômeno ocorre o material ainda se comporta como uma suspensão e não oferece restrição a redução volumétrica da pasta, não surgindo tensão e muito menos fissuração no material. Assim sendo, o termo ‘contração’ é mais adequado, para diferenciar da terminologia ‘retração’, que está sendo empregada quando o material apresenta uma rigidez suficiente para se opor às variações de volume, gerando tensões e podendo apresentar fissuração (SILVA, 2007; LOPES, 2011).

#### **2.1.1.2 - Expansão inicial**

*Le Chatelier*, em seus experimentos sobre retração realizados em 1900, também observou que, além da contração química, a pasta de cimento apresentava uma expansão quando estava submetida a cura submersa em água (LURA, 2003; ESTEVES, 2009). L’Hermite (1960) *apud* Neville (1997) encontrou valores de expansão em pastas de cimento com cura submersa que variou de 1300 a 2200 $\mu$ m/m, aos 100 e 2000 dias de idade respectivamente. A expansão do concreto é consideravelmente menor, L’Hermite cita

valores de 100 a 150 $\mu\text{m}/\text{m}$  para um concreto curado sob água e consumo de cimento igual a 300  $\text{kg}/\text{m}^3$  (NEVILLE, 1997).

Normalmente a expansão inicial tem início após a transição suspensão-sólido, podendo durar até cerca de duas semanas. Após esse período, a expansão ainda continua acontecendo, porém em magnitude bem menor, de modo que no balanço geral (expansão e retração) predomina a retração autógena (SILVA, 2007).

Segundo Powers (1935) a expansão ocorre devido ao fato de que na pasta endurecida curada em condições saturada, não se desenvolve pressão capilar para se opor à expansão das fases sólidas. No entanto, outros mecanismos têm sido mencionados para explicar a expansão inicial, sendo o mais consistente atualmente o baseado no crescimento de cristais de hidróxido de cálcio e de trissulfo-aluminato de cálcio (etringita) durante as reações de hidratação (LURA, 2003; SILVA, 2007; ESTEVES, 2009). Outros menos aceitos, são sugeridos para explicar esta expansão como: i) reabsorção da água de exsudação (LURA, 2003), e ii) formação do 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, desenvolvendo-se com um aumento de volume de sólido, ao contrário do C-S-H externo (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

### **2.1.1.3 - Retração Autógena**

Retração autógena é a redução volumétrica do sistema cimentício, após a transição suspensão-sólido, sem perda de água para o ambiente externo, desconsiderando as deformações térmicas e sem atuação de carregamento. As primeiras observações de retração autógena em pastas de cimento são do início do século XX. Jensen e Hansen (2001) citam as contribuições de *Le Chatelier* no ano de 1900, *Jesser* em 1927 e *Neville e Jones*, em 1928. No entanto, *Lynam*, em 1934, foi o primeiro a usar a denominação retração autógena (JENSEN e HANSEN, 2001).

A retração autógena ocorre devido à redução da água livre nos poros, a qual migra para participar das reações de hidratação, bem como para adsorver-se na superfície dos recém-formados cristais de C-S-H. Assim, nos capilares parcialmente cheios de água, são formados meniscos para equilibrar a diferença de pressão entre a região ar-água, cuja

tensão superficial induz a retração da pasta. Este fenômeno é conhecido como auto-secagem ou autodessecação (SILVA, 2007).

Na retração autógena, quanto menores os poros, maiores são as tensões na fase líquida do menisco capilar e, conseqüentemente, maior é a redução volumétrica. Assim, quanto mais refinada a microestrutura da pasta, maior é a retração autógena, a qual é desprezível para concretos de resistência normal, mas pode ser da mesma magnitude da retração por secagem em concretos de alta resistência (CEB/FIP, 1991).

### **2.1.2 - Mecanismos da Retração Autógena**

Sabe-se que existe uma forte relação entre a diminuição da umidade relativa no interior dos poros dos meios cimentícios e a retração autógena. No entanto, os mecanismos que conduzem à retração autógena ainda causam controvérsias entre os estudiosos do tema. Os mecanismos mais aceitos para explicar a retração autógena são: i) variação da depressão capilar, ii) variação de tensão de superfície de partículas coloidais e iii) variação da pressão de disjunção (HUA et al., 1995)

#### **2.1.2.1 - Variação da depressão capilar**

A depressão capilar é vista como o fenômeno mais importante para explicar o mecanismo da autodessecação. Encontra-se, porém, abordagens diferentes ao analisar a variação da depressão capilar como um modelo de base para descrever a autodessecação (HUA *et al.*, 1995; LURA *et al.* 2003).

A tensão capilar gera nos poros parcialmente cheios, uma superfície curva (menisco) na interface entre o fluído (água dos poros) e ar, que está esquematicamente representado na Figura 7.

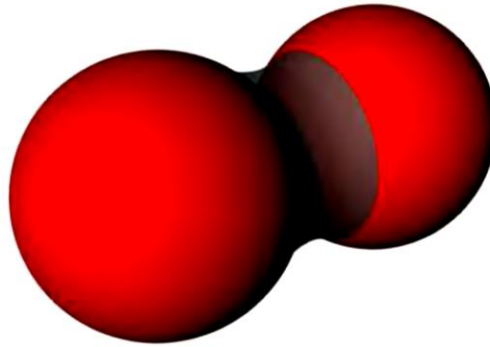


Figura 7 - Menisco formado entre dois sólidos esféricos devido a tensão capilar (ESTEVEVES, 2011)

O princípio da tensão capilar é explicado pelas equações de Young-Laplace<sup>3</sup> e Kelvin. A Lei de Young-Laplace relaciona a tensão (ou gradiente de pressão capilar,  $\Delta P_c$ ) formado na interface líquido-vapor com a tensão superficial da água ( $\sigma$ ), os raios de curvatura ( $r_i$ ) e o ângulo de contato ( $\theta$ ), como é mostrado na equação (1) e representado esquematicamente na Figura 8.

$$\Delta P_c = \sigma \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot \cos\theta \quad (1)$$

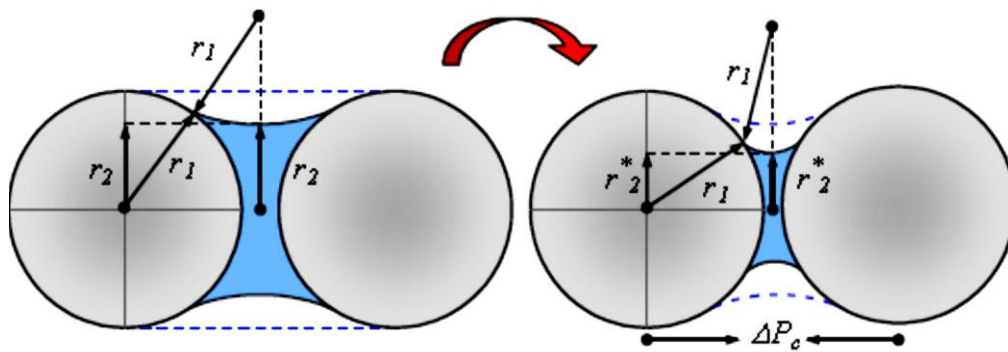


Figura 8 - Representação esquemática da equação de Young-Laplace, para o caso de um menisco formado entre duas superfícies esféricas (ESPING, 2007)

No caso de condutores cilíndricos ou esféricos,  $r_1 = r_2$ , logo a equação de Young-Laplace pode ser simplificada a:

<sup>3</sup> A equação é nomeada Young-Laplace em homenagem a Thomas Young, que desenvolveu a teoria qualitativa da tensão superficial em 1805, e Pierre-Simon Laplace que completou a descrição em 1806. Muitas vezes é chamada apenas de Lei de Laplace

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos\theta \quad (2)$$

Kelvin relaciona o gradiente de pressão capilar ( $\Delta P_c$ ) com a umidade relativa pela equação:

$$\Delta P_c = -\frac{RT\rho}{Vm} \cdot \ln(UR) \quad (3)$$

Onde,

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

T = temperatura (K)

$\rho$  = massa específica do líquido

$V_m$  = volume molar do líquido (m<sup>3</sup>/mol)

UR = umidade relativa (%)

As equações de Young-Laplace e Kelvin podem ser combinadas, originando uma relação entre o raio do poro, e a umidade relativa:

$$\frac{2\sigma}{r} \cdot \cos\theta = -\frac{RT\rho}{Vm} \cdot \ln(UR) \quad (4)$$

$$r = -\frac{2\sigma \cdot Vm \cdot \cos\theta}{RT\rho \cdot \ln(UR)} \quad (5)$$

De acordo com a lei de Kelvin e Young-Laplace, à medida que a autodessecação avança, os poros se esvaziam sucessivamente, dos de maior diâmetro para os de menor diâmetro. Num estado de equilíbrio, em uma dada umidade relativa, existe um raio de poro de dimensão  $r$  limite, que separa todos os poros em dois grupos, acima de  $r$  estão todos os poros vazios e abaixo de  $r$  estão todos os poros preenchidos com água.



O consumo da água no interior dos poros da pasta de cimento pelas reações de hidratação, provoca uma diminuição do raio dos meniscos até a umidade de equilíbrio, ao mesmo tempo cresce a depressão capilar, que é então equilibrada por uma retração da pasta.

A Figura 9 mostra a relação entre a umidade relativa e o raio do poro e desse último com a tensão capilar (ASSMANN, 2013).

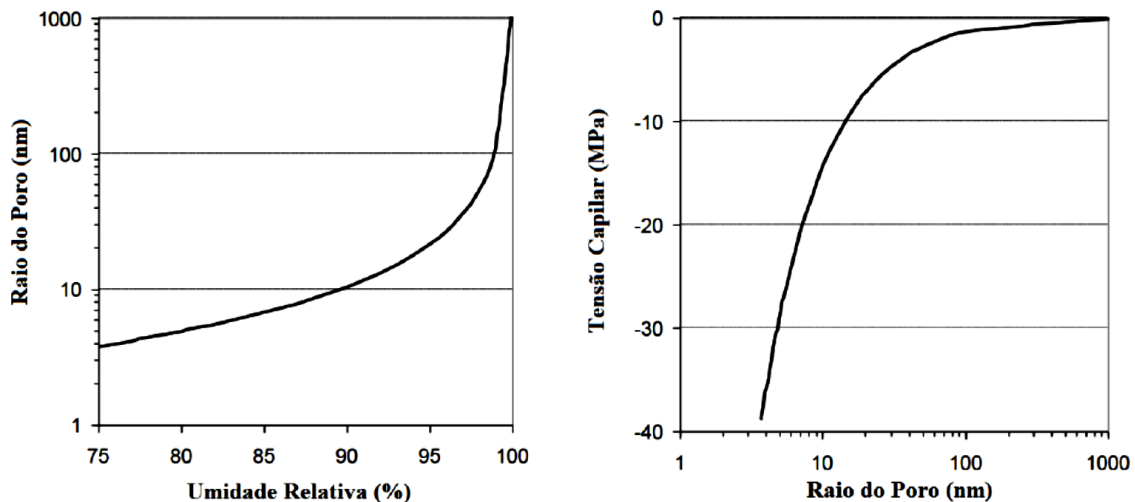


Figura 9 - Raio de poro como função da umidade relativa (à direita) e tensão capilar como função do raio do poro (à esquerda) (ASSMANN, 2013)

Observa-se que, quanto menor a umidade relativa, menor a dimensão do poro onde se forma o menisco e, por consequência, maior a tensão sobre as paredes dos capilares, tendendo a aproximá-las. A retração macroscópica observável é proveniente desse mecanismo (SILVA, 2007).

A maior crítica ao modelo deve-se ao fato de que as leis de Kelvin e Young-Laplace são leis macroscópicas e o fenômeno de retração se dá também em escala microscópica (HUA, 1995). Hua et al. (1995) determinaram como limite inferior para que as leis de Kelvin e Young-Laplace possam ser utilizadas para avaliar a retração, o raio de curvatura do menisco de 50 Å. Segundo os autores, isso significa que essas leis macroscópicas são válidas para uma umidade relativa acima de 80% no interior dos poros. Exatamente nessa faixa de umidade relativa (100% - 80%) que a hidratação se processa sob condições seladas e, portanto, pode ocorrer a autodessecação.

### 2.1.2.2 - Variação da tensão superficial ou energia de superfície de partículas coloidais

As forças atrativas entre duas moléculas são significantes até uma distância de separação ( $d$ ), que denominamos de alcance molecular. Normalmente esse alcance molecular é aproximadamente  $10^{-7}$ cm. Considere um líquido em equilíbrio com seu vapor, a resultante das forças atrativas sobre uma molécula qualquer no interior do líquido é, em média, nula, isso porque a molécula é atraída em todas as direções pelas moléculas vizinhas. Por outro lado, uma molécula situada na interface vapor-líquido sofre somente atrações laterais e inferiores. A Figura 10 ilustra as situações descritas. Esse desequilíbrio de forças de atração faz com que exista uma forte tendência de as moléculas que se localizam na interface das duas fases de serem puxadas para o interior do líquido e, por isso, a superfície do líquido tende a se contrair espontaneamente nesta direção. É por esta razão que os líquidos vão ajustar sua forma para expor uma superfície mínima.

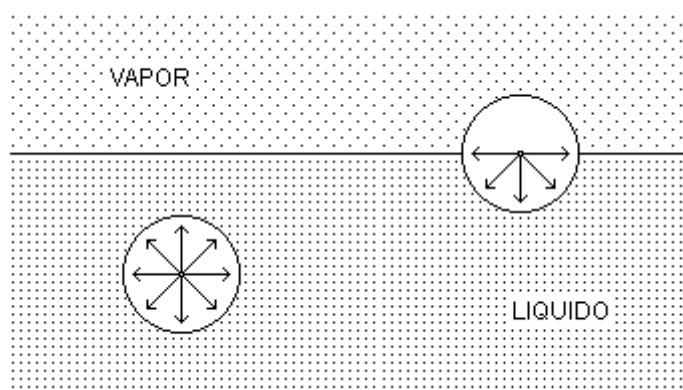


Figura 10 - Ilustração de uma molécula no interior e na superfície do líquido

A tensão superficial de um determinado material depende da sua vizinhança, ela é máxima se a superfície se encontra no vácuo e é nula se a superfície está em contato com o mesmo material (POWERS, 1968). Normalmente, a adsorção de átomos ou de moléculas por uma superfície sólida resulta numa redução da tensão superficial. Por outro lado, a dessorção significa elevação da tensão superficial, causando compressão no sólido, podendo se manifestar, em escala macroscópica, como retração (HUA et al., 1995). Resumidamente, a adsorção de água representa redução da tensão superficial e provoca a expansão, enquanto que a dessorção de água aumenta a tensão superficial e provoca retração (SILVA, 2007; MELO NETO, 2008;).

A pasta de cimento hidratada apresenta uma grande área específica, da ordem de 250 m<sup>2</sup>/g (POWERS, 1965), significando uma estrutura muito porosa que, ao interagir com a água, favorece a formação de inúmeras interfaces líquido-ar. Quando a umidade relativa diminui, a tensão superficial aumenta podendo gerar tensões de compressão muito elevadas, da ordem de 250MPa (WITTMANN, 1968 *apud* SILVA, 2007). Para esse nível de tensão, as variações volumétricas são apreciáveis.

Segundo POWERS (1965) o fenômeno da tensão superficial explica parcialmente o mecanismo da retração, pois atua somente no sólido e apenas indiretamente em todo o corpo poroso. Além disso, as variações na tensão de superfície dos sólidos devido à adsorção de moléculas de água são significativas apenas nas três primeiras camadas adsorvidas. As camadas mais externas estão ligadas por forças fracas e sua influência sobre a tensão superficial é desprezível. Entretanto, o fenômeno da tensão superficial mostrou validade experimental para pastas de cimento para umidades relativas de até 40% (BASTOS, 2001; SILVA 2007). Nesse sentido, Jensen (1995) afirma que a umidade relativa dos sistemas cimentícios não atinge valores inferiores a 75%, portanto conclui que a tensão superficial não tem grande importância no que se refere a ocorrência da retração autógena.

### **2.1.2.3 - Pressão de disjunção ou pressão de desligamento**

Segundo Baroghel-Bouny (1994), na presença de duas superfícies hidrófilas de mesma natureza, como é o caso do C-S-H, separadas por uma fina camada de moléculas de água, atuam forças de Van der Waals (atrativas), forças eletrostáticas (repulsivas) e as interações estéricas (forças repulsivas). Bastos (2001) afirma que a resultante dessas forças é, geralmente, repulsiva e chama-se pressão de desligamento (BASTOS, 2001; MELO NETO, 2008) ou pressão de disjunção (SILVA, 2007; LOPES, 2011)

A pressão de desligamento está relacionada com a presença de água adsorvida entre duas superfícies sólidas extremamente próximas. A distância entre essas duas superfícies varia com a quantidade de moléculas de água entre elas, ou seja, para uma certa temperatura, a espessura da camada de água adsorvida depende da umidade relativa. Se a umidade relativa aumenta, o acréscimo de água adsorvida tende a separar as superfícies, provocando uma expansão da estrutura sólida. Quando o filme de água é extraído, a

pressão de desligamento diminui, ocorrendo uma aproximação das superfícies sólidas e, por consequência, uma retração do material.

O modelo proposto por Feldman e Sereda (1970) para descrever a estrutura do C-S-H, pode ser usado para ilustrar o mecanismo de variação da pressão de desligamento e o movimento de água adsorvida, como mostra a Figura 11.

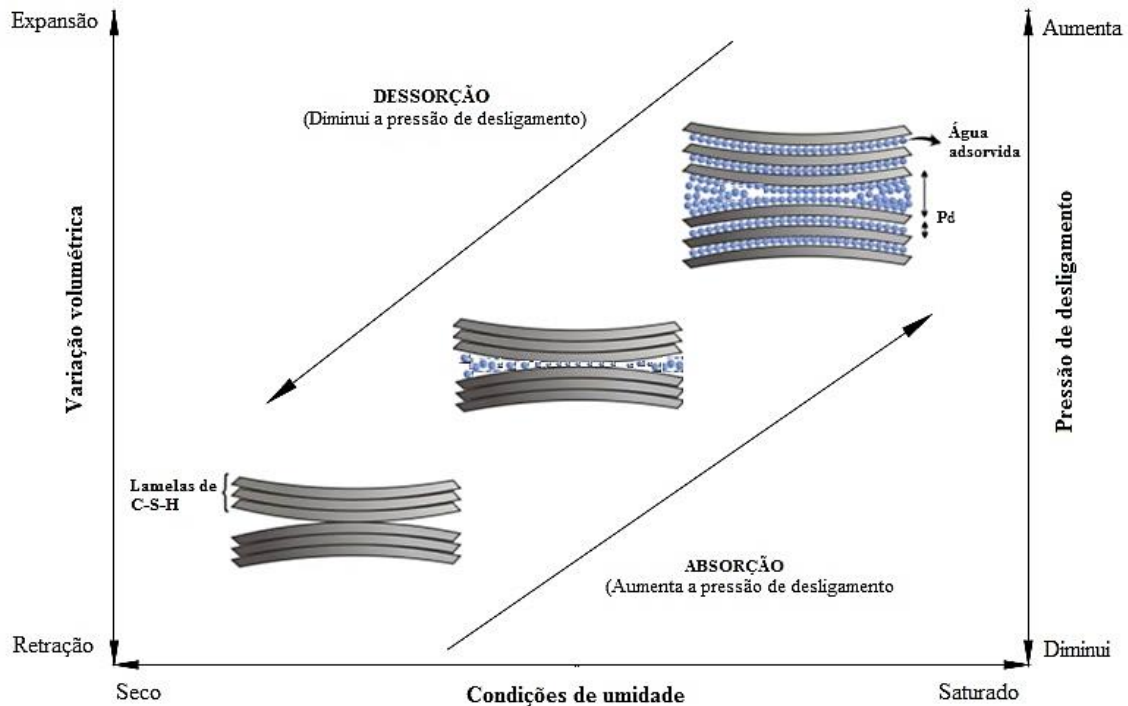


Figura 11 - Movimento de entrada e saída de água entre as lamelas no modelo proposto por Feldman e Sereda (1970) para o C-S-H

### 2.1.3 - Fatores que afetam a retração autógena

A evolução da retração autógena ao longo do tempo está diretamente relacionada com a cinética das reações de hidratação do cimento. Desse modo, espera-se que os mesmos fatores que interferem na evolução da resistência do concreto (relação a/c, tipo e finura do cimento) também influenciam o desenvolvimento da retração autógena. As adições minerais que colaboram para um melhor refinamento da microestrutura da pasta, como por exemplo a sílica ativa, também contribuem para o aumento da retração autógena nos meios cimentícios com estas adições. Em relação ao tipo de material, para uma mesma relação água/cimento, pastas apresentam maior retração autógena do que argamassas que por sua vez apresentam valores maiores do que os concretos.

### 2.1.3.1 - Relação água/cimento

Vários estudos têm demonstrado que a redução da relação água/cimento representa um aumento na retração autógena (KUM, 2009; ORDÓÑEZ, 2013; MANZANO, 2016), como mostra a Figura 12 (HOLT, 2005).

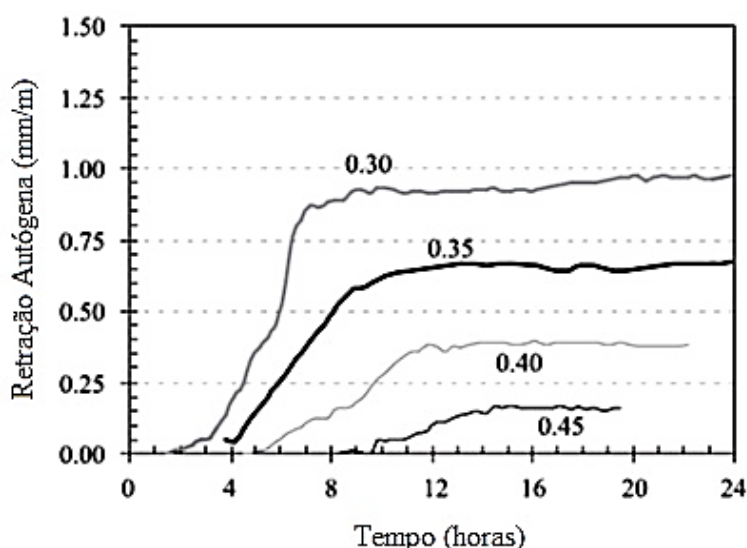


Figura 12 - Resultados de retração autógena para misturas com diferentes relações água/cimento, em função da idade (HOLT, 2005)

O aumento da retração autógena com a diminuição da relação água/cimento pode ser explicado pelo aumento da tensão capilar da água dos poros, devido a redução da umidade relativa. Buil (1990) *apud* Boivin (2001), demonstrou por meio da Lei de Kelvin e Young-Laplace, que a redução da relação água/cimento de 0,40 para 0,30 representa, em pastas com 20 dias de idade, uma queda na umidade relativa de 95% para 88% e, conseqüentemente, um aumento da depressão capilar de duas vezes e meia (6,9 para 17,3MPa), o que provoca aumento na retração autógena. A Tabela 1 mostra essa comparação.

Tabela 1 - Comparação entre pastas com dois valores de relação água/material cimentante, umidade relativa (UR), raio do poro (r) e a depressão capilar ( $\Delta P$ ), com 20 dias de idade (BUIL, 1990 *apud* BOIVIN, 2001)

Relação água/material cimentante	UR (%)	r (Å)	$\Delta P$ (MPa)
0,4	95	210	6,9
0,3	88	84	17,3

### 2.1.3.2 - Tipo de cimento e adições

A finura do cimento, a composição do clínquer e a presença de adições minerais influenciam a retração autógena.

Bentz et al. (2001) avaliaram a retração autógena de cimentos com diversas finuras e observaram que cimentos mais finos apresentam maior retração autógena como mostra a Figura 13.

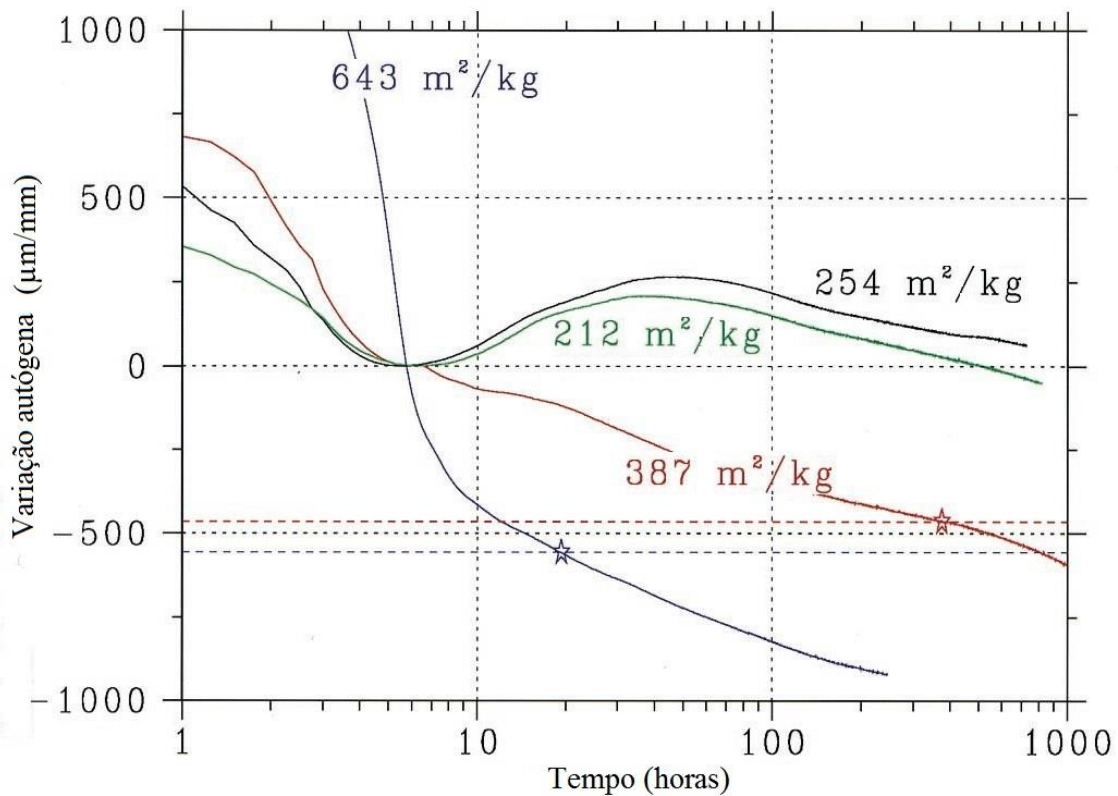


Figura 13 - Variação Autógena em função da finura do cimento (BENTZ et al. 2001).

Para uma mesma idade e uma mesma relação a/c, um cimento mais fino proporciona uma rede porosa mais fina e a intensidade de variação capilar é possivelmente maior, contribuindo para um incremento na retração autógena (SILVA, 2007).

Em relação a composição do clínquer do cimento, não há consenso na literatura técnica sobre os efeitos dos principais compostos sobre a retração autógena. TAZAWA e MIYAZAWA (1999) observaram que cimentos Portland com maiores teores de  $\text{C}_2\text{S}$  e

com médio calor de hidratação proporcionam menor retração autógena que cimentos Portland comuns, enquanto que para cimentos com maiores teores de  $C_3A$ , mais intensa será a autodessecação. Essas observações não foram confirmadas por Jensen (2000) que estudou a influência dos compostos  $C_3S$ ,  $C_2S$  e  $C_3A$ , como substituição de 20% do cimento das pastas pelos compostos puros. O autor observou que o aumento nos teores de  $C_3S$  e  $C_2S$  apresentam pouca influência na retração autógena quando comparado com a significativa redução da retração quando do incremento do teor de  $C_3A$ , como está mostrado na Figura 14.

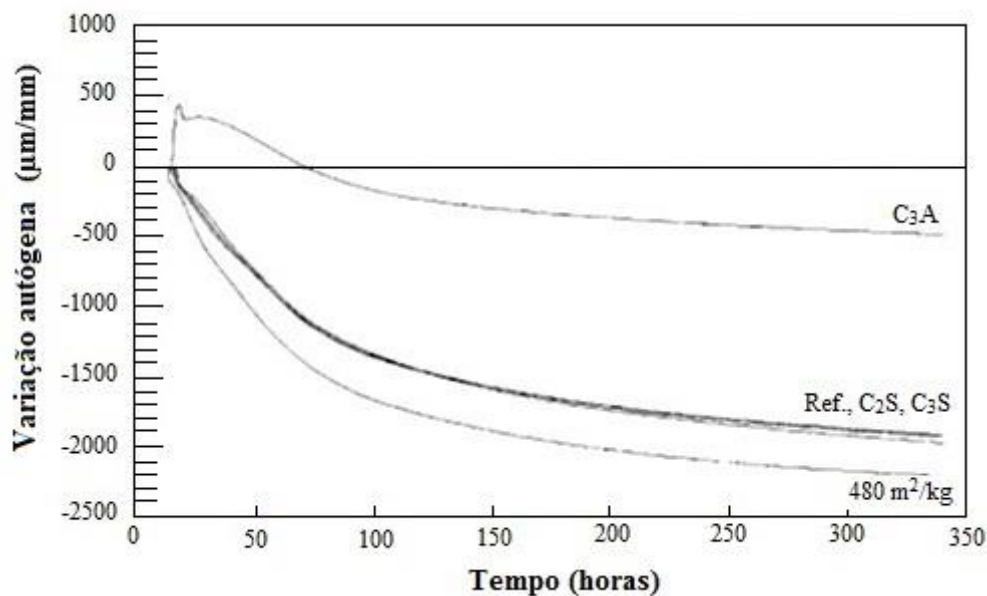


Figura 14 - Variação Autógena para cinco pastas de cimento com relação  $a/c = 0,30$  e substituições de  $C_3S$ ,  $C_2S$  e  $C_3A$  (JENSEN, 2000).

Os efeitos de cada composto do clínquer de cimento Portland e o seu grau de hidratação ainda é uma lacuna no estudo da retração autógena dos materiais cimentícios e, portanto, novos estudos devem ser desenvolvidos com o intuito de elucidar a questão.

No que se refere às adições minerais, cimentos com adições de sílica ativa dão origem a concretos mais susceptíveis à retração autógena, como mostra a Figura 15 (BROOKS et al.,1999).

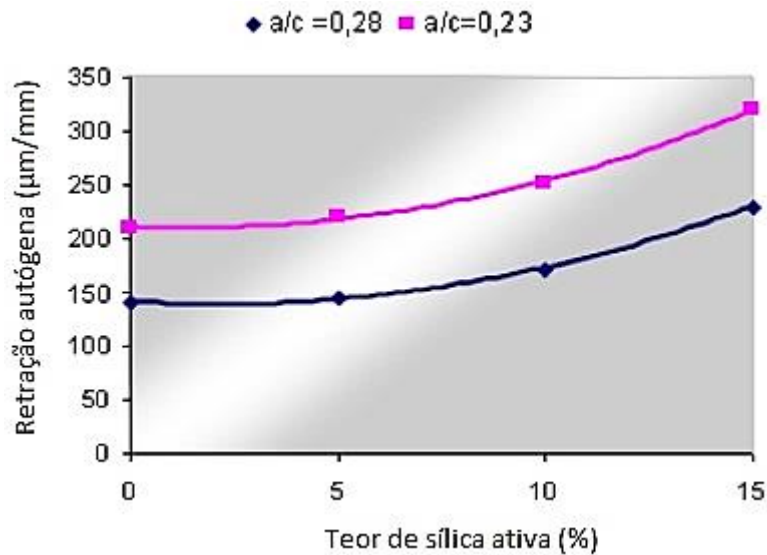


Figura 15 - Correlação entre retração autógena do concreto e o teor de sílica ativa aos 40 dias de idade (BROOKS et al., 1999)

CHAN et al. (1998) *apud* Silva (2007) notaram que a retração autógena aumentou à medida que se substituiu parte do cimento por escória de alto forno. Por outro lado, a incorporação de cinza volante levou a uma redução na retração autógena.

### 2.1.3.3 - Tipo de material

Para uma mesma relação água/cimento a pasta pura apresenta maior retração autógena do que a argamassa, que por sua vez apresenta maior retração autógena do que o concreto, como mostra a Figura 16 (HOLT, 2005).

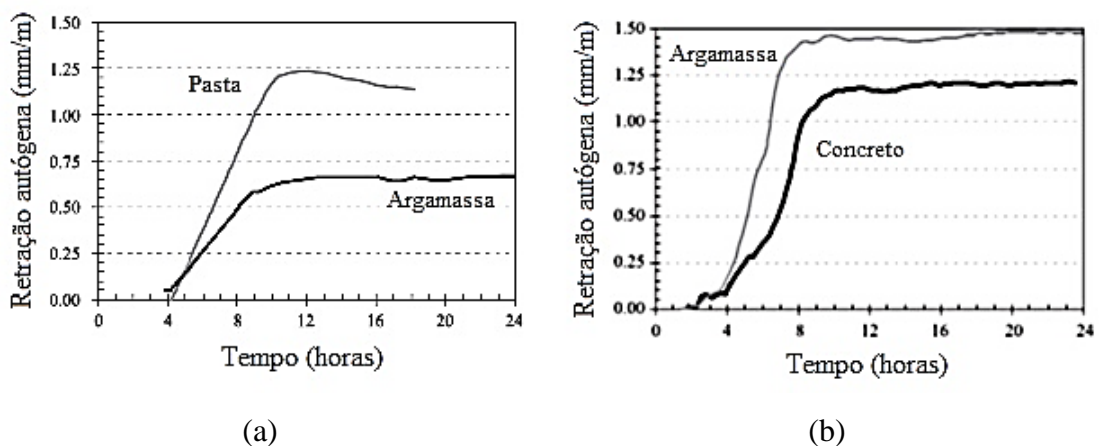


Figura 16 – Resultados de retração autógena em pastas e argamassa com relação  $a/c = 0,35$  (a) e em argamassa e concreto com relação  $a/c = 0,35$  (b) (HOLT, 2005)



O agregado presente na argamassa e concreto funciona como restrição para livre deformação da pasta. Daí a menor retração autógena em relação a pasta. A maior quantidade de agregado presente no concreto faz com que a retração do concreto seja menor do que a argamassa. Outra explicação para esse resultado se deve ao fato que o consumo de cimento da mistura de concreto é menor do que a argamassa, conseqüentemente, o volume de pasta menor presente no concreto ajuda a reduzir retração autógena (HOLT, 2005).

#### **2.1.4 - Soluções para Mitigação da Retração Autógena**

A retração autógena é uma característica intrínseca dos sistemas cimentícios e a sua ocorrência nos concretos chamados de alta resistência (CAR) podem levar ao surgimento de fissuras no concreto em baixas idades, resultando em prejuízos estéticos, econômicos, de desempenho e de durabilidade das estruturas. Desse modo, é necessário encontrar soluções para mitigar ou reduzir a retração autógena nos sistemas cimentícios, especialmente naqueles que apresentam alta resistência, baixa relação água/cimento ( $a/c < 0,40$ ), maior consumo de cimento e adição de sílica ativa.

BENTZ e JENSEN (2004) apresentam as seguintes sugestões como alternativa para combater a retração autógena: (i) o uso de materiais porosos, adicionados ao concreto, previamente saturados em água, para fornecer água aos capilares, à medida que ocorre o avanço das reações de hidratação (processo conhecido por cura interna); (ii) o uso de fibra de alto módulo, combatendo a retração autógena, por restrição mecânica; (iii) a modificação da composição mineralógica do cimento; (iv) o controle da finura do cimento; (v) a redução do volume de pastas; (vi) uso de aditivo químico compensador de retração, cujos agentes expansivos atuam aumentando o volume do concreto, para compensar a redução de volume causada pela retração; (vii) uso de aditivo químico redutor de retração, desenvolvido para diminuir a retração por secagem, também pode reduzir a retração autógena, uma vez que atua reduzindo a tensão superficial da água, reduzindo assim a tensão no capilar e (viii) uso combinado de mais de uma estratégia.

O uso de aditivos redutores de retração para mitigar a retração autógena foi estudado por Silva (2007) e Lopes (2011) que concluíram que concretos contendo 2% de aditivos redutores de retração (em relação à massa de cimento) apresentaram redução expressiva

(de 50 a 70% aos três dias de idade) na retração autógena livre em comparação com os respectivos concretos de referência, provocando uma diminuição do risco de fissuração. No entanto, desde o início dos anos 2000 uma outra técnica tem sido muito estudada como alternativa para a mitigação da retração autógena, trata-se do uso de polímero superabsorvente como agente de cura interna.

### **2.1.5 - Metodologias Para Determinação da Variação Autógena em Pastas, Argamassas e Concretos**

Em geral, as metodologias para determinação de variação autógena em pastas, argamassas e concretos têm empregado dois tipos diferentes de técnicas de medição das deformações. A primeira dessas técnicas determina a variação autógena por meio de medidas de deformação volumétrica, enquanto que a segunda determina a variação autógena através de medidas de deformação linear (JENSEN e HANSEN, 1995). De acordo com Hammer *et al.* (2002) o motivo pelo qual se tem interesse na determinação da variação autógena é o que define a forma de medição a ser adotada. Se o motivo for a compreensão do mecanismo da variação autógena, recomenda-se a escolha das medidas de deformação volumétrica. Se o motivo for conhecer a variação autógena para impedir a fissuração das pastas, argamassas ou concretos, é mais interessante a realização de medidas de deformação linear.

#### **2.1.5.1 - Determinação da variação autógena por meio de medidas de deformação volumétrica**

As metodologias que avaliam a variação autógena por meio das medidas de deformação volumétricas basicamente consistem em colocar no interior de uma membrana de borracha uma certa quantidade da amostra a ser ensaiada (pasta ou argamassa), submergir o conjunto (membrana mais pasta ou argamassa) em um líquido com temperatura constante e então determinar as variações de volume da amostra ao longo do tempo por meio da medida do líquido deslocado em um tubo capilar graduado ou por medida da variação do “empuxo” (princípio de *Archimedes*) numa balança hidrostática (LURA e JENSEN, 2007). A Figura 17 apresenta amostras típicas para ensaio de variação autógena por meio de medidas de deformação volumétrica, enquanto que a Figura 18 mostra um

conjunto de balança hidrostática com acessórios para realização do ensaio com base no princípio de *Archimedes* e sua representação esquemática.

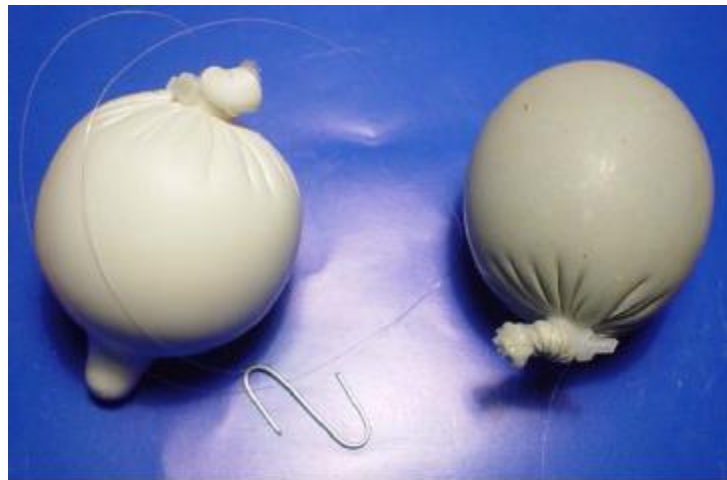


Figura 17- Membrana de poliuretano com reservatório (direita) e membrana de látex sem reservatório (esquerda), preenchidas com pasta de cimento para ensaio de variação autógena por medidas de deformação volumétrica (LURA e JENSEN, 2007)

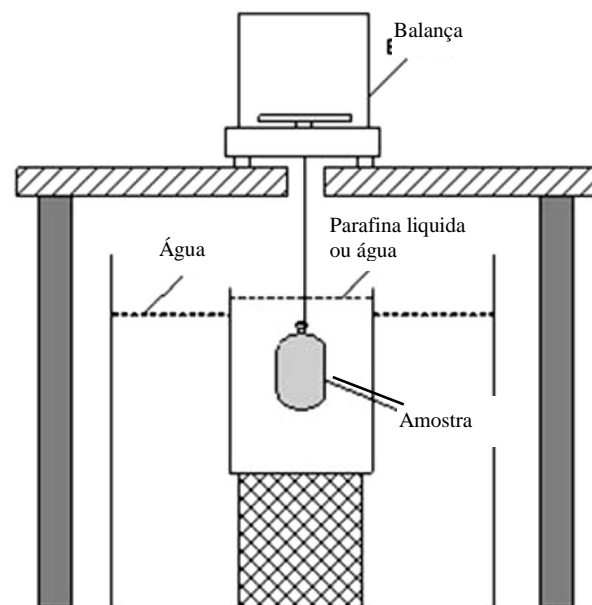
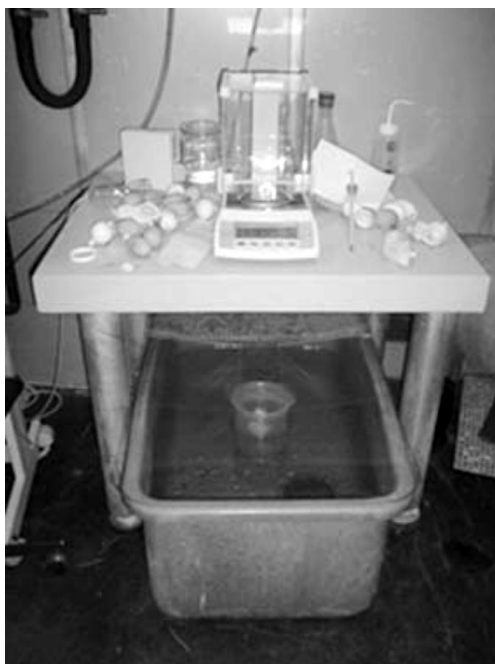


Figura 18 - Conjunto de balança hidrostática para determinação da variação autógena por meio do princípio de Archimedes e uma representação esquemática (LURA e JENSEN, 2007)

Jensen e Hansen (2001) consideram uma vantagem do método volumétrico a possibilidade de começar as medições imediatamente após a moldagem das amostras. No entanto, deve-se observar que essa vantagem pode levar a uma interpretação equivocada de resultados na determinação da retração autógena, uma vez que as medidas de retração autógena devem ser iniciadas no momento da transição suspensão/sólido (patamar de percolação). As medidas de deformação antes desse instante não resultam em tensões na amostra uma vez que o material ainda se encontra no estado fluido, assim sendo, não há que se falar em retração. Essas medidas, portanto, tratam-se de contração de *Le Chatelier* e se não forem descontadas, os resultados de retração autógena ficam superestimados (SILVA, 2007; LOPES, 2011).

Os resultados de retração autógena obtidos pelo método volumétrico são de 3 a 5 vezes maiores do que aqueles obtidos pelos métodos de medida linear (LURA e JENSEN, 2007). Uma razão fundamental para essa discrepância de resultados entre os dois métodos é o transporte de líquido através da membrana de borracha quando o fluido utilizado para imersão das amostras é água. 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 pode ser evitada pelo uso de parafina líquida como fluido para imersão da amostra (LURA e JENSEN, 2007). Acredita-se que outra razão para essa diferença de resultados entre as técnicas está relacionada ao que está sendo determinado com o procedimento adotado. Como discutido anteriormente, muitas vezes se mede não somente a retração autógena, mas a soma de autógena com a contração *Le Chatelier* (SILVA, 2007). Para evitar essa última situação, basta iniciar as medidas de deformação no momento da transição suspensão/sólido (patamar de percolação).

As metodologias que avaliam a variação autógena por meio das medidas de deformação volumétricas são aplicáveis em pastas e argamassas (LOUKILI *et al.*, 2000; LURA e JENSEN, 2007). A aplicação do método em concretos não é recomendada uma vez que a presença de agregados graúdos provavelmente poderia perfurar a membrana de borracha (LOUKILI *et al.*, 2000).

### **2.1.5.2 - Determinação da variação autógena por meio de medidas de deformação linear**

As metodologias de avaliação da variação autógena por meio de medidas de deformação linear são aplicáveis em pastas, argamassas e concretos. De uma maneira geral, consistem em moldar a amostra a ser ensaiada (pasta, argamassa ou concreto) em um molde rígido, forrado com algum material para reduzir o atrito, acoplando a um sistema de medição da deformação linear,

Em relação aos métodos de medidas de deformação linear, Jensen e Hansen (2001) relatam que a firme ancoragem nos pontos de medida do conjunto com a amostra é uma vantagem em relação aos métodos de medidas de deformação volumétrica. Por outro lado, os autores destacam que essa firme ancoragem só é obtida após o início de pega da amostra, não permitindo a realização de leituras logo após a moldagem. No entanto, como discutido anteriormente, do ponto de vista da retração autógena o início das leituras de deformação no momento do início da pega da amostra não se constitui um problema, uma vez que o início da retração autógena se dá a partir do patamar de percolação (momento da transição suspensão/sólido).

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 medição da deformação linear em seis grupos:

- a) Pinos embutidos nos corpos de prova como ilustrado na Figura 19;

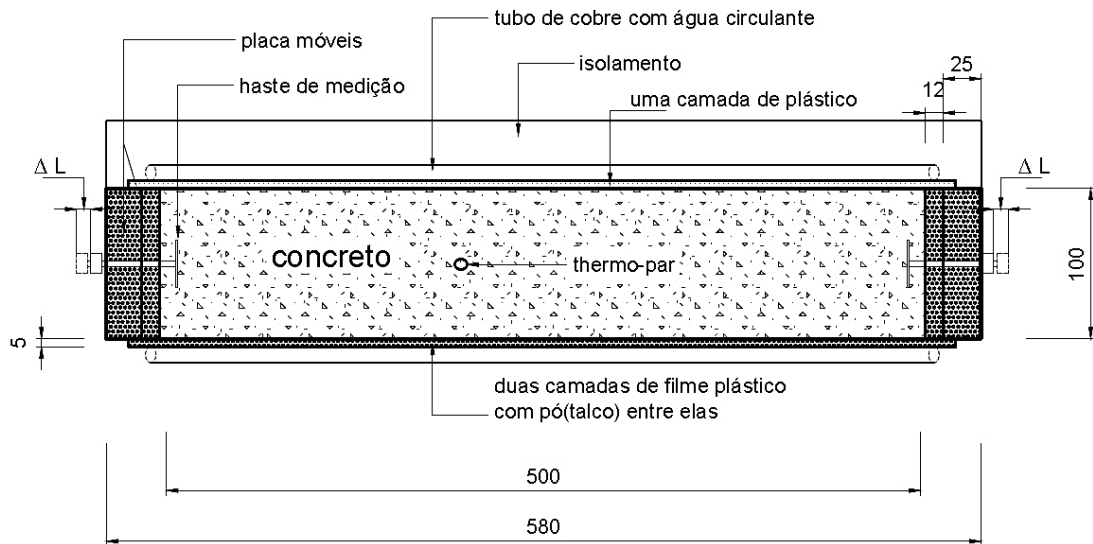


Figura 19 - Sistema de medição de deformação linear por meio de pinos embutidos em corpos de prova prismáticos de 100x100x500 mm (HAMMER et al., 2002)

b) Placas terminais removíveis como mostra a Figura 20;

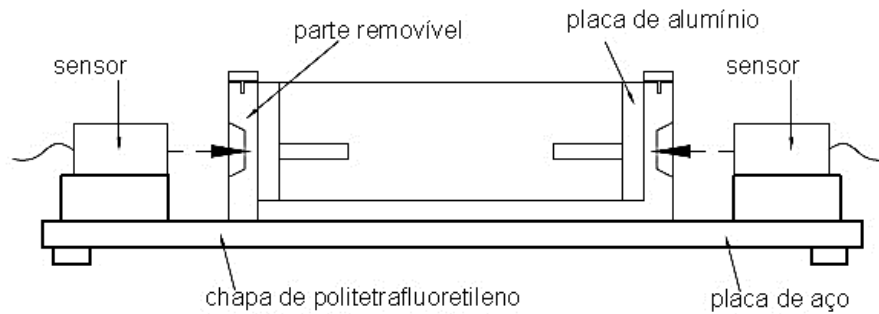


Figura 20 – Sistema de medida com placas terminais móveis em corpos de prova prismáticos de 40x40x10 mm (HAMMER et al., 2002)

c) Medição horizontal com LVDT por meio de chapas embutidas em corpos de prova prismáticos como está representado na Figura 21;

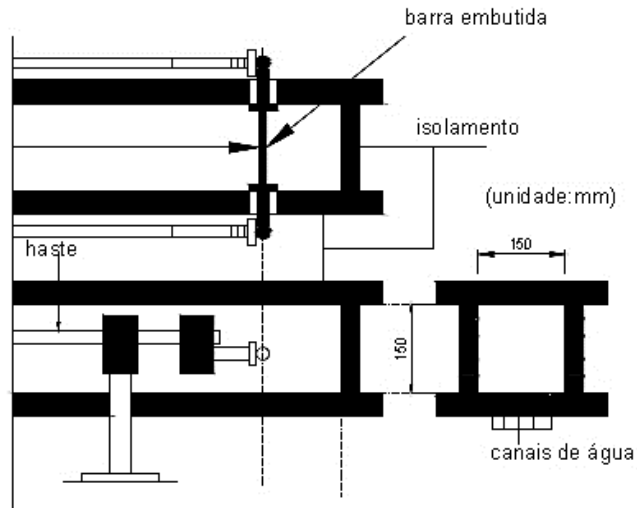


Figura 21 – Sistema de medida horizontal com LVDT em prismas de 150x150x500 mm (HAMMER et al., 2002)

d) Medição vertical com LVDT por meio de hastes embutidas em lajes como apresenta a Figura 22;

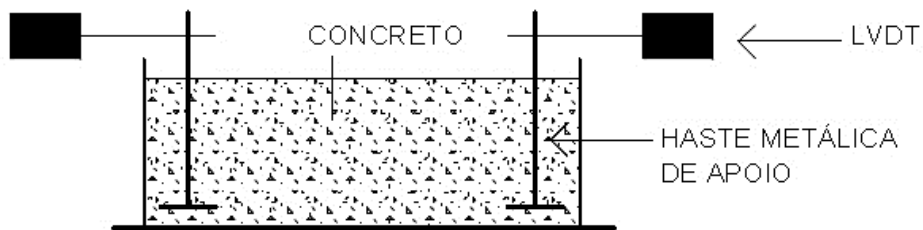


Figura 22 - Sistema de medição linear vertical com LVDT em lajes de 270x270x100mm (HAMMER et al., 2002)

e) Extensômetros elétricos embutidos como indica a Figura 23;

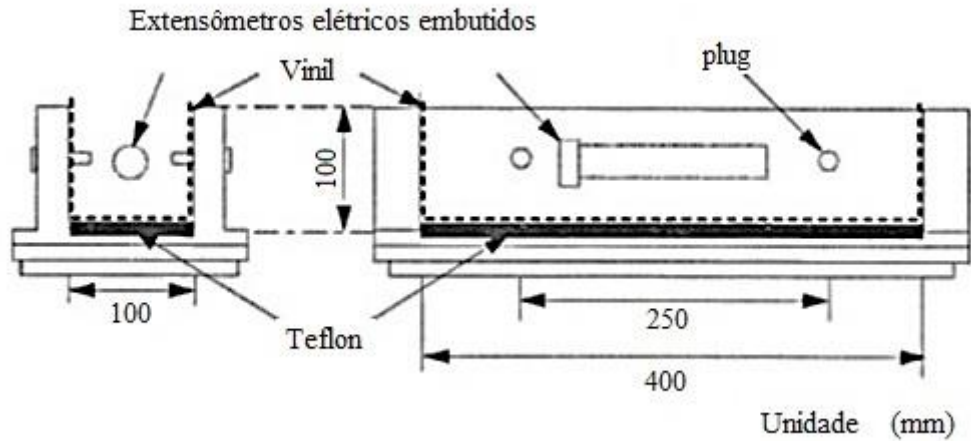


Figura 23 - Moldes e corpos de prova para os ensaios de retração realizados por KOJIMA et al. (2001)

- f) Pratos metálicos posicionados no topo de corpos de prova cilíndricos como mostra a Figura 24.

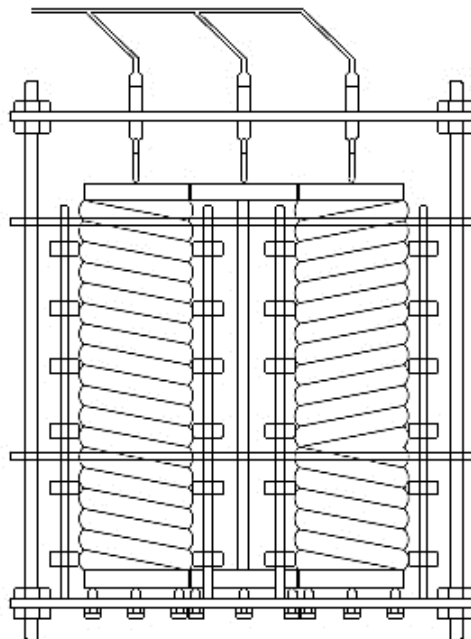


Figura 24 - Sistema de medida em tubos flexíveis 100 x 375mm. Medição linear vertical por meio de transdutores de deslocamento no topo (HAMMER et al., 2002)

Apesar da diversidade de metodologias propostas para determinação da variação autógena por meio de medidas de deformação linear, destacam-se a do Instituto Japonês do Concreto (TAZAWA e MIYAZAWA, 1999) e a do dilatômetro, desenvolvido por



Jensen e Hansen (1995) e posteriormente normatizado pela *American Society for Testing Materials* (ASTM)<sup>4</sup>.

O método proposto pelo Instituto Japonês do Concreto (TAZAWA e MIYAZAWA, 1999) vem sendo utilizado por vários pesquisadores (SILVA, 2007; ORDÓÑEZ, 2013; MANZANO, 2016; SANTOS, 2016), com algumas adaptações. A metodologia estabelece uma amostragem de no mínimo 03 corpos de prova, para cada situação de ensaio. Os corpos de prova são prismáticos, com largura e altura de pelo menos 3 vezes a dimensão máxima do agregado graúdo, no caso da determinação em concreto. O comprimento deve ser mais de 3,5 vezes a largura ou a altura. A forma deve ser de aço e rígida, com um orifício de 3 a 5 mm de diâmetro no centro das faces laterais, de menor dimensão, para encaixar os pinos metálicos (um em cada extremidade através do orifício), para leitura da distância inicial entre as extremidades dos pinos, antes da moldagem e, demais leituras, após o tempo de pega, usando relógios comparadores. A precisão dos relógios comparadores deve ser de milésimo de milímetro (0,001 mm). O fundo e as faces laterais dos moldes são previamente forrados, respectivamente, com folha de politetrafluoretileno e de poliestireno antes da moldagem, de modo a permitir a livre movimentação da amostra no interior do molde. Após a moldagem os corpos de prova (molde + amostra) são selados com filme plástico e fita adesiva com o objetivo de evitar a troca de umidade com o ambiente. O conjunto é então pesado e levado para sala com umidade ( $50 \pm 2\%$ ) e temperatura ( $21 \pm 2$  °C) controladas. A pesagem do molde preenchido tem o intuito de avaliar se houve perda de massa de água durante a realização do ensaio. As medidas da deformação devem começar a partir da transição suspensão/sólido (patamar de percolação), determinado pelo pulso ultrassônico, quando o material apresenta uma rigidez suficiente para se opor as variações de volume impostas pela pasta e também suporta a introdução dos eixos dos relógios comparadores nos pinos metálicos. A Figura 25 mostra uma representação esquemática da metodologia adaptada por Silva (2007).

---

<sup>4</sup> ASTM C 1698 – 09 – Standard test method for autogenous strain of cement past and mortar (2014)

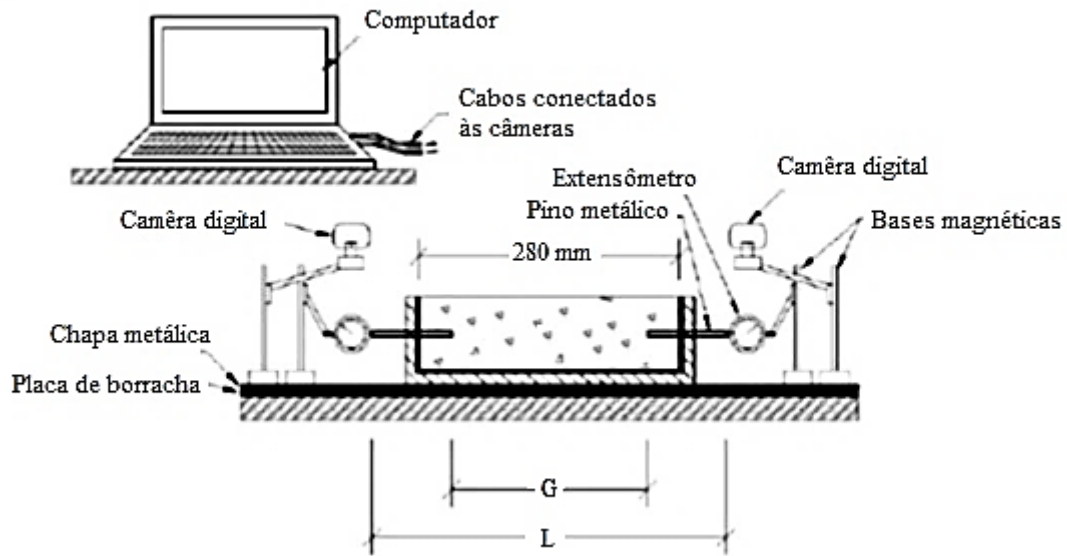


Figura 25 – Representação esquemática da metodologia proposta pelo Instituto Japonês do Concreto e adaptada por Silva (2007) para medição linear da variação autóloga (adaptado de SILVA *et al.* 2011a)

A deformação autóloga pode ser determinada pela equação (6):

$$\Delta L = \frac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{G} \quad (6)$$

Onde:

$\Delta L$  = deformação relativa de comprimento, antes da desforma.

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

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

$G$  = comprimento inicial entre as extremidades internas dos pinos metálicos

Outro método muito empregado para determinação da variação autóloga por medidas de deformação linear foi desenvolvido por Jensen e Hansen (1995). Os pesquisadores desenvolveram um equipamento denominado dilatômetro, constituído de um molde

corrugado de polietileno com uma relação comprimento/diâmetro de aproximadamente 300/30 mm. O molde preenchido com a amostra a ser ensaiada é fixado rigidamente a uma das extremidades do equipamento enquanto a outra é ligada a um relógio comparador. A rigidez do molde na direção radial em relação a direção longitudinal, permite transformar a deformação volumétrica em deformação linear antes do início de pega da amostra. Os autores afirmam que o dilatômetro permite o início das medições quase que imediatamente após a moldagem. A Figura 26 apresenta o dilatômetro com uma pasta em ensaio e o molde corrugado.

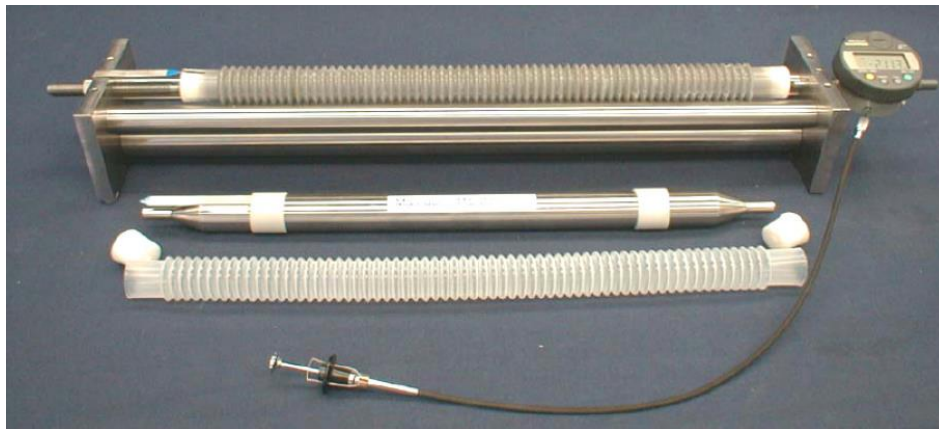


Figura 26 - Dilatômetro. Equipamento desenvolvido por Jensen e Hansen (1995) utilizado na medida de deformação linear da variação autógena em pastas e argamassas (LURA et al., 2006a)

Além dos métodos descritos anteriormente, vários pesquisadores têm empregado extensômetros elétricos embutidos em pastas, argamassas e concretos para determinação da variação autógena por meio de medidas de deformação linear (HANEHARA et al., 1999; AİTCIN, 1998; KOJIMA et al., 2001; LOPES, 2011). No presente estudo, a variação autógena está sendo avaliada por meio de extensômetros elétricos de resistência embutidos nos corpos de prova e a metodologia é apresentada em detalhes no capítulo Programa Experimental.

## 2.2 - POLÍMEROS SUPERABSORVENTES

Os polímeros superabsorventes são um dos materiais mais fascinantes que vem sendo empregado nas últimas décadas na tecnologia do concreto. Desenvolvidos no início dos anos 80 do século passado, o primeiro uso desses materiais foi na produção de fraldas descartáveis (JENSEN e HANSEN, 2001; FRIEDRICH, 2012; ASSMANN, 2013).

Ainda hoje, a indústria de fraldas descartáveis é a maior consumidora dos polímeros superabsorvente, porém, já se encontra outras aplicações como na agricultura e na tecnologia do concreto.

Os polímeros superabsorventes pertencem a um grupo de materiais poliméricos que apresentam a capacidade de absorver e reter uma grande quantidade de líquido, sem se dissolver. Esses polímeros podem apresentar uma absorção de água de até 5000 vezes o seu próprio peso num meio aquoso, porém em soluções com sais diluídos, a capacidade de absorção é reduzida para algo entre 50 a 100 gramas de solução para cada grama de polímero (JENSEN e HANSEN, 2001; ASSMANN, 2013). A Figura 27 ilustra a capacidade de absorção de um polímero superabsorvente.



Figura 27 - O béquer à esquerda mostra um polímero seco e o béquer à direita mostra a mesma quantidade de polímero seco após a absorção de água (MÖNNIG, 2009)

Muitos diferentes tipos de polímeros superabsorvente são conhecidos. Os comercialmente importantes são os poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas e os poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados (JENSEN e HANSEN, 2001). Buchholz e Graham *apud* Mönnig (2009) classificam os polímeros superabsorventes de acordo com a sua natureza iônica ou não iônica. O grupo iônico ainda pode ser subdividido em polímeros aniônicos e catiônicos (MÖNNIG, 2009).

Os polímeros superabsorventes existem em dois estados distintos, seco (também chamado de colapsado) e inchado (JENSEN e HANSEN, 2001). A Figura 28 mostra a transição do estado seco para o estado inchado de um polímero superabsorvente.

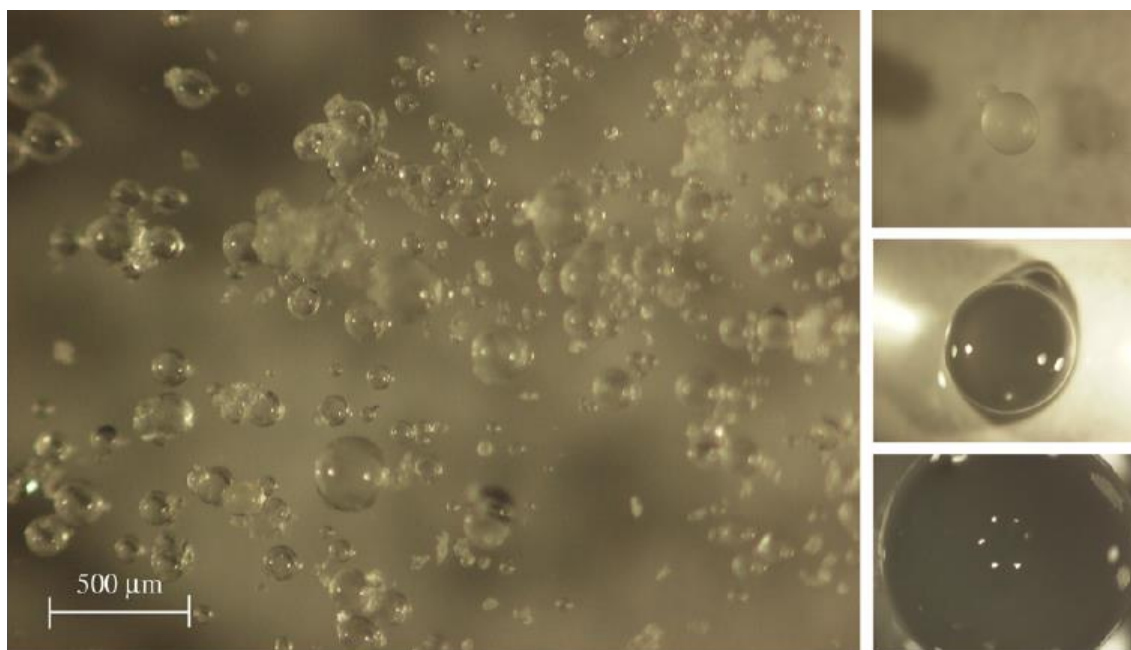


Figura 28 - Polímero superabsorvente no estado seco, com partículas variando de 0 a 300 $\mu\text{m}$ . A coluna à direita mostra a transição do estado seco para inchado, caracterizado por uma mudança rápida de sólido para gel. A morfologia em ambos estados é de partículas esféricas (ESTEVEES, 2011)

A transição entre esses estados é resultado de um balanço entre forças repulsivas e atrativas, que agem para expandir e retraindo a cadeia polimérica. Vários mecanismos estão envolvidos nesse processo e é fundamental conhecer a cinética da migração de água no interior e no exterior das partículas dos polímeros superabsorvente, para melhor compreender o uso desse material como agente de cura interna.

### **2.2.1 - Mecanismo de absorção e dessorção dos polímeros superabsorventes em soluções aquosas**

Os polímeros superabsorventes hidratam em contato com a água, conduzindo à formação de um gel de polímero inchado. Quando as reticulações químicas da estrutura tridimensional do polímero entra em contato com a água, ocorre um processo de difusão das moléculas do líquido para os espaços vazios no interior da rede polimérica, provocando o inchamento do polímero, como representa esquematicamente a Figura 29 (KLEMM e SIKORA, 2012).

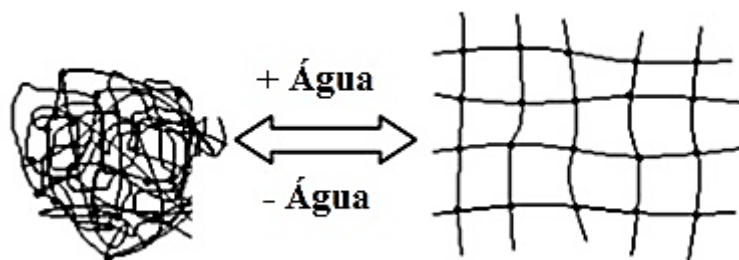


Figura 29 – Representação esquemática da estrutura reticulada do polímero superabsorvente no estado seco e no estado inchado (KLEMM e SIKORA, 2012)

O processo de inchamento é bastante complexo e os mecanismos de transporte de água para o interior das partículas do polímero superabsorvente são a pressão osmótica, a interação eletrostática, a entropia, a ação capilar e a interação de Coulomb (MÖNNING, 2009).

As propriedades hidrófilas dos polímeros superabsorventes resultam da presença de grupos de ácidos carboxílicos hidrófilos na sua estrutura principal. Imediatamente após misturar o polímero com água, o processo de hidratação é iniciado e as interações eletrostáticas entre moléculas começam a se formar. Pontes de hidrogênio são criadas em moléculas que possuem átomos de hidrogênio anexados a átomos eletronegativos. Pares de elétrons não ligados em átomos eletronegativos vizinhos atraem os átomos de hidrogênio. O oxigênio, que tem átomo eletronegativo, forma um dipolo na molécula puxando os elétrons do hidrogênio um contra o outro. Os átomos de hidrogênio, que possuem potencial positivo, são atraídos para os pares solitários de oxigênio em outra molécula de água. O oxigênio tem dois pares solitários de elétrons e cada um é capaz de ligar o hidrogênio a duas outras moléculas de água. A Figura 30 mostra a imagem de dois diferentes tipos de polímero superabsorvente passando pelo processo de inchamento (KLEMM e SIKORA, 2012).

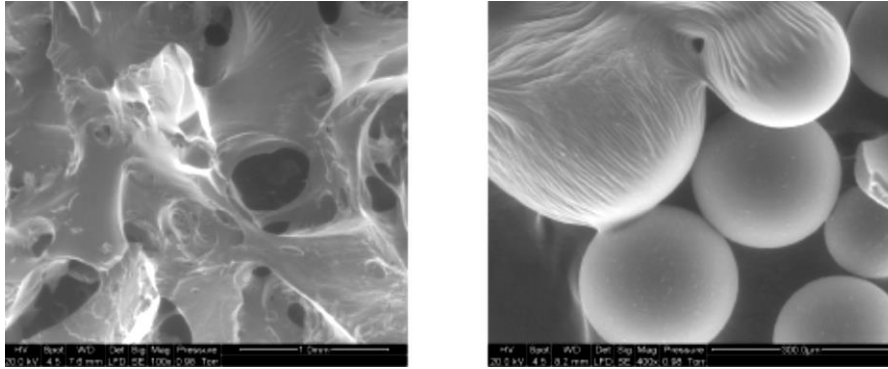


Figura 30 - Micrografia de dois diferentes tipos de polímeros superabsorvente em processo de inchamento (KLEMM e SIKORA, 2012)

A matriz macromolecular de um polímero superabsorvente é um polieletrólito, ou seja, um polímero com grupos ionizáveis que podem se dissociar em solução, deixando íons de um sinal ligados à cadeia e íons com sinal contrário na solução. Desse modo, uma alta concentração de íons existe dentro do polímero conduzindo um fluxo de água para o interior do polímero devido a osmose. Outro fator que contribui para aumentar o inchaço do gel do polímero é a solvatação de grupos hidrófilos presente ao longo da cadeia polimérica (JENSEN e HANSEN, 2001).

Além dos parâmetros que dependem da estrutura do polímero, a salinidade da solução aquosa é muito importante no inchaço do polímero superabsorvente. Os íons em solução mudam as interações inter e intramolecular dos polieletrólitos devido à proteção das cargas da cadeia polimérica. Além disso, como a concentração de íons fora do polímero cresce, a pressão osmótica no interior do gel diminui e, conseqüentemente, conduz a uma redução do inchaço do polímero (JENSEN e HANSEN, 2001; LURA et al., 2012).

A dimensão dos grãos também influencia a capacidade de absorção do polímero superabsorvente. Segundo Jensen e Hansen (2002) existe uma dimensão ótima do tamanho da partícula do polímero. Os autores sugerem que a dimensão ótima é de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  no estado inchado. Polímeros com partículas muito maiores ou muito menores do que essa dimensão ótima, são menos efetivos na redução da retração autógena, como sugere a representação esquemática da Figura 31 (JENSEN e HANSEN, 2002).

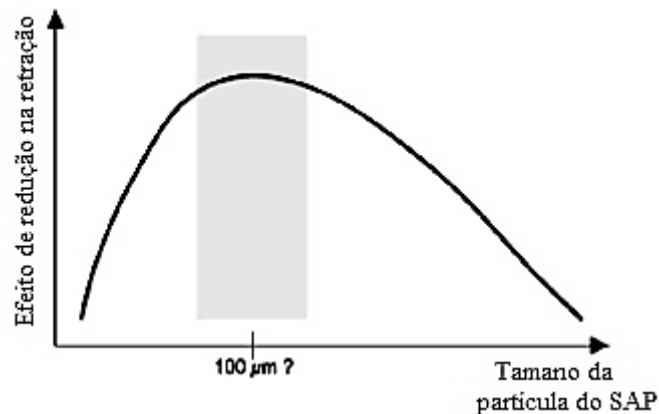


Figura 31 - Efeito do tamanho da partícula de polímero superabsorvente sobre a redução da retração autóloga. É sugerido uma dimensão ótima da partícula de aproximadamente 100 $\mu\text{m}$  no estado inchado (JENSEN e HANSEN, 2002)

Se as inclusões do polímero são grandes, elas podem não ser capazes de abastecer plenamente todas as partes da pasta de cimento com água, durante a hidratação. As partículas maiores dos polímeros podem também apresentar uma redução de eficiência na absorção da água devido ao tempo insuficiente para absorção durante a mistura. Por outro lado, se as inclusões do polímero são pequenas, seus efeitos na redução da retração podem ser parcialmente compensados pelo preenchimento com produtos de hidratação ou apresentar uma absorção reduzida devido a uma zona superficial menos ativa em comparação com o todo (JENSEN e HANSEN, 2002; LURA et al., 2012). Esteves (2010) apresentou resultados que confirmam que o tamanho da partícula do polímero superabsorvente influencia significativamente tanto a quantidade de solução absorvida como a taxa de absorção.

Quando começa a autodessecação da pasta de cimento devido as reações de hidratação, um gradiente da atividade de água é gerado dentro do concreto entre a água no interior do polímero e a solução dos poros (LURA et. al., 2007a). Parte deste gradiente da atividade de água é estabelecido pela pressão capilar desenvolvida na solução dos poros como consequência do esvaziamento dos poros devido a hidratação ou secagem (LURA et. al., 2003; WEISS et al., 2008). Uma contribuição adicional vem da pressão osmótica, devido ao fato que a composição da solução dos poros durante a pega e endurecimento da pasta pode ser diferente daquela da solução absorvida pelo polímero. O processo de desorção do polímero pode ser descrito como uma competição pela água entre o polímero e a pasta de cimento (MÖNNING, 2009).



Jensen e Hansen (2002) apresentaram uma isoterma de dessorção de uma solução de polímero superabsorvente. Enquanto que a absorção do líquido livre foi de 350 g/g em água destilada e de 37 g/g em solução sintética dos poros da pasta, numa umidade relativa de 98% o polímero reteve, aproximadamente, apenas 3g/g de solução dos poros e menos do que 1g/g, em umidade relativa de 86%. Esse resultado pode indicar que, em concretos com baixa relação água/cimento, onde a autodessecação surge rapidamente, quase toda a solução de poros absorvida pelo polímero, poderá ser liberada nos primeiros dias de hidratação (LURA et al., 2007a).

A cinética de dessorção do polímero superabsorvente numa pasta de cimento depende das propriedades do polímero, da cinética das reações de hidratação, da microestrutura da pasta e da interface entre a pasta de cimento e o polímero, através da qual o transporte de água ocorre (LURA et. al. 2007b).

O completo entendimento do processo de dessorção do polímero inclui a determinação da distância que a água liberada pelo polímero alcança na pasta de cimento endurecida. Mönning (2009) estudou o transporte de água de um polímero numa pasta com relação água/cimento igual a 0,50. O pesquisador observou a formação de uma coroa brilhante na vizinhança do polímero, o que indica um aumento localizado da relação água/cimento nessa região. Enquanto que a seção transversal do polímero era de 168 $\mu\text{m}$ , a zona de influência apresenta um diâmetro de 280 $\mu\text{m}$ . Isto indica que a água foi transportada a uma distância do polímero de aproximadamente 56 $\mu\text{m}$ , como pode ser observado na Figura 32 (MÖNNING, 2009).

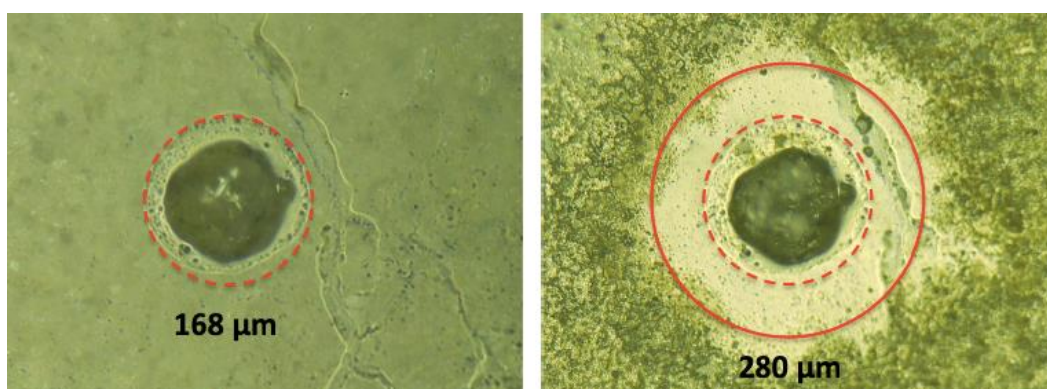


Figura 32 - Partícula de polímero superabsorvente, ampliada 130 vezes, numa pasta de cimento no estado fresco (à esquerda) e a mesma partícula após 24 horas (à direita). Os círculos indicam o diâmetro original da partícula (168 $\mu\text{m}$ ) e o diâmetro da região de influência (280 $\mu\text{m}$ ) (MÖNNING, 2009 adaptado por MANZANO, 2016)

Buscando elucidar o comportamento da água de cura interna incorporada pelo SAP em um material cimentício de alta resistência, Manzano (2016) propôs um modelo esquemático do mecanismo de atuação do polímero, associados aos três estágios de hidratação do método da curva calorimétrica (TAYLOR, 1997), que é mostrado na Figura 33.

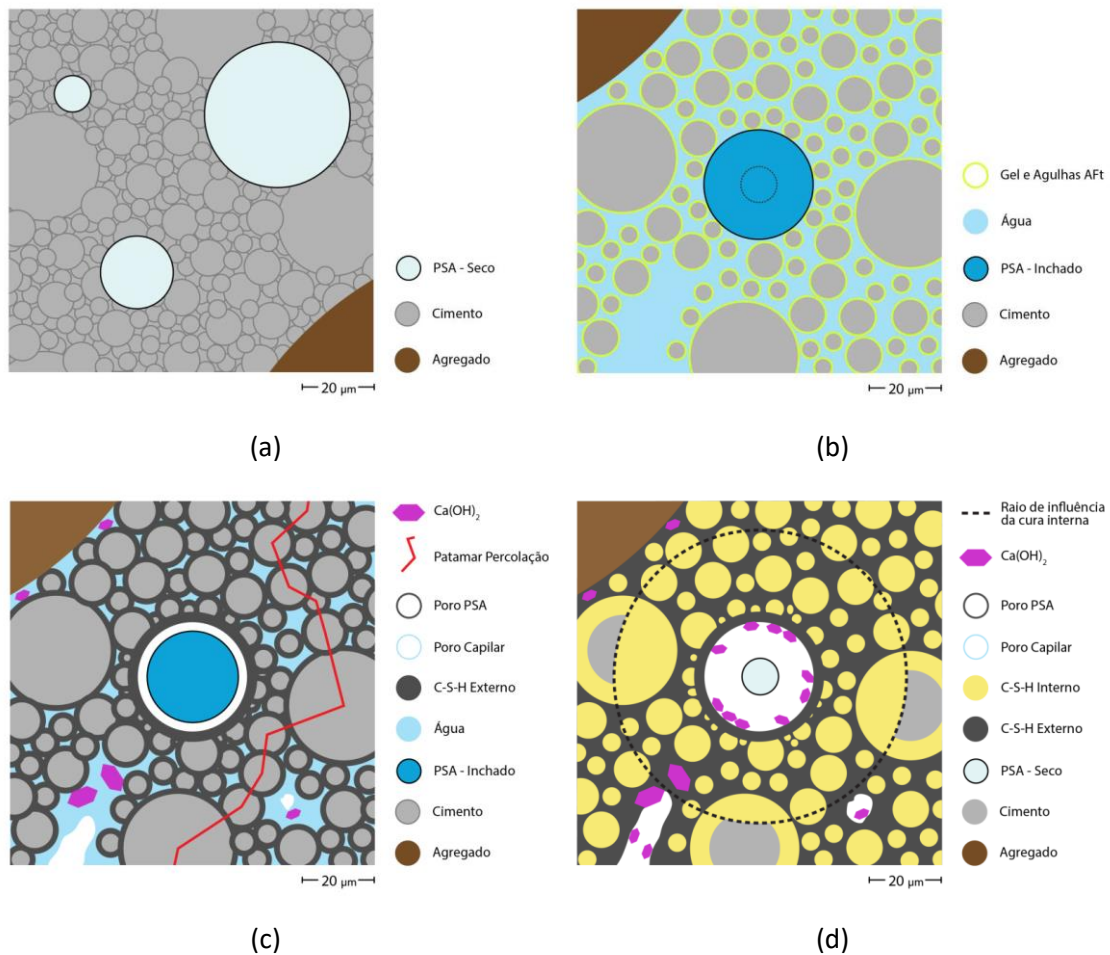


Figura 33 - Modelo esquemático do mecanismo de atuação do PSA como agente de cura interna em um concreto de alta resistência (MANZANO, 2016)

A Figura 33 (a) mostra os materiais constituintes do concreto (cimento, agregados e SAP), na condição de materiais secos. Para simplificar a apresentação a forma das partículas do cimento foi adotada como esférica e são representadas três partículas de SAP de diferentes diâmetros (10 $\mu$ m, 20 $\mu$ m e 40 $\mu$ m) homogeneamente distribuídas. A Figura 33 (b) mostra o período inicial de hidratação, onde há a dissolução do Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A) e do Sulfato de Cálcio (CaSO<sub>4</sub>), formando etringita (AFt). Nesse período a partícula de SAP, logo após a adição da água de amassamento e da água incorporada, absorve a água de

cura interna e incha. Para uma melhor interpretação do efeito do SAP, somente a partícula de polímero de diâmetro seco igual a 10µm foi isolada e representada.

A Figura 33 (c) mostra o período de evolução das reações de hidratação, quando os principais constituintes do cimento reagem com a água e formam silicato de cálcio hidratado (C-S-H) externo à superfície do grão de cimento e hidróxido de cálcio. As lâminas de C-S-H na superfície dos grãos vão se ligando e formam o primeiro caminho sólido, iniciando o endurecimento do material, esse momento caracteriza a transição suspensão-sólido ou patamar de percolação (tempo zero). A partir desse momento, surge um gradiente de umidade relativa na matriz cimentícia que levaria ao fenômeno conhecido como autodessecação e, conseqüentemente, ao desenvolvimento da retração autógena. No entanto, a presença do SAP muda o cenário, pois o gradiente de umidade relativa na matriz cimentícia conduz ao processo de dessorção de água de cura interna da partícula de polímero. Essa liberação de água para a matriz cimentícia, ao redor das partículas de SAP, evita o esvaziamento dos poros capilares e a formação do menisco (mecanismo da variação da depressão capilar), evitando a diminuição da umidade relativa no interior do concreto e, portanto, eliminando a autodessecação e promovendo a hidratação.

No período final da hidratação, mostrado na Figura 33 (d), toda a água é consumida nas reações e é formada a porosidade capilar do concreto. Os produtos de hidratação formados nas superfícies dos grãos de cimento impedem a difusão através das camadas e então se forma o C-S-H interno. O polímero libera toda a água de cura interna e observa-se que existe um raio de influência da cura interna a partir da partícula de polímero, representada pela linha tracejada, onde foi mitigada a autodessecação da matriz cimentícia. No local onde se encontrava a partícula de SAP é criado um vazão.

### **2.2.2 - Efeitos do polímero superabsorvente nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios**

O principal objetivo do uso de polímero superabsorvente em concretos de alta resistência é mitigar ou reduzir para níveis aceitáveis a autodessecação e a retração autógena. É claro que é importante assegurar que a solução para um problema, não crie novos. Assim sendo, quando um novo componente, como o polímero superabsorvente, é adicionado ao

concreto, é muito importante saber como este componente influencia as demais propriedades. Nesse sentido, a seguir apresenta-se de forma sucinta uma discussão sobre a influência da adição de polímero superabsorvente na resistência à compressão, resistência à tração e no módulo de deformação de pastas, argamassas e concretos.

### **2.2.2.1 - Resistência à compressão**

Os relatos na literatura sobre a influência do polímero superabsorvente na resistência à compressão de materiais cimentícios ainda parecem ser contraditórios. Alguns estudos (JENSEN e HANSEN, 2002; MECHTCHERINE *et al.*, 2006; PIÉRARD *et al.*, 2006) tem mostrado que a incorporação do polímero superabsorvente na mistura prejudica a resistência à compressão de pastas, argamassas e concretos. Por outro lado, outros trabalhos mostram resultados onde quase não há influência da presença do polímero na resistência à compressão ou há até um aumento da resistência à compressão desses materiais com a presença do polímero superabsorvente (LURA *et al.*, 2006c; KUMAR e MARUTHACHALAM, 2013)

Lam e Hooton (2005) observaram que a adição de 0,3% de polímero superabsorvente (em relação a massa de cimento) na mistura de concreto, reduziu a resistência a compressão quando comparado com as misturas de referência que possuíam relação água/cimento igual a 0,35 e 0,45. No entanto, ao produzirem uma mistura de concreto com 0,6% de polímero e mesmo teor de água incorporada do concreto com 0,3% de polímero, observaram que a resistência à compressão era aproximadamente a mesma do concreto de referência com maior relação água/cimento ( $a/c = 0,45$ ), como é mostrado na Figura 34.

Normalmente a quantidade de água incorporada no concreto fresco corresponde à capacidade de absorção do polímero e, portanto, é diretamente proporcional à quantidade de polímero. No caso do estudo, Lam e Hooton (2005) não seguiram essa prática e mantiveram a quantidade de água incorporada igual a 10% da massa de cimento tanto para a mistura com 0,3% de polímero como para a mistura com 0,6% de polímero. Acredita-se que a mais baixa resistência à compressão do concreto com 0,3% de polímero, se deve a esse motivo.

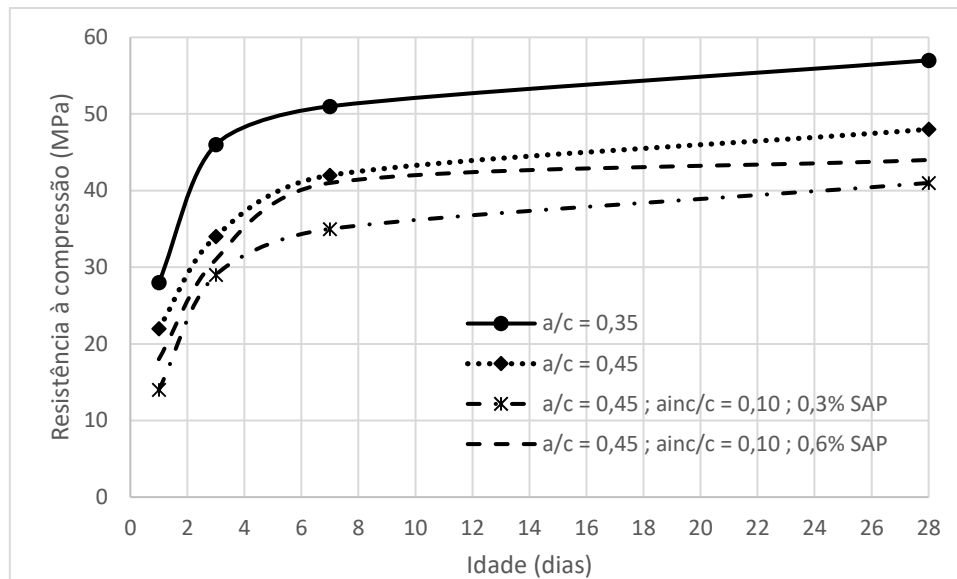


Figura 34 - Desenvolvimento da resistência à compressão, em função do tempo, de concretos com SAP em comparação com dois concretos de referência. Adaptado de Lam e Hooton (2005)

Piérard et al. (2006) mediram a resistência de concretos com relação água/cimento 0,35 sem polímero e com teores de polímero iguais a 0,3% e 0,6% em relação à massa de cimento (correspondendo, respectivamente, a 2% e 4% de água incorporada em relação à massa de cimento). Os ensaios foram realizados em corpos de prova cúbicos curados em câmara úmida com 95% de umidade relativa e  $(20 \pm 2)$  °C de temperatura. As idades de ensaio foram 2, 7 e 28 dias. Os resultados mostraram que o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais (2 e 7 dias) foi menor para as misturas com polímero, mas a diferença na resistência foi reduzida aos 28 dias. Aos 28 dias, a redução na resistência foi de 7% e 13% para misturas de concreto com 0,3% e 0,6% de polímero, respectivamente.

Lura et al. (2006b) relatam que a cura interna por meio de 0,4% de polímero superabsorvente (água incorporada equivalente a 5% em relação à massa de cimento) não tem influência significativa na resistência à compressão de argamassas de alta resistência, enquanto que em pastas de cimento a redução na resistência foi de 20% nas idades iniciais (até 7 dias) e de 10% nas idades mais avançadas (28 e 56 dias).

Esteves et al. (2007) em seus estudos ensaiaram argamassas com relação água/cimento 0,25, 0,30 e 0,35. Para cada relação água/cimento foram realizadas misturas sem polímero e com 0,2% de polímero, em relação à massa de cimento (água incorporada equivalente

a 5% em relação a massa de cimento). As amostras foram curadas em umidade relativa de 30%, 50% e 95%. Os resultados mostraram que, após 28 dias de cura em umidade relativa de 95%, as argamassas com polímero tiveram uma redução na resistência à compressão de 15% a 20%. Mas, enquanto a resistência diminuiu devido a cura em menor umidade relativa para as argamassas sem polímero, as argamassas com polímero, mantiveram quase constante a resistência à compressão, não importando as condições de cura. Na condição de umidade relativa de 30%, a redução da resistência para argamassas com polímero foi de apenas 5%.

Mechtcherine et al. (2009) determinaram a resistência à compressão de argamassas com relação água/cimento 0,22 sem a adição de polímero e com adição de 0,3% e 0,6% de polímero em relação à massa de cimento. Os pesquisadores adicionaram água incorporada para compensar a perda de trabalhabilidade devido à absorção da água de mistura pelo polímero. Os autores observaram uma significativa redução na resistência à compressão nas idades iniciais (até 7 dias). Para a mistura com 0,3% de polímero foi observada uma redução da resistência de 12% e para a mistura com 0,6% de polímero essa redução foi de 30%. Aos 28 dias de idade foi observada uma redução de apenas 4% da resistência à compressão para a mistura com 0,3% de polímero, o que pode ser considerada insignificante. Por outro lado, para a mistura com 0,6% de polímero a redução da resistência aos 28 dias de idade foi de 20%, ou seja, continuou sendo uma redução significativa.

Kumar e Maruthachalam (2013) fizeram misturas de concreto com relação água/cimento 0,40 sem polímero e com teores de polímeros de 0,2%, 0,3% e 0,4% em relação à massa de cimento. Os resultados obtidos mostraram maiores valores de resistência à compressão para as misturas com a presença do polímero.

Ordoñez (2013), ao analisar argamassas de alta resistência com relação água/cimento 0,30 sem adição de polímero em comparação com argamassas contendo polímero superabsorvente nos teores de 0,3%, 0,4% e 0,6% em relação à massa de cimento, concluiu que as misturas com adição de 0,3% e 0,4% de polímero superabsorvente apresentaram, respectivamente, uma redução na resistência da ordem de 3% e 7% aos 7 dias, e de 9% aos 28 dias. A mistura com adição de 0,6% de polímero apresentou uma redução na resistência da ordem de 15% aos 7 dias e aos 28 dias

Manzano (2016) e Santos (2016) trabalhando com materiais semelhantes ao empregado no presente estudo avaliaram o comportamento da resistência à compressão, aos 7 e 28 dias de idade, de argamassas de alto desempenho com relação água/cimento 0,30 com e sem a adição de polímero superabsorvente. Ambos autores trabalharam com teores de polímero de 0,2% e 0,3% em relação à massa de cimento. Manzano (2016) em seus estudos ainda tinha um teor de polímero de 0,1% em relação à massa de cimento. Os pesquisadores verificaram que o acréscimo de polímero superabsorvente causa um decréscimo na resistência à compressão para ambas as idades estudadas, como mostra a Figura 35 (MANZANO, 2016).

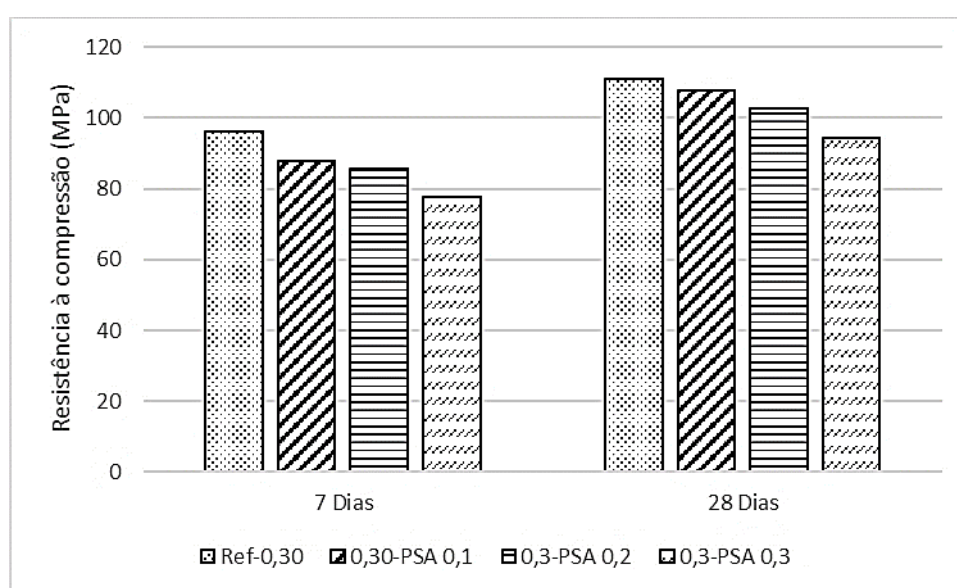


Figura 35 - Evolução da resistência à compressão de misturas de argamassas com polímero superabsorvente e a mistura de referência (adaptado de MANZANO, 2016).

Os resultados de Manzano (2016) indicam uma redução na resistência à compressão de 3%, 6% e 22% aos 28 dias de idade, para os teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% de polímero superabsorvente, respectivamente. Enquanto que os resultados de Santos (2016) indicam uma redução de 16% e 30% da resistência aos 28 dias de idade, respectivamente para os teores de 0,2% e 0,3% de polímero.

Atentos à diminuição da resistência à compressão, em alguns estudos (KUMM, 2009; 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 água/cimento igual à relação água/cimento total da mistura com polímero, pois a perda de resistência pode ser devido ao aumento da relação água/cimento causado

pela adição de água extra para a cura interna. Entende-se por relação água/cimento total a soma da relação água incorporada/cimento e a relação água/cimento. Assim sendo, os autores consideram que a comparação é mais apropriada e não penaliza as misturas com polímero.

Nesse sentido, Kumm (2009) estudou a incorporação de água de cura interna por meio do emprego de polímero superabsorvente em pastas de cimento. Foram comparados três teores de adição de polímero superabsorvente em relação à massa de cimento (0,135%, 0,203% e 0,27%), incorporados às misturas nas condições seco, úmido e saturado, com duas misturas de referência (sem a presença do polímero) com relação água/cimento 0,30 e 0,354. As misturas com polímero apresentavam relação água incorporada/cimento igual a 0,054 resultando numa relação água/cimento total 0,354. A pesquisadora observou que as resistências à compressão de todas as misturas com polímero foram menores do que a resistência à compressão da mistura de referência com relação água/cimento 0,30. A perda de resistência variou de 2% a 27%. Por outro lado, ao comparar as resistências à compressão das misturas contendo polímero com a mistura de referência com relação água/cimento 0,354, observou que na maioria das condições do estudo ocorre uma redução da resistência, que variou de 11% a 23%, nas idades iniciais (até 7 dias), porém nas idades maiores (28 dias) notou-se uma redução insignificante ou até um acréscimo da resistência à compressão das misturas com polímero. Aos 28 dias foram observados incrementos na resistência à compressão de até 12%. Kumm (2009) ainda afirma que, do ponto de vista estatístico, o incremento de resistência alcançado por misturas contendo o polímero superabsorvente pode parecer inexpressivo, contudo, do ponto de vista prático este incremento pode representar, no caso de concretos, a mudança de classe de resistência.

Nessa mesma linha, Mechtcherine et al. (2013) e Manzano (2016) desenvolveram seus estudos. Mechtcherine et al. (2013) fizeram uma mistura com adição de 0,3% de polímero em relação à massa de cimento, correspondendo a uma relação água de cura interna/cimento de 0,06. Essa mistura foi comparada com duas misturas de referência, uma com relação água/cimento de 0,30 e outra com relação água/cimento de 0,36. Os autores observaram que, comparando a mistura contendo polímero com a mistura de referência de relação água/cimento 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 água/cimento 0,36, a perda de resistência foi de 6% e 12%, também para os 7 dias e 28 dias de idade, respectivamente. Os resultados desses autores são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de resistência à compressão de misturas com e sem polímero (MECHTCHERINE et al. 2013)

Mistura	Relação a/c	Relação a <sub>inc</sub> /c	Relação a/c total	F <sub>c7</sub> (MPa)	F <sub>c28</sub> (MPa)
Ref 1 a/c=0,30	0,30	0,0	0,30	73	102
Ref 1 a/c=0,36	0,36	0,0	0,36	70	93
PSA 0,3%	0,30	0,06	0,36	66	82

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 0,30 e 0,35. Os resultados estão expressos na Tabela 3. O autor observou que, a adição de 0,3% de polímero, 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 água/cimento 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%.

Tabela 3 - Resultados de resistência à compressão de misturas com e sem polímero (MANZANO, 2016)

Mistura	Relação a/c	Relação a <sub>inc</sub> /c	Relação a/c total	F <sub>c7</sub> (MPa)	F <sub>c28</sub> (MPa)
Ref 1 a/c=0,30	0,30	0,0	0,30	83,8	91,6
Ref 2 a/c=0,35	0,35	0,0	0,35	66,0	78,0
PSA 0,3%	0,30	0,05	0,35	61,9	71,6

Os efeitos da adição de polímero superabsorvente na resistência à compressão têm sido modelados combinando os modelos de Bolomey e Powers (HASHOLT et al., 2010). O primeiro sugere que as reduções apresentadas na resistência provavelmente se devem a um incremento da porosidade da pasta devido à introdução do polímero superabsorvente. 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. Por outro lado, o modelo de Powers indica que o polímero superabsorvente promove um maior grau de hidratação para pastas com baixa relação água/cimento, o que pode representar um incremento na resistência à compressão (HASHOLT et al., 2010).

O efeito positivo ou negativo do polímero superabsorvente na resistência depende da dosagem e da idade. Se a relação água/cimento é alta ( $> 0,45$ ), a adição de polímero superabsorvente terá pouco efeito sobre a hidratação e, portanto, a presença do polímero na mistura geralmente reduzirá a resistência. O mesmo ocorre para baixa relação água/cimento e baixas idades, se o teor de polímero adicionado é alto. Nesse caso, o aumento da resistência devido ao incremento do grau de hidratação não é suficiente para contrabalancear a redução da resistência devido aos vazios resultante do grande volume de polímero adicionado. No entanto, para baixa relação água/cimento e pequenos teores de adição de polímero, o aumento do grau de hidratação provocado pela cura interna, pode promover um incremento na resistência à compressão nas idades maiores (HASHOLT et al., 2010).

Hasholt et al. (2010) buscou sistematizar as razões pelas quais o polímero superabsorvente tem influência sobre a resistência à compressão do concreto, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Razões porque o polímero superabsorvente influencia a resistência à compressão do concreto (HASHOLT et al., 2010)

<b>SAP aumenta a resistência à compressão</b>	<b>SAP reduz a resistência à compressão</b>
O polímero aumenta o grau de hidratação, assim resulta em uma pasta mais densa	Vazios criados pelo SAP diminuem a resistência da mesma maneira como os vazios do concreto
O polímero previne a microfissuração provocada pela autodessecação, que de outra forma enfraquece o concreto	As condições de umidade interna influenciam a resistência. Concreto seco apresenta resistência à compressão maior do que no estado saturado. Como o concreto com SAP em geral tem maior umidade interna, apresentará menor resistência do que o concreto sem SAP

### 2.2.2.2 - Resistência à tração

Mechtcherine et. al. (2006) estudaram a resistência à tração de concretos produzidos com relação água/cimento igual a 0,25 e 0,4% de polímero superabsorvente, o que representava uma relação água incorporada/cimento igual a 0,04. Os autores

determinaram a resistência à tração direta e na flexão, e observaram uma tendência na redução da resistência à tração, exceto para a tração direta quando o concreto foi submetido a um processo de cura térmica, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resistência à tração direta e na flexão de concretos produzidos com e sem SAP, com diferentes condições de cura (MECHTCHERINE et al.2006)

Material	Tração direta (MPa)		Tração na Flexão (MPa)	
	20°C/28d	90°C/2d	20°C/28d	90°C/2d
Concreto de referência	10,1	7,1	16,4	17,4
Concreto com SAP	8,2	7,6	12,3	12,0

Igarashi e Watanabe (2006) determinaram a resistência à tração por compressão diametral de concretos com relação água/cimento igual a 0,25 e observaram a diminuição da resistência à tração com o aumento do teor de polímero superabsorvente nas misturas, independentemente da idade de ensaio, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência à tração por compressão diametral de concretos produzidos com e sem polímero superabsorvente (IGARASHI E WATANABE, 2006)

Teor de Polímero (%)	Relação água incorporada/cimento	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	
		7 dias	28 dias
0	0	5,0	7,5
0,35	0,045	4,1	6,7
0,70	0,09	3,5	5,0

Ordoñez (2013) avaliou a resistência à tração na flexão em argamassas com polímero superabsorvente como agente de cura interna e uma relação água incorporada/cimento igual a 0,05. A autora observou que a adição do polímero reduziu, em média, a resistência à tração na flexão em 15%.

Mechtcherine et al. (2013), estudaram o efeito nas propriedades mecânicas de dois tipos de polímero superabsorvente, e observaram que os polímeros causaram um decréscimo de 11%, em média, na resistência à tração na flexão. Os autores concluíram que essa redução é ocasionada pelo incremento da porosidade nas misturas contendo polímero.

Manzano (2016) realizou ensaios de resistência à tração na flexão e por compressão diametral de argamassas com e sem adição de polímero superabsorvente. A resistência à

tração na flexão ainda foi avaliada para duas condições de cura: úmida e ao ar. O autor observou que, a adição de polímero superabsorvente, representou uma redução na resistência à tração tanto na flexão como por compressão diametral de, em média, 8%, para argamassas com a mesma relação água/cimento básica. Por outro lado, ao realizar a comparação com argamassas com a mesma relação água/cimento total, o autor observou que a adição do teor de 0,3% de polímero causou um aumento da resistência à tração na flexão, em média, de 8%, enquanto que na resistência à tração por compressão diametral não teve influência significativa. Manzano (2016) também observou um incremento na resistência à tração na flexão quando a condição de cura é desfavorável (cura ao ar), mostrando a influência benéfica do polímero. Lam e Hooton (2005) já haviam observado em seus estudos que concretos com relação água/cimento igual a 0,35 e teor de polímero de 0,6%, curados em umidade relativa de 50% e temperatura de 23 °C, apresentaram, aos 28 dias de idade, um incremento de até 30% na resistência à tração por compressão diametral quando comparado com as misturas de referência, como pode ser observado na Figura 36.

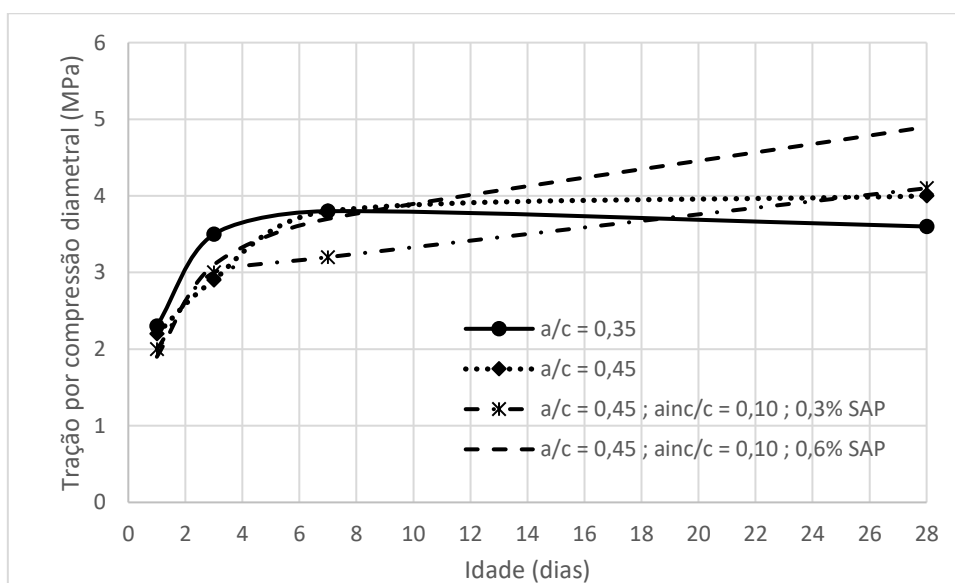


Figura 36 - Desenvolvimento da resistência à tração por compressão diametral de concretos com dois teores de polímero e duas relações água/cimento, curados em umidade relativa de 50% e temperatura de 23 °C . Adaptado de Lam e Hooton (2005)

A resistência à tração é frequentemente considerada com uma boa indicação da resistência à fissuração e depende fortemente da existência de microfissuras, que podem provocar a formação de macrofissuras sob tensão de tração. Neste ponto de vista, o aumento da resistência à tração das misturas contendo polímero superabsorvente pode ser explicado

pelo fato que o polímero, em paralelo a mitigação da retração autógena, também tem êxito no incremento da resistência à fissuração (KOVLER, 2012). Por outro lado, O aumento da porosidade é apontado na literatura como a principal causa para a diminuição da resistência à tração das misturas cimentícias que contém polímero superabsorvente.

### **2.2.2.3 - Módulo de deformação**

Dudziak e Mechtecherine (2008) em seus estudos observaram uma pequena diferença (menos de 3%) entre o módulo de deformação de argamassas curadas internamente com polímero superabsorvente, em comparação com sua correspondente mistura de referência. Os pesquisadores estudaram argamassas de alta resistência produzidas com relação água/cimento igual a 0,22 com e sem polímero. Aos 28 dias, observaram que o módulo de deformação da argamassa sem polímero era igual a 48 GPa, enquanto a mistura com adição de 0,3% de polímero, correspondendo a uma relação água incorporada/cimento de 0,04, apresentava módulo igual a 46,8 GPa.

Manzano (2016) notou uma tendência de diminuição do módulo de deformação ao adicionar polímero superabsorvente nas misturas do seu estudo. Para uma mesma relação água/cimento básica concluiu que o aumento do teor de polímero causa um decréscimo do módulo de deformação das argamassas. As porcentagens de redução para as misturas contendo 0,1%, 0,2% e 0,3% de SAP foram de 5%, 8% e 13%, respectivamente. Shen et al. (2016) também observaram que, em concretos com a mesma relação água/cimento básica (0,33), o incremento da adição de polímero causou uma redução do módulo de deformação.

Para uma mesma relação água/cimento total, Manzano (2016) observou que a adição de 0,3% de polímero superabsorvente causou uma redução no módulo de deformação de apenas 3%, em média. Kong et al. (2014) compararam o módulo de deformação de concretos de alto desempenho com e sem adição de polímero superabsorvente, para misturas com a mesma relação água/cimento total e também concluíram que a incorporação de polímero nas misturas não causou efeito significativo no módulo de deformação dos concretos.

### 2.3 - CURA INTERNA

O concreto necessita de um processo de cura para melhor desenvolver suas propriedades e, conseqüentemente, apresentar melhor desempenho. A duração do período de cura pode ser diferente dependendo, dentre outros fatores, das condições a que o concreto está exposto. No entanto, por mais favorável que sejam essas condições, não se pode prescindir da realização da cura do concreto.

Em geral a cura do concreto tem sido realizada por métodos tradicionais que buscam fazer a molhagem da superfície do concreto por meio de aspersão de água ou buscam evitar a evaporação da água, através da selagem da superfície do concreto com mantas ou lonas, ou ainda, com aspersão de resinas que formam membranas impermeáveis sobre a superfície. No entanto, para concretos de alta resistência, esses métodos tradicionais não são os mais indicados uma vez que o ingresso de água externa é dificultado pela estrutura densa e fechada, e a queda da umidade relativa no interior dos poros causa a autodessecação acompanhada de grande retração autógena. Para esses concretos a solução mais adequada para a cura é a chamada “água de cura interna” ou “água incorporada” ou simplesmente “cura interna”<sup>5</sup> (JENSEN e HANSEN, 2001; LURA et al. 2006a; MÖNNIG, 2009).

A cura interna consiste em incorporar na etapa de mistura do concreto um elemento que irá atuar como reservatório de água. O princípio básico consiste que o agente de cura seja um depósito de água no interior do concreto e, com o avanço das reações de hidratação, possa liberar essa água para a continuidade dessas reações e prevenir a autodessecação (ESTEVEZ, 2009; ASSMANN, 2013).

Os principais materiais que vêm sendo utilizados como agentes de cura interna tem sido os agregados leves (WEBER e REINHARDT, 1997) e os polímeros superabsorventes (JENSEN e HANSEN, 2001). O uso de agregados leves como agente de cura interna para mitigar a retração autógena vem sendo empregado desde o início dos anos 90, enquanto

---

<sup>5</sup> A RILEM (2007) classifica a cura interna em duas categorias: i) água de cura interna e ii) selagem interna. A selagem interna, consiste da incorporação na mistura do concreto de um agente com o objetivo de retardar a evaporação da água de amassamento. A selagem interna não é uma categoria relevante para o desenvolvimento do presente trabalho. Por outro lado, a categoria água de cura interna, é fundamental na compreensão e desenvolvimento do trabalho. Portanto, sempre que se fizer referência à cura interna nesse trabalho, estará se referenciando a água de cura interna ou água incorporada

que o uso dos polímeros absorventes para esse mesmo fim é do início dos anos 2000 (LURA, 2003). O emprego dos polímeros superabsorventes tem se mostrado mais promissor como agente de cura interna para concretos de alta resistência. No presente estudo, um tipo de polímero superabsorvente tem sido investigado como agente de cura interna e sua influência nas propriedades mecânicas e na fluência do concreto. Assim sendo, na sequência apresenta uma discussão do uso do polímero como agente de cura interna. Uma revisão do emprego de agregados leves como agente de cura interna pode ser consultada nos trabalhos de Lura (2003), Bentz e Weiss (2011) e Ideker et al. (2013).

### 2.3.1 - Cura Interna com Polímeros Superabsorventes (SAP)

Jensen e Hansen (2001) 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.

A Figura 37 apresenta a distribuição das fases volumétricas em função do grau de hidratação, na condição selada, de uma pasta de cimento com relação a/c igual a 0,36 em comparação com uma pasta de cimento com água de cura interna incorporada, resultando numa relação a/c igual a (0,36 + 0,06). A parte adicional na designação da relação a/c refere-se à quantidade de água incorporada, por exemplo relação  $a_{inc}/c$  igual a 0,06. A hidratação de um sistema de pasta de cimento com baixa relação a/c é interrompida quando toda a água capilar é consumida. Por outro lado, no sistema de pasta com agente de cura interna, no caso a pasta com relação a/c igual a (0,36 + 0,06), é possível atingir o grau de hidratação máximo ( $\alpha_{max} = 1$ ). A construção dos gráficos da Figura 37 se deu a partir das equações propostas por Powers e Brownyard (1948), que são apresentadas abaixo:

$$\text{Volume de sólidos de gel} \quad V_{sg} = 1,52 (1 - p) \alpha \quad (7)$$

$$\text{Volume de água de gel} \quad V_{ag} = 0,60 (1 - p) \alpha \quad (8)$$

$$\text{Volume de cimento anidro} \quad V_{ca} = (1 - p) (1 - \alpha) \quad (9)$$

$$\text{Volume de retração química} \quad V_{rq} = 0,20 (1 - p) \alpha \quad (10)$$

$$\text{Volume de água capilar} \quad V_{ac} = p - 1,32 (1 - p) \alpha \quad (11)$$

$$\text{Porosidade inicial} \quad p = a/c / (a/c + \rho_a / \rho_c) \quad (12)$$

Onde,

$a/c$  = relação água/cimento.

$\alpha$  = grau de hidratação do cimento (kg de cimento hidratado/ kg de cimento anidro).

$\rho_c = 3150 \text{ kg/m}^3$  (massa específica do cimento)

$\rho_a = 1000 \text{ kg/m}^3$  (massa específica da água)

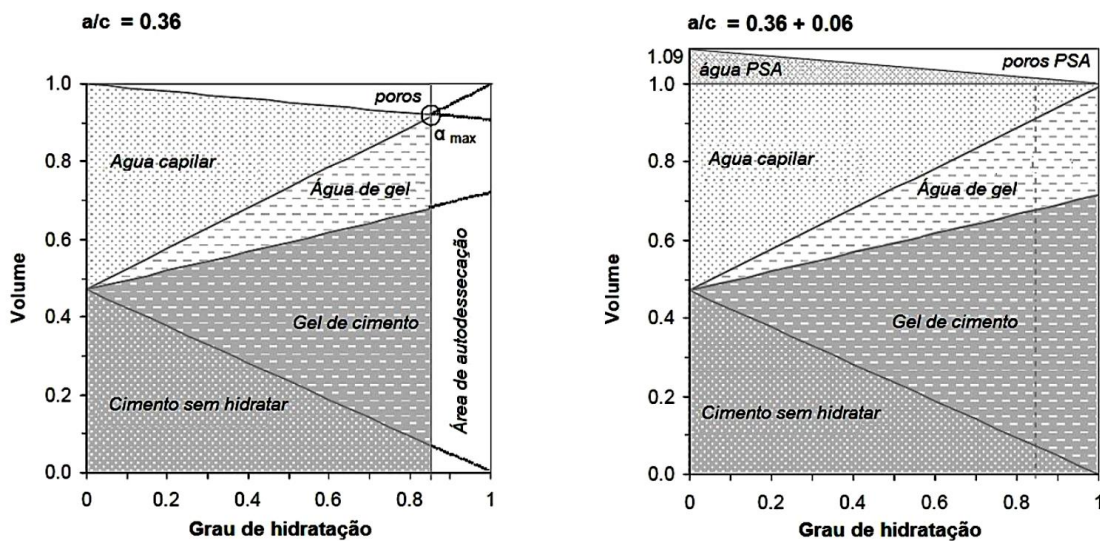


Figura 37 - Distribuição volumétrica da estrutura interna de duas pastas de cimento em função do grau de hidratação, a partir das equações do modelo de Powers. A esquerda, pasta com relação  $a/c = 0,36$  e, a direita, pasta com relação  $a/c = 0,36$  e água de cura interna igual a  $0,06$  (ASSMANN, 2013)

Pode-se observar que a incorporação de água para a realização da cura interna aumenta o grau de hidratação da pasta, elimina a autodessecação e, conseqüentemente, a retração autógena. Esse último efeito é extremamente positivo uma vez que a retração autógena ocorre nas primeiras idades, quando o concreto ainda não apresenta resistência suficiente para suportar as tensões de tração que podem surgir, levando o material à fissuração.



A quantidade de água incorporada necessária para evitar a autodessecação de uma pasta de cimento pura, pode ser teoricamente calculada aplicando as equações (7) a (12) propostas por Powers e Brownyard (1948), assumindo que a hidratação cessa, em pastas com baixa relação água/cimento, quando toda a água capilar é consumida e o espaço é ocupado pelos volumes de sólidos de gel ( $V_{sg}$ ), de água de gel ( $V_{ag}$ ) e de cimento anidro ( $V_{ca}$ ):

$$V_{sg} + V_{ag} + V_{ca} = 1 \quad \text{para} \quad \alpha = \alpha_{\max}$$

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

Como resultado a quantidade de água incorporada para obter o máximo grau de hidratação é:

$$a_{inc}/c = 0,18 (a/c) \quad \text{para} \quad (a/c) < 0,36 \quad (13)$$

Para valores de relação água/cimento de 0,36 até 0,42, a quantidade de água incorporada necessária para obter  $\alpha_{\max} = 1$  é:

$$a_{inc}/c = 0,42 - (a/c) \quad \text{para} \quad 0,36 \leq (a/c) \leq 0,42 \quad (14)$$

A partir das equações (13) e (14), a Figura 38 mostra uma representação gráfica da relação água incorporada/cimento teoricamente necessária para evitar a autodessecação, em função da relação água/cimento.

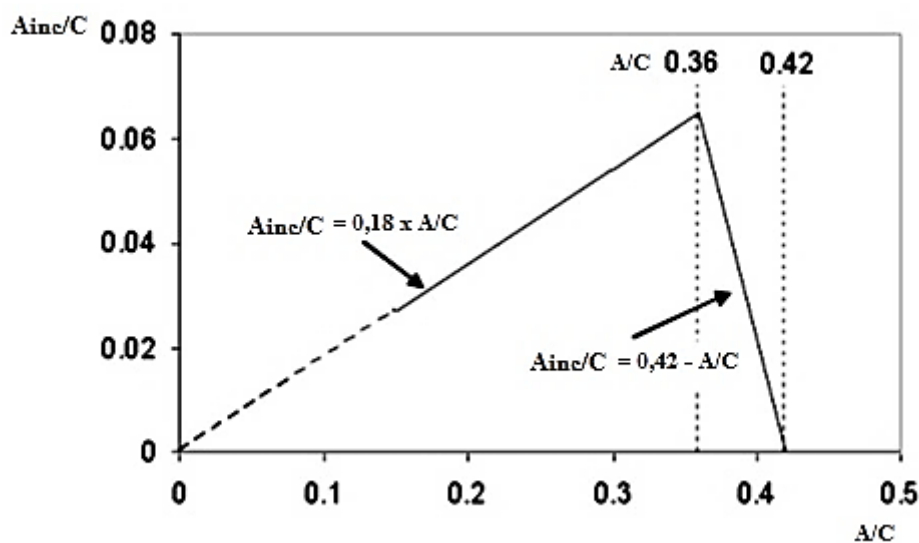


Figura 38 - Quantidade teoricamente necessária de água incorporada em pastas de cimento em função da relação água/cimento, para evitar a autodessecação (JENSEN e HANSEN, 2001)

Da mesma forma as considerações de Jensen e Hansen (2001) foram estendidas por Lura (2003) para uma pasta de cimento com adição de sílica ativa, assumindo que essa adição resulta numa retração química de aproximadamente 22ml para cada 100g de sílica ativa reagida. Isso significa que pastas de cimento com sílica ativa apresentam maior autodessecação e maior retração autógena do que as pastas puras de cimento. Assim sendo, maior quantidade de água incorporada se faz necessária para impedir a retração autógena de pastas com adição de sílica ativa. A Figura 39 apresenta a quantidade de água incorporada, teoricamente necessária, para uma pasta de cimento com diferentes teores de sílica ativa, em função da relação água/cimento (LURA, 2003).

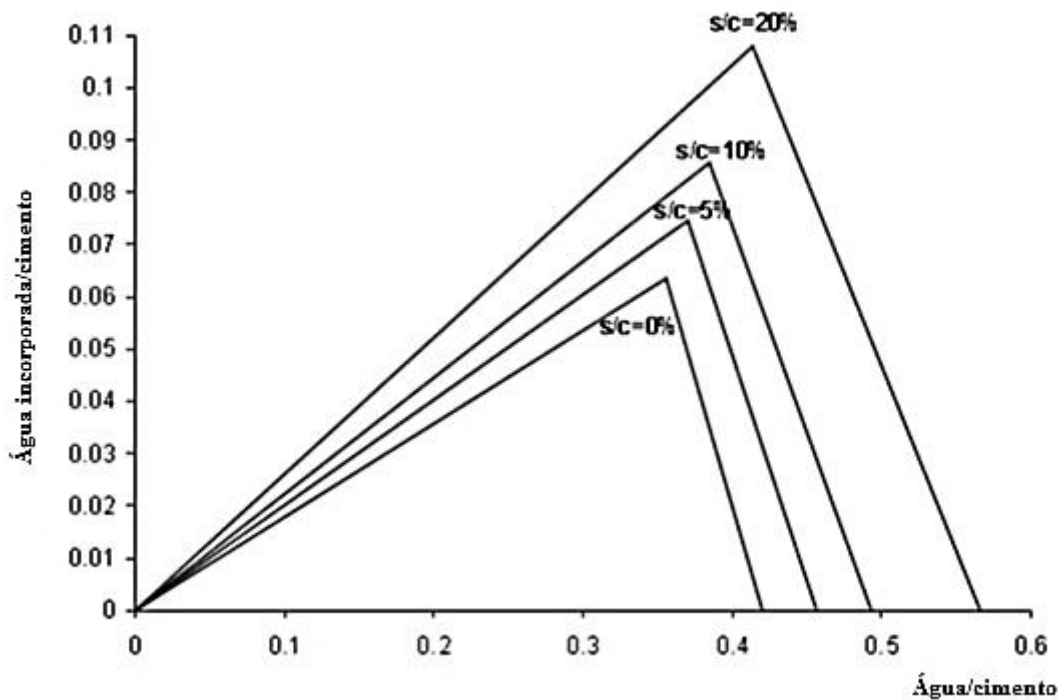


Figura 39 - Relação  $a_{inc}/c$  necessária para evitar a retração autógena em função da relação  $a/c$ , para pastas de cimento com diferentes teores de sílica ativa (LURA, 2003)

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

$$a_{inc}/c = a/c(0,2 + 0,69 s/c)/(1,12 + 0,88 s/c) \quad \text{se } (a/c) \leq (0,36 + 0,28 s/c) \quad (15)$$

$$a_{inc}/c = (0,42+0,73 s/c) - a/c \quad \text{se } (0,36+0,28 s/c) \leq (a/c) \leq (0,42+0,73 s/c) \quad (16)$$

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

A partir das equações (15) e (16), pode se determinar teoricamente a relação água incorporada/cimento para evitar a retração autógena de uma pasta de cimento com adição de sílica ativa. Por exemplo, para uma relação água/cimento igual a 0,30, em uma mistura que tenha relação sílica/cimento ( $s/c$ ) igual a 10%, a relação água incorporada/cimento ( $a_{inc}/c$ ) necessária para eliminar a retração autógena é 0,067. Esse valor será usado no desenvolvimento do programa experimental do presente estudo.

Jensen e Hansen (2002) realizaram determinações de variação autógena, em condições isotérmicas, em pastas de cimento com e sem a adição de polímeros superabsorventes para comprovar experimentalmente a releitura que fizeram do modelo de Powers (Powers e Brownyard, 1948). Seus resultados são mostrados na Figura 40.

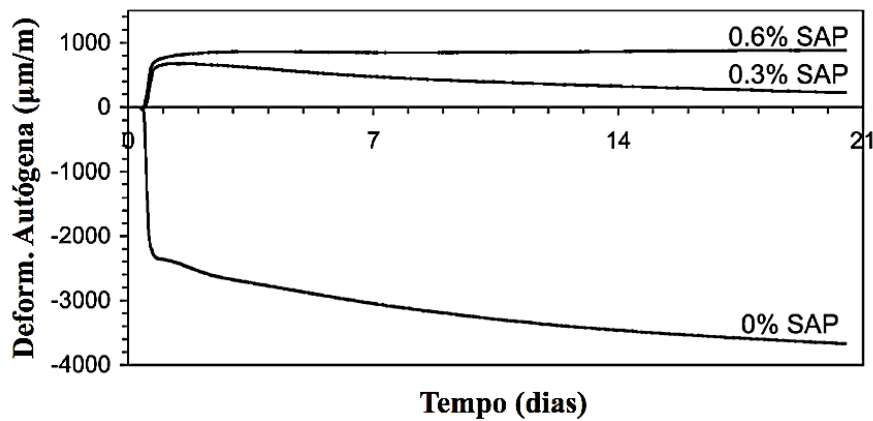


Figura 40 - Deformação autógena para um conjunto de pastas de cimento com relação a/c básica de 0,30 e diferentes teores de adição de polímero superabsorvente (JENSEN e HANSEN, 2002)

Os resultados apresentados por Jensen e Hansen (2002) mostram que é possível mitigar ou até eliminar toda a autodessecação e por consequência a retração autógena das pastas, por meio do fornecimento da água de cura interna pelo polímero superabsorvente. Os resultados de Jensen e Hansen (2002) são de pastas de cimento sem adição mineral, mas outros estudos comprovam a releitura do modelo de Powers para misturas com adição de sílica ativa, como mostra os resultados apresentados na Figura 41 (MANZANO, 2016).

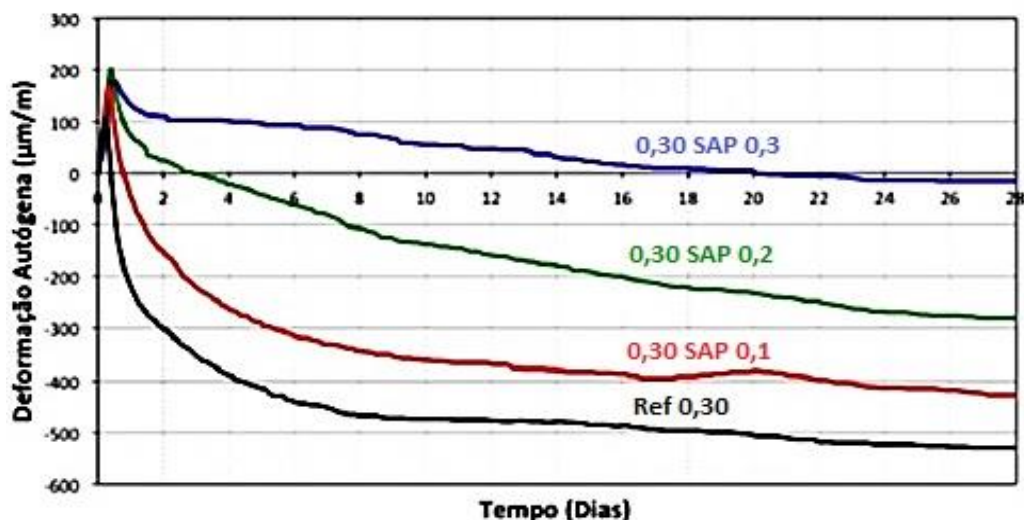


Figura 41 - Resultados de deformação autóloga de argamassas com relação sílica ativa/cimento igual a 0,10 e a/cbásica = 0,30, com diferentes teores de SAP (MANZANO, 2016)

## 2.4 - NANOSSÍLICA

Nanossílica são partículas amorfas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), em escala nanométrica (geralmente entre 1 a 100nm), com uma estrutura não porosa e normalmente na forma esférica (BREGNA e ROBERTS, 2006). A principal diferença entre a nanossílica e a sílica ativa está no tamanho das partículas. O diâmetro médio das partículas da nanossílica varia entre 15 nm e 40 nm (DINTEN, 2000), enquanto que a sílica ativa apresenta diâmetros entre 0,1 e 0,3  $\mu\text{m}$  (LEITE, 2007). A finura extrema da nanossílica também pode ser observada ao comparar a sua área superficial com a de outros materiais reconhecidamente finos, como é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação da finura da nanossílica com outros materiais reconhecidamente finos, por meio da área superficial BET.

Material	Área superficial - BET ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	Fonte
Cimento Portland	300 a 400	(ACI 234-R 2006)
Cinzas volantes	280 a 700	
Escória de alto forno	350 a 600	
Sílica ativa	13.000 a 30.000	
Nanossílica	Até 130.000	BYUNG-WAN <i>et al.</i> , 2007

A nanossílica pode ser comercializada em forma de suspensão em meio líquido ou em pó, mas geralmente, está disponível em forma de suspensão coloidal estável (BREGNA e ROBERTS, 2006; MAGLIANO, 2009). Uma suspensão estável de partículas coloidais

significa que as partículas sólidas não apresentam uma taxa significativa de aglomeração ou sedimentação (BERGNA e ROBERTS, 2006).

Na superfície da partícula de nanossílica existem hidroxilas que lhe conferem polaridade, gerando repulsão entre as partículas e, portanto, evitam a aglomeração das partículas. Assim, formam-se suspensões estáveis por longos períodos de tempo (BJORNSTROM et al., 2004). A Figura 42 mostra a representação esquemática da polarização da superfície de uma partícula de nanossílica (BERGNA e ROBERTS, 2006).

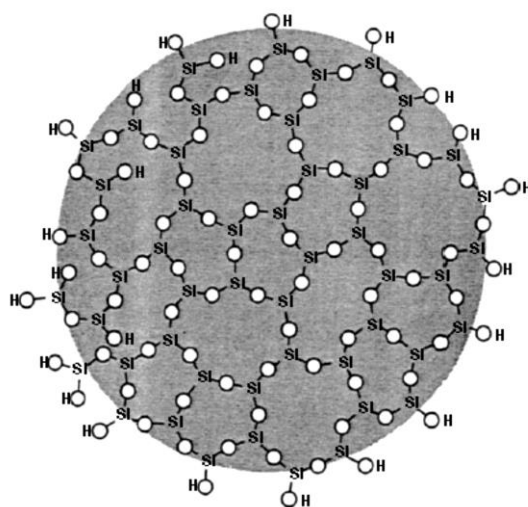


Figura 42 - Representação esquemática da polarização da superfície de uma partícula de nanossílica (BERGNA e ROBERTS, 2006)

A nanossílica coloidal geralmente apresenta concentração de sólidos entre 5 e 40%, densidade entre 1,3 e 2,3 g/cm<sup>3</sup> e pH entre 7 e 10,5. As cores das suspensões variam de transparente a branca, dependendo do tamanho e do teor de sólidos. O pH da suspensão é aspecto extremamente relevante para a estabilização da nanossílica coloidal. Abaixo de pH 7, as partículas de nanossílica coloidal encontram-se aglomeradas, formando gel. Na faixa de pH entre 7,5 e 10,5 as partículas encontram-se em suspensão (DANTAS, 2013).

Atualmente, há diferentes métodos para produzir nanossílica. Um método de produção é um processo solução-gel (via orgânica ou água) em temperaturas ambiente. Nesse processo, os materiais de partida (principalmente Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> e organometálicos como

TMOS<sup>6</sup>/TEOS<sup>7</sup>) são adicionados em um solvente e o pH da solução é mudado, obtendo-se a precipitação de sílica gel. O gel produzido é envelhecido, filtrado e seco até torna-se um *xerogel*<sup>8</sup> (QUERCIA, 2014). Esse *xerogel* é disperso novamente com agentes de estabilização (Na, K, NH<sub>3</sub>, etc.) para produzir uma dispersão concentrada (20 até 40% de sólidos), apropriada para uso em concretos (SOBOLEV et al., 2006).

Um método de produção alternativo é por meio da vaporização da sílica. O método consiste na redução do quartzo (SiO<sub>2</sub>) em temperaturas variando entre 1500 até 2000°C. Por esse método, a nanossílica é produzida como subproduto da produção das ligas de silício metálico e de ferro silício, onde é coletada por condensação. A nanossílica produzida por esse método consiste em partículas esféricas com diâmetro médio de 150nm e área específica entre 15.000 até 35.000 m<sup>2</sup>/kg (QUERCIA, 2014).

Estevez et al. (2009 *apud* QUERCIA, 2014) desenvolveram um método biológico para produção de nanossílica. Nesse método, os pesquisadores alimentaram minhocas vermelhas da Califórnia com casca de arroz e obtiveram a nanossílica a partir do processamento térmico do húmus digerido pelas minhocas. São obtidas partículas esféricas com diâmetro variando entre 55nm e 245nm, dependendo da temperatura de calcinação. A eficiência do processo é de 88% (QUERCIA, 2014).

A nanossílica também pode ser produzida pelo método da precipitação. Por esse método, a nanossílica é precipitada de uma solução em temperaturas entre 50 até 100°C e é denominada sílica precipitada. O método usa diferentes matérias primas como por exemplo silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), cinza de casca de arroz e silicato de magnésio (SAKKA e KOSUKO, 2000; THUADAIJ e NUNTIYA, 2008; QUERCIA, 2014).

Outro método alternativo para produção de nanossílica tem combinado olivina<sup>9</sup> e ácido sulfúrico. Dessa combinação uma sílica amorfa muito fina (partículas entre 6 e 30nm) e

---

<sup>6</sup> TMOS abreviatura de Tetrametoxisilano, também chamado de Silicato de metilo, Silicato de tetrametilo ou Ortosilicato de tetrametilo. Fórmula molecular: C<sub>4</sub>H<sub>12</sub>O<sub>4</sub>Si

<sup>7</sup> TEOS abreviatura de Tetraetoxisilano, também chamado de Silicato de etilo, Silicato de tetraetilo, Ortosilicato de tetraetilo ou Tetraetil ortosilicato. Fórmula molecular: C<sub>8</sub>H<sub>20</sub>O<sub>4</sub>Si

<sup>8</sup> O produto obtido da secagem de um gel por evaporação em condições normais resulta em um gel seco chamado de xerogel (BREGNA e ROBERTS, 2006)

<sup>9</sup> Olivina é um grupo de minerais da família dos nesossilicatos cujos membros são constituídos por silicatos de magnésio e ferro, com fórmula molecular (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

elevada pureza é precipitada. Esse método consome menos CO<sub>2</sub> do que a produção da sílica ativa, portanto, é chamado de um método sustentável (LAZARO et al., 2012).

### 2.4.1 - Efeitos da nanossílica nas propriedades dos concretos e argamassas

Assim como outras adições minerais, a nanossílica pode produzir efeitos químicos e físicos na microestrutura dos concretos e argamassas. O efeito químico está associado à reação pozolânica, que é a capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Os efeitos físicos são o aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas nano partículas de sílica (efeito *nanofiller*) e o refinamento do tamanho de poro e grão, causado pelas nano partículas de sílica que podem agir como pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação. Esses efeitos químicos e físicos promovem uma melhoria significativa nas características dos concretos e argamassas, refletindo num aumento de desempenho tanto sob o ponto de vista mecânico como de durabilidade (DAL MOLIN, 2005; QUERCIA, 2014). Na Figura 43 é mostrada uma representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas.

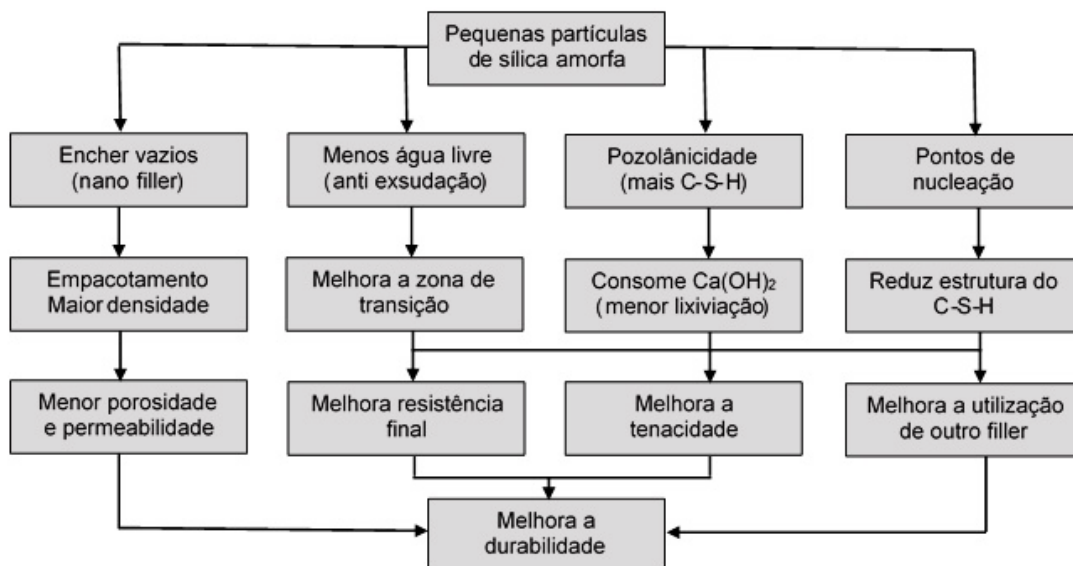


Figura 43 - Representação esquemática dos efeitos da adição de nanossílica em concretos e argamassas (QUERCIA, 2014)

Alguns pesquisadores também atribuem as melhorias das propriedades (resistência e durabilidade) dos concretos e argamassas ao efeito da aceleração da hidratação da pasta



de cimento provocado pela nanossílica (SOBOLEV et al., 2006; SENFF et al., 2009). A nanossílica não só se comporta como agente de melhoria da microestrutura, mas também, como um ativador para acelerar as reações pozolânicas do compósito (SCRIVENER e KIRKPATRICK, 2008). O efeito da aceleração das reações de hidratação está relacionado com a elevada área superficial das partículas de nanossílica, que funcionam como pontos de nucleação para a precipitação do C-S-H. Por outro lado, de acordo com Bjornstrom et al. (2004), ainda não foi determinado se a mais rápida hidratação do cimento na presença de nanossílica é devido à sua reatividade química por meio de dissolução (atividade pozolânica) ou à sua considerável área superficial. Santos *et al.* (2016) confirmaram que a nanossílica acelera às reações de hidratação ao observarem que traços de argamassas com 1 e 2% de nanossílica apresentaram uma redução no tempo zero de 54 e 55%, respectivamente, em comparação ao traço de referência.

Ji (2005) estudou o efeito da nanossílica sobre a permeabilidade à água do concreto e sobre sua microestrutura. Diferentes misturas de concreto foram avaliadas incorporando partículas de nanossílica de diâmetro variando de 10 a 20nm (área superficial de 160 m<sup>2</sup>/g). Os resultados do ensaio mostram que a nanossílica pode melhorar a microestrutura e reduzir a permeabilidade à água do concreto endurecido. Lin et al. (2008) também mostraram que a permeabilidade e o tamanho dos poros diminuem com a adição de nanossílica.

A análise da microestrutura do concreto por diferentes técnicas eletrônicas de microscopia, revelaram que a microestrutura do concreto com nanossílica é mais uniforme e compacta do que o concreto sem adição (BJÖRNSTRÖM et al, 2004; QING et al., 2007; JI, 2005; LIN et al, 2008; SENFF et al., 2009; SENFF et al., 2010). Ji (2005) demonstrou que a nanossílica reage com Ca(OH)<sub>2</sub>, reduz o seu tamanho e quantidade, tornando, assim, a zona de transição entre a pasta de cimento endurecida e agregado mais densa. Isto significa que a adição de nanossílica reduz a taxa de lixiviação de cálcio de pastas de cimento e, por conseguinte, aumenta sua durabilidade (QING et al, 2007; GAITERO et al., 2008).

O efeito mais comumente relatado da nanossílica é o impacto sobre as propriedades mecânicas dos concretos e argamassas. Como foi explicado anteriormente, a adição de nanossílica aumenta a densidade, reduz a porosidade e melhora a ligação entre a matriz

de cimento e agregados (LI, 2004; SOBOLEV e FERRARA, 2005a; GREEN, 2006; SOBOLEV et al, 2006; QING et al., 2007; LIN et al., 2008; SENFF, et al., 2010). Como consequência produz concreto que mostra maiores resistências à compressão e à flexão (SOBOLEV e FERRARA, 2005b; NANOFORUM REPORT, 2006).

Shih et al. (2006) adicionaram nanossílica com diâmetro médio de 20nm em pasta de cimento e verificaram que as propriedades mecânicas foram melhoradas, chegando a um aumento de 43% de resistência à compressão com adição de 0,6% de nanossílica, em relação à massa de cimento. Estes autores afirmaram que, em função da área de superfície muito grande, a nanossílica reage muito rapidamente com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado adicional. Por esta razão, a contribuição da nanossílica adicionada no aumento da resistência da pasta de cimento endurecida se torna evidente já nas primeiras idades. Eles observaram que o valor ótimo de adição de nanossílica, ou seja, a concentração de nanossílica que apresentou os maiores valores de resistência à compressão, foi 0,6%. Com 0,8% os valores de resistência à compressão foram inferiores. Segundo Senff (2009), o ganho de resistência nas primeiras idades ocorre devido a uma ligeira aceleração na hidratação do cimento, enquanto nas idades finais pode ser atribuído principalmente à reação pozolânica.

Li et al. (2004) avaliaram argamassas sem adição de nanossílica em comparação com argamassas com adição de 3%, 5% e 10% de nanossílica em relação à massa de cimento. Nos resultados, eles obtiveram aumento da resistência à compressão de 13,8%, 17,0% e 26,0%, respectivamente com o aumento do teor de nanossílica, em relação à argamassa sem adição. Os autores concluem que, o incremento da resistência, provavelmente, ocorre devido ao fato das partículas de sílica estarem uniformemente dispersas e, com isso, funcionam como pontos de nucleação para a precipitação dos produtos da hidratação do cimento, promovendo e acelerando as reações, devido à sua alta atividade.

Santos (2016) constatou que, aos 7 dias de idade, a adição de 1% e 2% de nanossílica, em relação à massa de cimento, causou um incremento de 4% e 17%, respectivamente, na resistência à compressão quando comparado com os resultados da argamassa sem adição de nanossílica. Aos 28 dias de idade, esse incremento foi de 8% e 12%. A pesquisadora também avaliou os efeitos da adição de nanossílica na resistência à tração na flexão e verificou que a adição de nanossílica causou um aumento de 13% e 16% dessa

propriedade, aos 7 dias, para os teores de 1% e 2% de adição de nanossílica, respectivamente. Já aos 28 dias, esse aumento foi de 14% e 31%. Rao et al. (2015) também observaram um aumento da resistência à flexão de argamassas com a adição de nanossílica quando comparado com as misturas de referências.

Santos (2016) alega que as melhorias nessas propriedades proporcionado pela nanossílica ocorre devido à aceleração da hidratação e a formação de grandes quantidades de C-S-H. Além disso, as nano partículas se acumulam nos poros disponíveis, formando uma estrutura mais compacta. Outra razão para este comportamento é o fato da nanossílica comportar-se não só como material de enchimento para melhorar a microestrutura, mas também como um ativador para promover as reações pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio e levando a uma maior precipitação dos produtos hidratados, tornando a microestrutura homogênea, densa e compacta.

Abreu et al. (2014) observaram em seus resultados um aumento significativo do módulo de deformação para concretos com adição de nanossílica. Os resultados de Santos (2016) confirmam essa observação. Em seus resultados, as argamassas com adição de nanossílica apresentaram um aumento médio de 12% no módulo de deformação em comparação com as argamassas sem nanossílica (SANTOS, 2016).

Bragança et al. (2015) ao compararem concretos sem adição de nanossílica e com adição de 1%, em massa, de nanossílica, não observaram variação das propriedades de módulo de deformação, resistência mecânica à compressão axial e à tração diametral entre o padrão de referência e o concreto com adição. No entanto, os resultados mostraram que o concreto com adição de nanossílica, proporcionou a obtenção de materiais de baixa permeabilidade, com menor índice de vazios e absorção de água inferior, destacando o efeito da adição como nanofiller e no aumento da densidade da zona de transição da interface pasta/agregado.

Moraes e Lopes (2010) também observaram experimentalmente que a adição de nanossílica não contribuiu positivamente para o crescimento da resistência à compressão do concreto. Nos três traços analisados, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias de idade, as menores resistências foram observadas justamente para o concreto com adição de nanossílica. Além disso, foram analisadas as taxas de crescimento das resistências dos

concretos entre 7 e 28 dias de idade e, segundo este critério, o concreto com adição de nanossílica também apresentou os piores resultados, uma taxa média de menos de 3% de crescimento entre as duas idades. Rao et al. (2015) também concluíram em seus estudos que a taxa de crescimento da resistência à compressão diminuiu com a adição de nanossílica.

Alguns estudos (DINTEN, 2000; MORAES, 2012; ABREU et al., 2014; LÉON et al., 2015a; LÉON et al., 2015b) têm evidenciado que o efeito da nanossílica é potencializado quando está combinada com a sílica ativa, uma vez que mistura de partículas de tamanho micro e nano proporciona melhoria no fator de empacotamento das partículas, contribuindo para a diminuição da porosidade do concreto e melhorando, assim, suas propriedades mecânicas.

Os estudos realizados por Dinten (2000) mostraram que a mistura binária (adição de 7,5% de sílica ativa e 5% de nanossílica) apresentou a maior resistência à compressão nas primeiras idades. No entanto, de acordo com os resultados aos 28 dias, o concreto com adição única de sílica ativa alcançou o valor de resistência mais elevado, com resultado 33% maior do que o do concreto de referência. Já a mistura binária, aos 28 dias, havia elevado a resistência à compressão do concreto de referência em 18% e, a nanossílica por si só, não teve desempenho considerável, tendo incrementado este valor em apenas 4,5%. O resultado não satisfatório da nanossílica foi creditado pela autora ao fato de que não havia sido descontada da água de amassamento do concreto a água presente na solução de nanossílica utilizada.

Os resultados de Moraes (2012) confirmaram os benefícios esperados para a adição simples de nanossílica em concretos com resistências acima de 40 MPa (relações água/aglomerante menores que 0,52), mas mostraram que a melhor situação consiste na adição conjunta de sílica ativa e nanossílica. O concreto com a adição conjunta superou o concreto de referência para resistências a partir de 36 MPa (relações água/aglomerante menores que 0,615). Acredita-se que, quando se administram em conjunto as duas adições silicosas, a nanossílica atue principalmente formando pontos de nucleação na mistura, enquanto a sílica ativa, além de exercer a maior fração da atividade pozolânica, contribua significativamente para o empacotamento das partículas, posto que apresenta granulometria intermediária entre o cimento e a nanossílica. Desta forma, obtêm-se, além

de uma quantidade maior de compostos resistentes através da reação pozolânica e da formação de pontos de nucleação para hidratação do cimento, a otimização do empacotamento, de forma que a graduação heterogênea e constante da granulometria possibilita melhor densidade de empacotamento.

Abreu et al. (2014) obtiveram resultados de resistência à compressão de concretos somente com adição de nanossílica e desta combinada com sílica ativa. O traço somente com nanossílica obteve um acréscimo na resistência de 29% aos 3 dias, 20% aos 7 dias e 9% aos 28 dias, em relação ao traço de referência. Já o traço com a mistura de nanossílica e sílica ativa obteve um aumento de 30% aos 3 dias, 37% aos 7 dias e 24% aos 28 dias. León et. al. (2015a; 2015b) ao combinar nanossílica com sílica ativa obtiveram incrementos de resistência à compressão de 36%, ao comparar com concretos sem nenhuma adição e, em média, 18% ao comparar com concretos com somente uma das duas adições. Os autores consideraram que este aumento de resistência se deve mais a uma homogênea distribuição granulométrica dos componentes do que ao tamanho das partículas das adições.

O efeito da adição de nanossílica nas propriedades dos concretos e argamassas depende da natureza da adição (suspensão coloidal ou pó seco) e do teor de adição. Apesar de haver vários estudos envolvendo a aplicação da nanossílica em materiais cimentícios, ainda existem controvérsias no que diz respeito à quantidade ideal de nanossílica a ser utilizado nas misturas. Alguns afirmam que as percentagens adequadas deveriam ser baixas, em torno de 1% até 3% (SHIH et al., 2006; LI et al., 2006; KONTOLEONTOS et al., 2012; HOU et al., 2013), enquanto outros afirmam que o teor poderia ser de 3% a 5% (BJÖRNSTRÖM, 2004; JO et al., 2007). Ainda há aqueles que utilizaram até 12% (JO et al., 2007). Quercia (2014) chama a atenção que, com a adição de nanossílica, a retração autógena devido à autodessecação aumenta, como mostra a Figura 44 (SANTOS, 2016), por conseguinte, resultando em um potencial maior de fissuração. Para evitar este efeito e, também, para compensar os efeitos negativos da cura interna por meio do uso de polímeros superabsorventes, começam a surgir estudos combinando esses dois novos materiais (POURJAVADI et al., 2012; SANTOS, 2016).

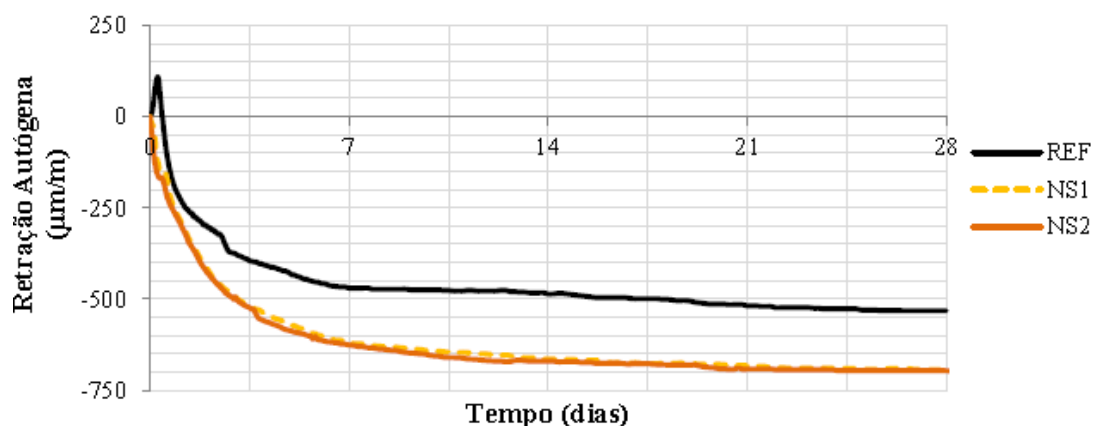


Figura 44 - Evolução da retração autógena ao longo do tempo para misturas de argamassas com 1% (NS1) e 2% (NS2) de nanossílica, em relação à massa de cimento, em comparação com traço de referência (SANTOS, 2016)

#### 2.4.2 - Efeito combinado da adição de nanossílica e polímero superabsorvente

Pourjavadi et al. (2012) e Santos (2016) são os únicos trabalhos encontrados na literatura que combinam a adição de nanossílica e de polímero superabsorvente e avaliam seus efeitos sobre algumas propriedades das argamassas. No entanto, apenas o trabalho de Santos (2016) apresenta resultados de medidas da deformação autógena com esses dois materiais.

Santos (2016) estudou argamassas de alta resistência de relação água/cimento igual a 0,30, com adição de dois teores de polímero superabsorvente combinados com dois teores de adição de nanossílica, em suspensão coloidal. Os teores de polímero superabsorvente foram 0,2% e 0,3% (em relação à massa de cimento), enquanto que os teores de nanossílica foram 1% e 2% (em relação à massa de cimento). Os resultados revelam que a adição de nanossílica nas misturas contendo polímero superabsorvente causou um incremento na resistência à compressão. No entanto, este aumento não foi suficiente para compensar toda a perda de resistência causada pela adição do polímero. Apenas para ilustrar, o melhor resultado de ganho de resistência, nas misturas contendo polímero superabsorvente, aconteceu para a mistura com 0,3% de polímero superabsorvente e 1% de nanossílica, aos 28 dias. Nesta mistura, a resistência à compressão diminuiu cerca de 16% em relação à mistura de referência (sem polímero e sem nanossílica), sendo que, na mistura contendo apenas 0,3% de polímero, sem adição de nanossílica, a porcentagem de redução da resistência foi de 30%, ou seja, praticamente o dobro deste valor. Portanto, a adição de 1% de nanossílica foi capaz de recuperar apenas metade da resistência mecânica

perdida (SANTOS, 2016). Cabe destacar que as comparações de Santos (2016) foram realizadas com a mistura de referência de relação água/cimento sem levar em consideração a água extra de cura interna. Acredita-se que, caso as comparações fossem realizadas com uma mistura de referência que levasse em consideração a água extra incorporada nas misturas com a presença de SAP, os resultados dessas misturas poderiam apresentar melhores desempenhos.

Pourjavadi et al. (2012), utilizaram a nanossílica em pó para melhorar as propriedades mecânicas de pastas contendo polímero superabsorvente. Foram desenvolvidas misturas contendo dois teores de nanossílica (0,5% e 1,0% em relação à massa de cimento) e dois teores de polímero superabsorvente (0,1% e 0,3% em relação à massa de cimento). No estudo, os autores verificaram que os teores de adição de nanossílica empregados foram suficientes para compensar o efeito negativo do polímero superabsorvente sobre a resistência à compressão das pastas. Deve-se destacar, porém que a perda de resistência causada pelo polímero utilizado foi praticamente desprezível, em comparação com a porcentagem de redução relatada na literatura.

Na resistência à tração na flexão, os resultados de Santos (2016) mostraram que a adição de nanossílica é capaz de compensar, em sua totalidade, a perda de resistência causada pelo polímero superabsorvente, atingindo valores inclusive superiores aos valores de referência para a mesma idade, indicando que a nanossílica é promissora na promoção da resistência à tração, mesmo na presença do polímero. Por outro lado, no estudo de Pourjavadi et al. (2012), a resistência à tração na flexão foi totalmente compensada somente para as amostras contendo 1% de nanossílica.

De modo similar ao ocorrido na resistência à tração na flexão, os resultados dos módulos de deformação obtidos por Santos (2016) para as misturas contendo polímero superabsorvente e nanossílica, também superaram os valores da mistura de referência, indicando a capacidade da nanossílica em compensar as perdas causadas pelo polímero.

Santos (2016) observou que a retração autógena nos traços com a adição combinada de polímero superabsorvente e nanossílica foi consideravelmente menor que o valor da argamassa de referência, mostrando a capacidade do polímero em mitigar a retração autógena mesmo com a presença da nanossílica, como mostra a Figura 45.

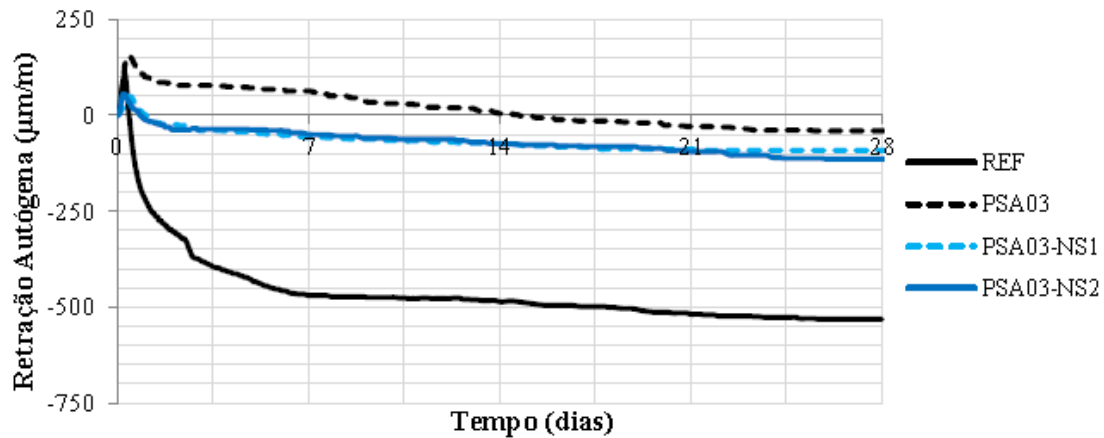


Figura 45 - Resultados de retração autóloga ao longo do tempo para misturas contendo 0,3% de SAP e diferentes teores de nanossílica (1% e 2% de NS), em comparação com o traço de referência (SANTOS, 2016).

## 2.5 - DEFORMAÇÃO DO CONCRETO SOB CARGA CONSTANTE

A deformação total do concreto exposto ao ambiente sob um carregamento constante é dividida em três componentes: deformação devido à retração, deformação elástica inicial e deformação lenta ou fluência. A deformação devido à retração foi objeto de estudo no capítulo que tratou das variações volumétricas nos meios cimentícios e não serão mais discutidas aqui. As mudanças dimensionais devido às variações de temperatura também não estão incluídas.

A Figura 46 apresenta esquematicamente a deformação do concreto ao longo do tempo, exposto ao ambiente, para um carregamento e descarregamento de compressão. No instante  $T_0$  (transição suspensão-sólido) aparecem as deformações devido à retração (autógena e secagem). No instante  $t_1$  é aplicado um carregamento de compressão, de imediato ocorre uma deformação específica do concreto. Grande parte dessa deformação inicial é completamente recuperada quando da retirada do carregamento no instante  $t_2$ , essa parcela de deformação recuperável é chamada de deformação elástica inicial. A deformação inicial que ocorre no instante  $t_1$ , apresenta uma pequena parcela de deformação não recuperável quando se processa a retirada da carga, essa deformação faz parte da fluência irreversível e é chamada de deformação plástica ou fluência inicial. A partir do instante  $t_1$  ocorre um crescimento gradual das deformações do concreto que estão associadas com a manutenção de uma carga constante ao longo do tempo. Essas deformações são denominadas de deformação lenta ou simplesmente fluência. A deformação por fluência se caracteriza por apresentar uma parte de deformação



reversível, denominada de deformação elástica retardada ou atrasada, e outra parte de deformação irreversível, denominada de deformação viscosa. Para simplificar, o comportamento da deformação por fluência é denominado como deformação viscoelástica (NEVILLE, 1997; SANTOS, 2011; ASSMANN, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

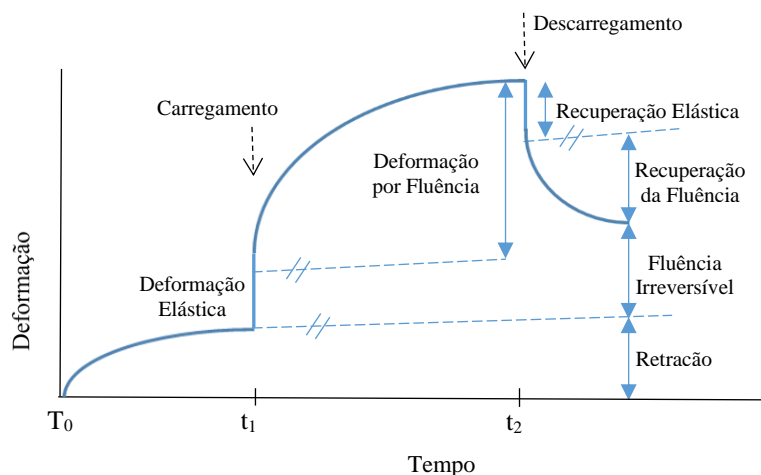


Figura 46- Representação esquemática da deformação do concreto ao longo do tempo, exposto ao ambiente e sob condições de carregamento constante

É difícil separar com precisão a deformação elástica imediata e a fluência inicial, mas isso não tem grande importância, pois o que interessa é a deformação total ao longo do tempo devido à aplicação da tensão (NEVILLE, 1997). Sabendo que o módulo de deformação do concreto aumenta com a idade, Neville (1997) afirma que a fluência deveria ser determinada apenas como a deformação ao longo do tempo, que excede a deformação elástica inicial.

Considerando as deformações que ocorrem no concreto submetido a uma tensão constante, conforme descrição anterior, as deformações são classificadas em reversível e irreversível, e também em função do momento em que aparecem em instantânea ou dependente do tempo, conforme mostra a Tabela 8 (NEVILLE, 1997).

Tabela 8 - Tipos de deformação sob o efeito de carregamento (NEVILLE, 1997)

Tipo de deformação	Instantânea	Dependente do Tempo
Reversível	Elástica	Elástica retardada ou atrasada
Irreversível	Plástica	Viscosa

A fluência é dividida em fluência básica e fluência por secagem. A fluência básica representa a deformação do concreto ao longo do tempo submetido a uma tensão constante sob condição de umidade relativa interna constante. A fluência por secagem representa a deformação do concreto ao longo do tempo submetido a uma tensão constante em conjunto com um gradiente de umidade, ou seja, o concreto está carregado e em processo de secagem (HASPARYK et. al. 2005; SANTOS, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014). O efeito combinado da fluência básica e da fluência por secagem é denominado de fluência total. A Figura 47 representa esquematicamente as fluências básica e por secagem em função da umidade, combinadas com as possíveis deformações por retração.

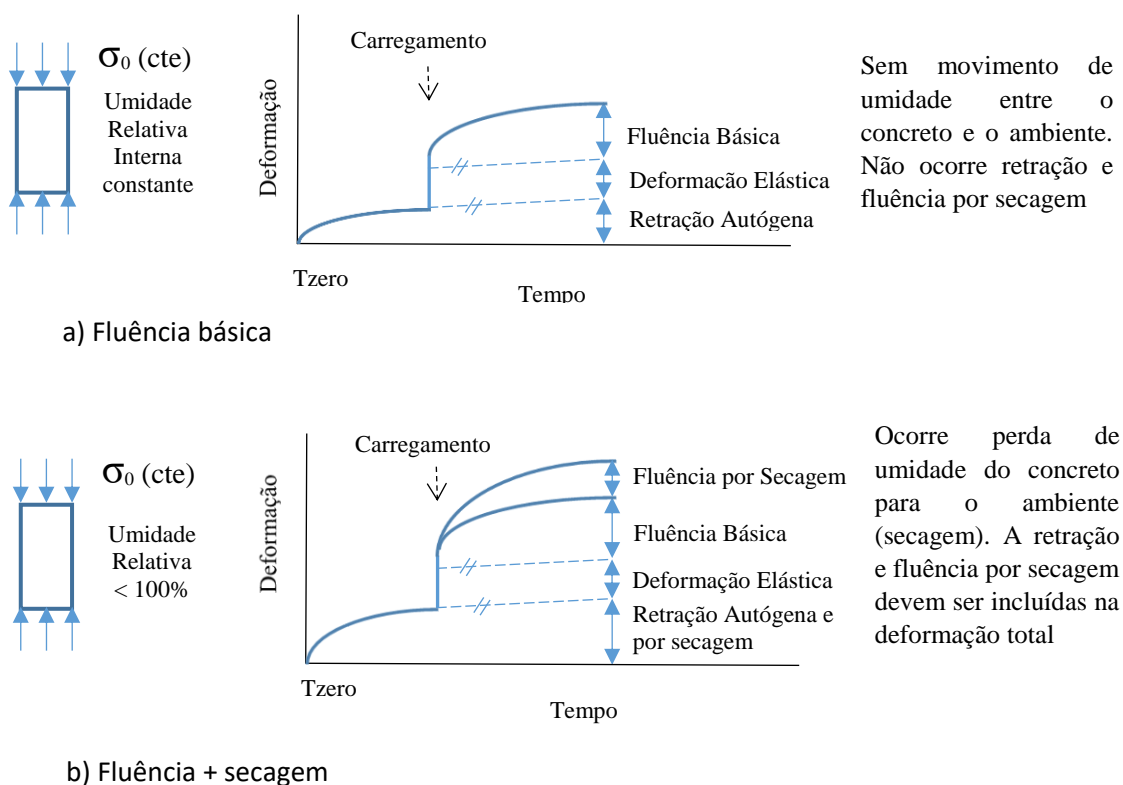


Figura 47 - Combinação de condições de umidade, fluência e retração (Adaptado de Mehta e Monteiro, 2014)

Sendo a fluência por secagem resultante de um processo de secagem, depende das dimensões e forma das amostras e se admite que pode atingir um valor limite a longo

prazo. Por outro lado, há dúvida se a fluência por secagem, para um período de tempo indefinido, acabará ou não. Encontra-se na literatura informações que indicam que, mesmo após 30 anos, ainda ocorrem pequenos incrementos de deformações de fluência por secagem no concreto (ACI, 2005). No entanto, essa questão não é relevante, na prática, uma vez que o aumento da deformação por fluência torna-se menor com tempo e, geralmente, se admite que a fluência tende a um valor assintótico limite (NEVILLE, 2007; VELASCO, 2008; ASSMANN, 2013).

Em geral a fluência é representada, pela fluência específica, pela função de fluência ou pelo coeficiente de fluência. A fluência específica é definida como a deformação por fluência por unidade de tensão, é expressa em  $\text{MPa}^{-1}$  e calculada por:

$$\text{Fluência específica} = \frac{\text{Deformação por fluência}}{\text{Tensão}} \quad (17)$$

A função de fluência é a deformação total devido ao carregamento (deformação elástica inicial mais deformação por fluência) na idade  $t$  por unidade de tensão, causada por uma unidade de carga uniaxial constante aplicada desde a idade de carregamento  $t_0$ , expressa em  $\text{MPa}^{-1}$  e calculada por:

$$J(t, t_0) = \frac{(\text{deformação elástica inicial} + \text{deformação por fluência})}{\text{Tensão}} \quad (18)$$

onde,

$J$  – função de fluência;

$t$  – idade do concreto;

$t_0$  – idade do concreto no início do carregamento.

O coeficiente de fluência é definido como a relação entre a deformação por fluência e a deformação elástica inicial. Por definição o coeficiente de fluência é uma grandeza adimensional.

### **2.5.1 - Mecanismo da fluência**

Várias teorias têm sido elaboradas para explicar os mecanismos da fluência do concreto. No entanto, cada teoria considerada individualmente não é capaz de explicar todo o

fenômeno da fluência. Sabe-se, porém, que o mecanismo de fluência está centrado na pasta de cimento hidratada, sendo relacionada, principalmente, com a remoção da água adsorvida que, sendo expulsa sob carga, provoca como consequência a deformação do concreto (ACI, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A água na pasta endurecida está presente em poros de diferentes dimensões. A remoção da água presente nos poros com dimensões inferiores a 50nm pode causar grande deformação do meio cimentício, enquanto que as consequências da remoção da água presente em poros maiores do que 50nm não são tão graves (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A Tabela 9 apresenta um intervalo dimensional dos poros em uma pasta cimentícia, assim como as propriedades que podem ser afetadas.

Tabela 9 - Classificação dos poros em pastas de cimento hidratadas (adaptada de Young et al., 1988; Mehta e Monteiro, 2014)

Denominação	Diâmetro	Descrição	Função da água	Propriedades da pasta que são afetadas
Vazios de ar aprisionado	> 100µm	--	--	Resistência mecânica e permeabilidade
Vazios de ar incorporado	10µm - 100µm	--	--	Resistência mecânica e permeabilidade
Poros Capilares	50nm - 10µm	Capilares grandes (macroporos)	Comporta como água livre	Resistência mecânica e permeabilidade. A remoção da água não causa retração
	10nm – 50nm	Capilares médios (mesoporos)	Gera moderada forças de tensão superficial	Retração por secagem e fluência
	2,5nm – 10nm	Capilares pequenos (microporos)	Gera fortes forças de tensão superficial	Retração por secagem e fluência
Poros de Gel	< 2,5 nm	Espaço interlamelar	Água interlamelar ou água de gel. Retida por pontes de hidrogênio	A remoção da água contribui para a retração por secagem e fluência

Os efeitos da movimentação higroscópica no interior dos poros do concreto, induzidos pela aplicação de uma tensão, é tanto maior quanto mais jovem for o concreto e quanto menos rígida for a pasta. Esse mecanismo ocorre de forma mais significativa nos primeiros 10 dias, recebendo, portanto, a denominação de fluência de curta duração (*short term creep*) (GUÉNOT-DELAHAIE, 1996; ULM e ACKER, 1997).

A movimentação da água adsorvida no interior dos poros pressupõe que, ao longo do tempo, há uma redução na espessura das camadas de água adsorvida, até um nível onde não é possível se verificar mais qualquer redução, mesmo sob tensão. No entanto, observa-se que a deformação por fluência continua acontecendo em idades muito avançadas (por exemplo, acima de 30 anos). Assim sendo, pode se admitir que a fluência de longa duração (*long term creep*) está relacionada a outros fatores que não sejam à percolação interna da água e sim, mais provavelmente, ao escoamento ou escorregamento viscoso entre as lâminas de C-S-H (NEVILLE, 1997; VELASCO, 2008; KATAOKA, 2010; SANTOS, 2011).

A água entre as camadas de C-S-H está fortemente ligada por pontes de hidrogênio e, em idades avançadas, encontra-se sob elevado estado de concentração de tensões. Aplicando algum esforço externo ao material, as lamelas de C-S-H tendem a se deslocar sob o efeito de cisalhamento uma em relação a outra, promovendo à relaxação da estrutura porosa do gel de C-S-H e levando ao efeito da fluência de longa duração. Essa deformação por cisalhamento das lamelas de C-S-H pode explicar a parcela irreversível da fluência (BAZANT et al., 1997; SANTOS, 2011).

Além da movimentação da umidade nos poros do concreto e do deslizamento entre as lamelas do C-S-H, a microfissuração da zona de transição devido a retração por secagem e também devido a não linearidade da relação tensão-deformação no concreto, especialmente em níveis de tensão maiores do que 30 a 40% da tensão última, e à ocorrência de resposta elástica atrasada no agregado, são outras razões que podem contribuir para o fenômeno da fluência no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Bazant (1999) relacionou sete mecanismos físicos que permitem fazer inferências para a modelagem matemática adequada de previsão de fluência:

1. A solidificação como mecanismo de envelhecimento, particularmente nas primeiras idades;

2. A relaxação de “*microprestress*<sup>10</sup>” como um mecanismo de envelhecimento prolongado;
3. Rupturas de ligações causadas por excitações térmicas influenciadas por tensões controladas pela energia de ativação;
4. Difusão de água dos poros;
5. Tensão superficial, capilaridade, adsorção livre e impedida, e pressão de disjunção;
6. Fissuração causada por tensões de acomodação e aplicação de cargas;
7. Processos químicos que causam variação autógena e *microprestress*.

Mais informações sobre os mecanismos da fluência do concreto podem ser consultadas em Bazant (1988), Bazant e Prasannan (1989), Bazant e Carol (1993) e Tanabe et al. (2008).

### **2.5.2 - Fatores Influentes**

A deformação por fluência do concreto é influenciada por diversos fatores relacionados entre si. Algumas características da fluência são resultado das características intrínsecas do concreto, outras das condições externas (NEVILLE, 1997; ACI, 2005; KATAOKA, 2010; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os fatores influentes da fluência podem ser separados em dois grupos chamados de fatores primários e fatores secundários. O grupo dos primários reúne todos os fatores que estão diretamente relacionados com a origem da fluência. Os principais efeitos primários são materiais e dosagem, umidade do concreto, temperatura e idade do concreto, idade de início de carregamento, nível e forma de carregamento. O grupo dos efeitos secundários reúne os demais fatores que, de alguma forma, interferem nos fatores primários, destacando as condições ambientais externas e a geometria da estrutura (SANTOS, 2011)

---

<sup>10</sup> *Microprestress* é a relaxação de uma tensão transversal normal da microestrutura do C-S-H (BAZANT et al., 1997)

Apesar do agrupamento de fatores influentes, existe interações entre esses fatores que, ainda que estejam dentro do mesmo grupo (primário ou secundário), são complexas e não são compreendidas facilmente, demonstrando a dificuldade em se analisar os efeitos de cada um deles isoladamente. Os fatores são apresentados e discutidos separados, a seguir, apenas com o propósito de compreender suas importâncias relativas (SANTOS, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

### 2.5.2.1 - Efeito do materiais e dosagem

Avaliar o efeito da dosagem na fluência não é uma tarefa simples uma vez que, na dosagem do concreto, não é possível alterar um dos fatores sem alterar também pelo menos mais um outro. No entanto, algumas influências são evidentes (NEVILLE, 1997).

A fonte principal da fluência do concreto é a pasta endurecida de cimento e a sua hidratação. Maiores volumes de pasta geram maiores valores de fluência em concretos com a mesma resistência, embora uma relação direta não exista porque a restrição contra a deformação exercida pelos agregados tem uma grande influência na magnitude da deformação. A influência do volume de pasta sobre a fluência do concreto é mostrada na Figura 48.

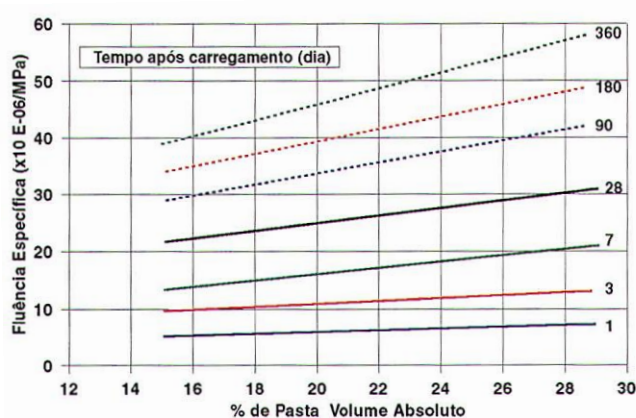


Figura 48 - Influência do volume de pasta da mistura na fluência do concreto. Relação a/c 0,70; Idade de carregamento 28 dias; agregado granito (FURNAS, 1997)

A influência do volume de pasta na fluência também pode ser observada por meio da concentração do teor de agregados na mistura, uma vez que um acréscimo no teor de agregados representa uma redução no volume de pasta e, portanto, uma diminuição da fluência. A Figura 49 mostra uma relação entre a fluência básica e o volume de agregados.

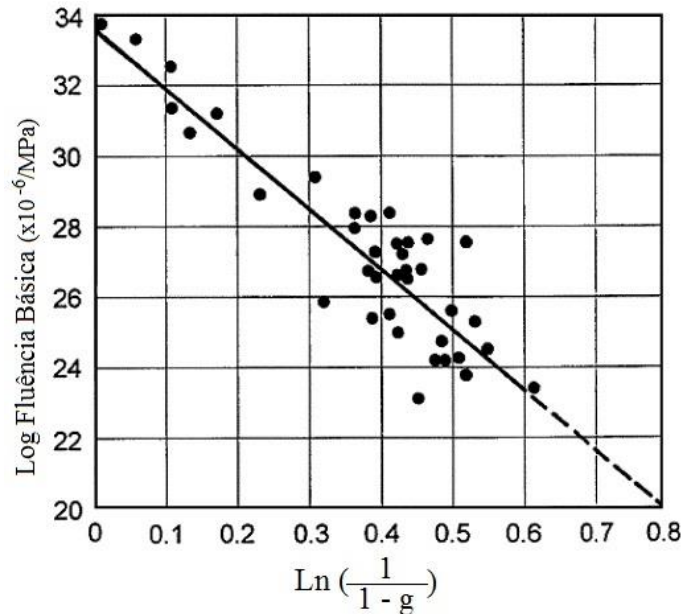


Figura 49 – Relação entre fluência básica e teor de agregados, onde g é a concentração de agregado (ACI, 2005)

Em relação ao agregado, devido à grande variedade de tipos mineralógicos, é muito difícil estabelecer conclusões generalizadas sobre o efeito dos diversos tipos sobre a fluência. No entanto, concretos com o mesmo traço apresenta fluência diferente, dependendo do tipo de agregado utilizado. De modo geral, concretos produzidos com agregados cujo módulo de deformação é maior apresentam menor fluência. O efeito do tipo de agregado sobre a fluência é mostrado na Figura 50.

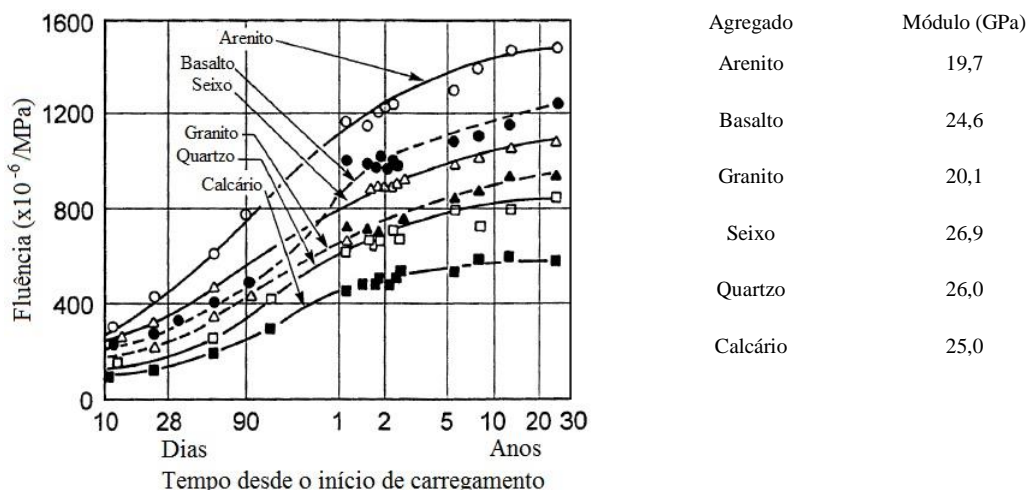


Figura 50 - Fluência de concreto com traços iguais, preparados com diversos agregados, carregados aos 28 dias de idade, temperatura 21°C, umidade relativa 50% (ACI, 2005)

Seara-Paz et al. (2016) estudaram a fluência de concretos com relação água/cimento 0,50 e 0,65, produzidos com agregados com diferentes teores de agregados reciclados (0%,



20%, 50% e 100%), obtidos a partir da demolição de concretos, constituídos basicamente de agregados com argamassa aderida. Os resultados mostraram que a fluência específica de concretos com agregados reciclados é maior do que a do concreto convencional, com incrementos de 51% e 73% para os concretos com relação água/cimento 0,50 e 0,60, respectivamente, e 100% de agregado reciclado. Os concretos com relação água/cimento 0,50 apresentaram coeficientes de fluência semelhantes, exceto para o caso de 100% de agregado reciclado, que mostrou um aumento de 30% em relação ao do concreto convencional. Para o caso dos concretos com relação água/cimento 0,65, os coeficientes de fluência aumentam com a percentagem de substituição de agregado, sendo que para 100% de agregado reciclado o coeficiente de fluência é 43% maior que o concreto convencional.

Outras características da dosagem como a relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de aditivo e adições também pode influenciar significativamente a fluência (SANTOS, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A relação água/cimento tem uma relação direta sobre a fluência. Para concretos com o mesmo consumo de cimento, o aumento da relação água/cimento além de aumentar a porosidade, significa maior quantidade total de água armazenada no concreto e, portanto, maior fluência do concreto (ACI, 2005; BOTASSI et al., 2010), como mostra a Figura 51.

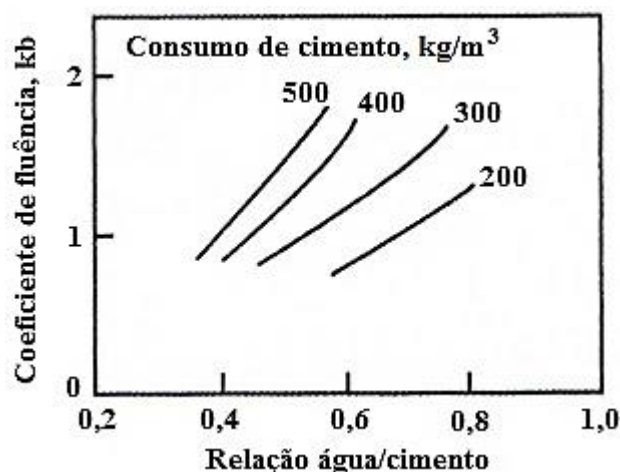


Figura 51 - Efeito da relação água/cimento na fluência (MEHTA e MONTEIRO, 2014)

O tipo de cimento pode influenciar o comportamento da fluência do concreto. Mudanças na finura e composição química do cimento afetam a taxa de hidratação e o desenvolvimento da resistência mecânica, conseqüentemente, qualquer comparação de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, devem levar em consideração a influência do tipo de cimento sobre a resistência no momento de aplicação da carga (NEVILLE, 1997). Quando carregados nas primeiras idades, o concreto contendo cimento Portland comum, geralmente, apresenta fluência maior do que o concreto correspondente produzido com cimento Portland de alta resistência inicial, como mostra a Figura 52 (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

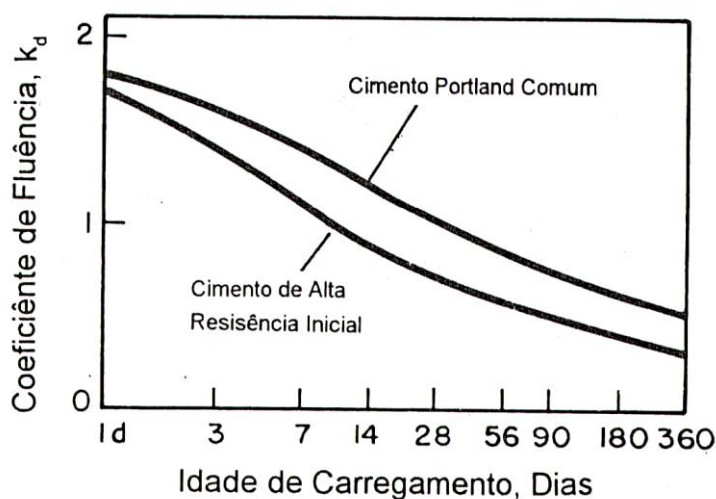


Figura 52 -Efeito do tipo de cimento na fluência (MEHTA e MONTEIRO, 2014)

A finura do cimento tem efeito sobre a evolução da resistência nas primeiras idades e, portanto, sobre a fluência. Segundo Neville (1997), cimentos extremamente finos, com área específica de até  $740\text{m}^2/\text{kg}$ , apresentam uma fluência maior, mas após um ou dois anos de carregamento, uma fluência menor. Provavelmente, isso se deve ao aumento da resistência do cimento mais fino, resultando em uma redução da relação tensão/resistência.

Neville (1997) relata que aditivos redutores de água e retardadores podem aumentar a fluência básica. Indica ainda que os aditivos à base de lignossulfato resultam em fluência maior do que aqueles à base de ácidos carboxílicos. Qian et. al. (2016) investigaram as influências de plastificantes à base de naftaleno e superplastificantes à base de ácido policarboxilato sobre a fluência do concreto, incluindo a fluência básica e a fluência por

secagem. Os resultados mostraram que os superplastificantes de ácido policarboxilato refinam os poros capilares, reduzem a tensão superficial da solução de poros e também restringem a difusão da umidade interna e, portanto, a fluência do concreto é reduzida. Em comparação com o plastificante à base de naftaleno, o superplastificante à base de ácido provoca uma maior redução da fluência por secagem, mas uma redução menor da fluência básica. Na condição selada a umidade interna atinge o equilíbrio mais rapidamente e a influência da difusão da água nos poros torna-se fraca, portanto, o efeito do superplastificante à base de ácido policarboxilato na fluência básica é muito menor. A Figura 53 mostra a influência dos aditivos redutores de água na fluência.

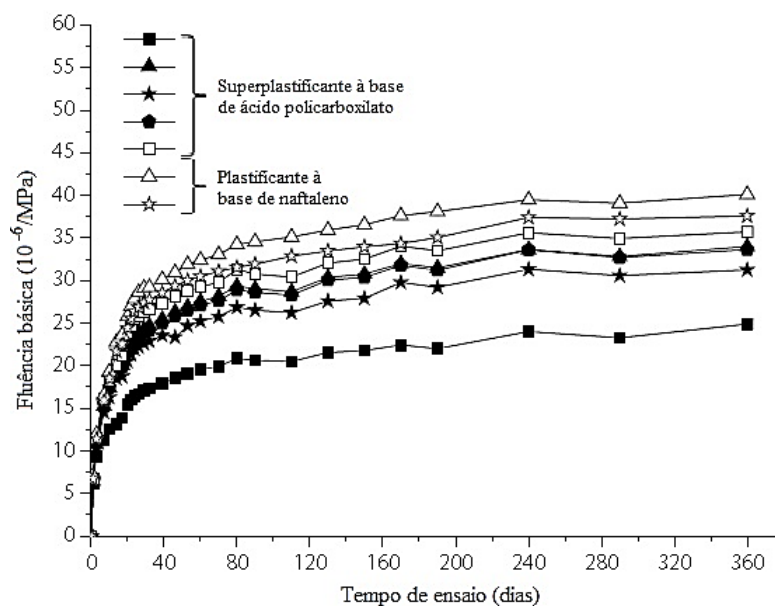


Figura 53 - Influência dos aditivos redutores de água sobre a fluência do concreto. Relação água/aglomerante 0,30; idade de carregamento 7 dias; umidade relativa do ar  $(60 \pm 5) \%$ ; temperatura  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  (QIAN et. al., 2016)

No que se refere a interferência das adições minerais sobre a fluência do concreto, Huo et al. (2001) observaram baixos valores do coeficiente de fluência para concretos com adição de sílica ativa e cinza volante. Li et al. (2002) também constataram que a adição de sílica ativa e de escória de alto forno reduzem a fluência específica do concreto. Por outro lado, Santos (2011) observou que a fluência básica de concreto com adição de escória de alto forno, na proporção de 50% em volume de cimento, foi 300% superior à dosagem de referência, na idade de início de carregamento de 1 dia, enquanto que a dosagem com argila calcinada apresentou uma fluência básica 58% superior do que a referência nessa mesma idade. Já na idade de 7 dias, todos os concretos com adição de

escória de alto forno, argila calcinada e metacaulim apresentaram fluência básica menor do que o concreto de referência em quase 200% na média.

Shariq et al. (2016) estudaram a fluência em concretos com substituição de cimento por escória granulada de alto-forno. A quantidade de substituição de cimento por escória foi de 20%, 40% e 60% em massa de cimento. Os resultados dos ensaios indicam maior fluência com o aumento da porcentagem de escória. Aos 150 dias de carregamento, os coeficientes de fluência dos concretos com 20%, 40% e 60% de escória foram 16%, 33% e 55% maiores do que o concreto convencional.

### 2.5.2.2 - Efeito da Umidade Relativa do Ambiente

A umidade relativa do ambiente em que o concreto está inserido é um dos fatores mais importantes que afetam a fluência do concreto. Sakata e Ayano (2000) observaram que a fluência total, na idade de 28 dias, é reduzida em aproximadamente 20% ao mudar a umidade relativa do ar de 40% para 70%. Neville (1997) relata que influência da umidade é bem menor ou praticamente inexistente, no caso do concreto já ter atingido o equilíbrio higroscópico com o ambiente, antes da aplicação da carga. Segundo o autor não é a umidade relativa que tem efeito sobre a fluência, mas sim o processo de secagem. A Figura 54 mostra o efeito da umidade sobre a fluência (ACI, 2005).

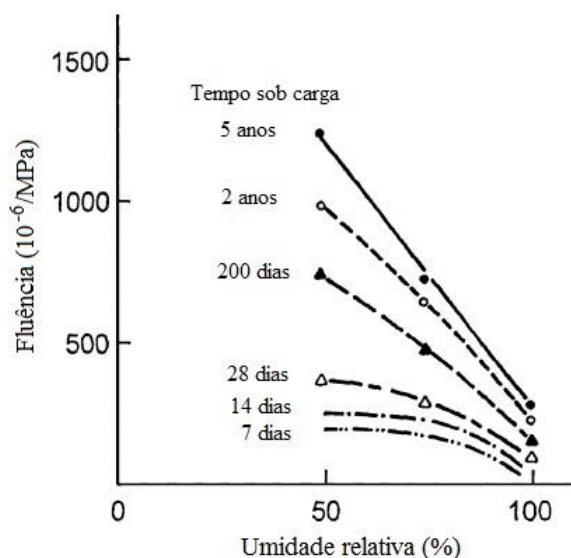


Figura 54 - Efeito da umidade do ar sobre a fluência (ACI, 2005)

### 2.5.2.3 - Efeito da temperatura

O controle da temperatura ao analisar a fluência é fundamental, pois a variação da temperatura pode interferir de forma expressiva nos resultados, não podendo afirmar em situações de grande variabilidade de temperatura ou ensaios conduzidos em diferentes temperaturas, se os efeitos sobre a fluência foram causados pela mudança na temperatura ou devido a outros motivos avaliados (SANTOS, 2011).

O efeito da temperatura a qual o concreto está exposto sobre a fluência depende do momento em que se dá a exposição. Se o concreto é exposto à uma temperatura maior do que a do ambiente, como parte do processo de cura, antes de ser carregado, a fluência será menor do que aquela de um concreto correspondente armazenado à uma temperatura mais baixa. Isso se dá porque temperaturas mais elevadas durante a cura do concreto aceleram as reações de hidratação, aumentando sua resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Por outro lado, a fluência do concreto será tanto maior quanto mais elevada for a temperatura durante o período de aplicação do carregamento, como mostra a Figura 55.

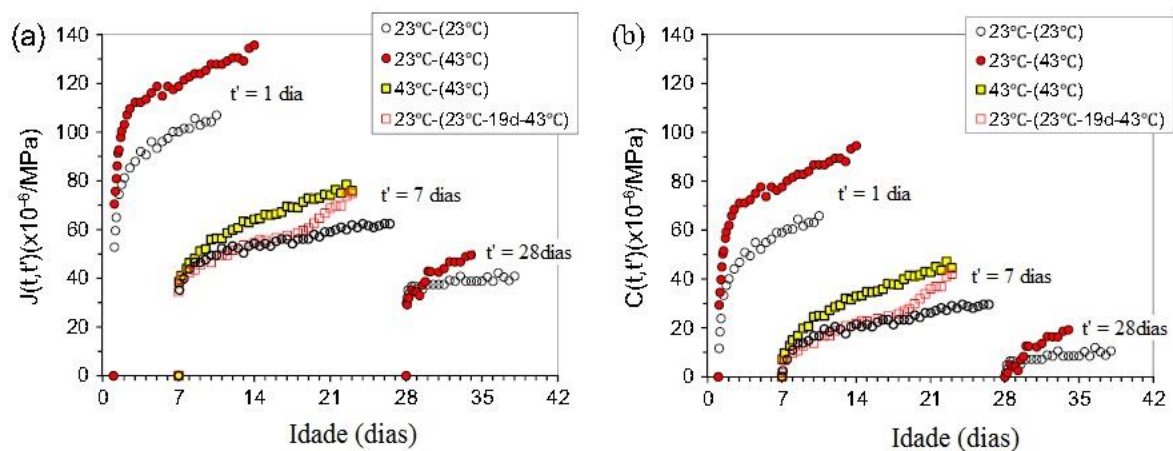


Figura 55 – Desenvolvimento da (a) função de fluência e (b) coeficiente de fluência de concretos sob diferentes idades de carregamento e histórico de temperatura. A temperatura entre o parêntesis indica a temperatura no início do carregamento e a fora do parêntesis a temperatura antes do carregamento (WEI et al., 2016)

O caso de 43°C -7d (43 °C) representa o corpo de prova curado e testado sob temperatura constante de 43 °C. Nota-se que a fluência é maior do que a fluência na condição de temperatura constante a 23 °C-7d (23 °C). O efeito de temperatura é reduzido com o aumento da idade de carregamento. A diferença da fluência entre a temperatura normal e a alta temperatura torna-se menor na idade de carregamento de 28 dias. Um aumento de

temperatura acelera a relaxação entre as camadas da nanoestrutura da pasta de cimento (*microprestress*), o que aumenta a fluência. Por outro lado, a alta temperatura promove a hidratação do cimento e aumenta a rigidez, e assim a fluência é reduzida. Estes são mecanismos concorrentes. O desenvolvimento global da fluência dependerá do mecanismo predominante.

England e Ross (1962) e Arthanari e Yu (1967) concluíram que existe uma relação linear entre a fluência e a temperatura de exposição do concreto durante o carregamento no intervalo de 20 a 80 °C. Sakata e Ayano (2000) afirmam que essa linearidade também pode ser aplicada para temperaturas mais baixas até o limite de 5 °C.

#### **2.5.2.4 - Efeito da idade de início de carregamento**

A fluência será tanto maior quanto mais cedo for a idade de início de carregamento. Esse comportamento está relacionado com o maior grau de hidratação dos concretos com idades mais avançadas, pois estes apresentam estrutura interna mais densa e menos água disponível para o fenômeno da fluência (FURNAS, 1997; KATAOKA, 2010). Pode-se observar na Figura 55 que a fluência na idade de carregamento de 1 dia é quase o dobro do resultado obtido quando do carregamento com a idade de 7 dias (WEI, 2016).

#### **2.5.2.5 - Fluência de concretos com cura interna**

Poucos estudos sobre fluência de concretos com cura interna são encontrados. Rinder (2002) estudou o efeito da cura interna na fluência à tração de um concreto de alto desempenho, substituindo o agregado por argila expandida. As condições de temperatura e umidade relativa do ambiente do ensaio foram, respectivamente,  $(20\pm 2)$  °C e  $(65\pm 2)\%$ . O carregamento das amostras foi aos 28 dias de idade e a relação tensão aplicada/resistência igual a 0,80. A fluência à tração encontrada para o concreto com cura interna foi maior comparada ao concreto produzido com agregado normal. No entanto, o resultado obtido provavelmente se deve ao baixo módulo de deformação do concreto provocado pelo uso da argila expandida.

Outro estudo foi desenvolvido por Cusson e Hoogeveen (2005), que também estudaram a fluência à tração de concreto de alto desempenho com relação água/cimento igual a

0,34. A cura interna foi promovida substituindo até 20% do volume de areia por agregado leve feito de xisto expandido. Os ensaios foram realizados somente nos primeiros sete dias de idade. Dentro desse período de tempo, o coeficiente de fluência à tração foi um pouco aumentado para as misturas com cura interna em comparação com a mistura sem cura interna. Por outro lado, não foram observadas mudanças nos resultados de resistência e de módulo de deformação.

Lopez et al. (2010) examinaram a fluência à compressão de concretos de alto desempenho com relação água/cimento igual a 0,23 com cura interna com agregado leve pré-saturado ou seco com água extra para ser absorvida durante a mistura. Os comportamentos da fluência à compressão dessas misturas foram contrários em comparação com o concreto sem cura interna. A mistura com o agregado leve pré-saturado apresentou uma fluência à compressão em torno de 10% menor do que a fluência do concreto de referência. Por outro lado, a mistura produzida com o agregado leve seco e com água extra apresentou uma fluência maior do que a fluência do concreto de referência. Provavelmente nessa última mistura o agregado leve não absorveu toda a água extra durante a mistura, o que pode ter resultado num concreto com uma estrutura mais porosa.

Recentemente Shen et al. (2017) estudaram os efeitos da cura interna realizada, com agregados leves pré-saturados como agente de cura, sobre a fluência à tração de concretos com diferentes valores de relação água/cimento. Os resultados mostram que as deformações por fluência dos concretos com cura interna foram menores do que as dos concretos sem cura interna.

#### **2.5.2.6 - Efeito do Polímero Superabsorvente**

Na literatura se encontra apenas um estudo sobre o efeito do polímero superabsorvente sobre a fluência do concreto. O estudo em questão foi desenvolvido por Assamann (2013) e os resultados foram publicados por Assamann e Reinhardt (2014). Os pesquisadores estudaram os efeitos do polímero na fluência à tração.

Foi estudada a fluência à tração de três concretos, sendo dois de referência com relação água/cimento igual a 0,36 e 0,42 e a terceira mistura contendo polímero superabsorvente

com relação água/cimento básica 0,36 e teor de água incorporada igual a 0,06 resultando num concreto com relação água/cimento total de 0,42.

O polímero superabsorvente utilizado no estudo era a base de ácido acrílico/acrilamida, formado por partículas irregulares com dimensões variando de 60 a 125 $\mu$ m e capacidade de absorção em fluido alcalino de 24 gramas de fluido/grama de polímero. Os ensaios de fluência à tração foram realizados em um ambiente com temperatura igual a (20 $\pm$ 2) °C e umidade relativa igual a (65 $\pm$ 2) %. A tensão de carregamento foi de 60% da resistência à tração e a idade de carregamento foi aos 28 dias.

Os resultados mostraram que, o concreto com água incorporada por meio do polímero superabsorvente, apresentou uma significativa redução na fluência à tração quando comparado com o concreto de referência com relação água/cimento igual a 0,42. A fluência à tração do concreto contendo polímero superabsorvente foi comparável à fluência do concreto com relação água/cimento igual a 0,36, como mostra a Figura 56.

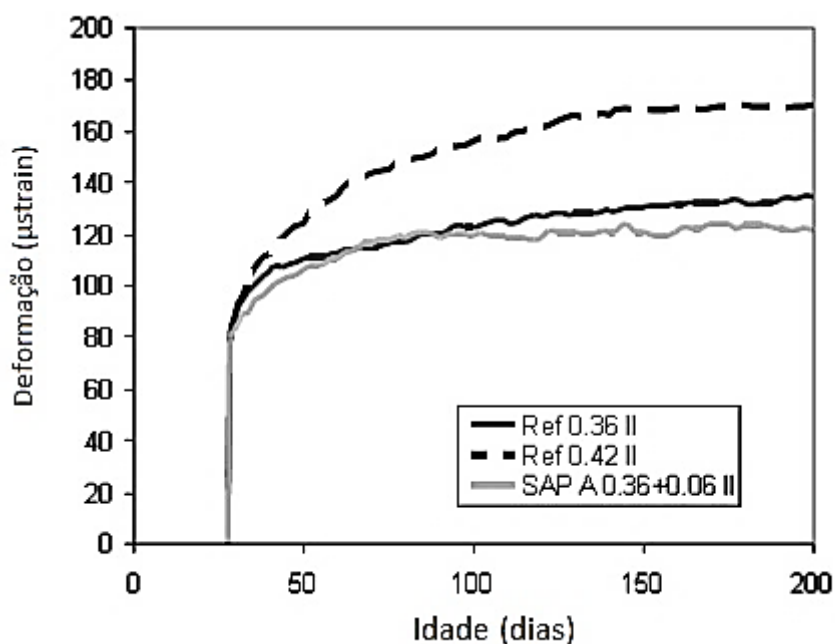


Figura 56 - Comportamento da fluência básica à tração de concreto com polímero superabsorvente comparado com duas referências (ASSMANN e REINHARDT, 2014)



### **3.0 - PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Este capítulo tem por objetivo descrever o programa experimental, apresentando os fatores controláveis e as variáveis de resposta, os materiais utilizados na produção dos concretos e argamassas, bem como as propriedades no estado fresco e endurecido e os métodos de ensaios empregados.

Para avaliar os objetivos estabelecidos foram estudados os efeitos, em concreto de alta resistência, da:

- (i) Incorporação de água por meio da adição de polímero superabsorvente (SAP);
- (ii) adição de nanossílica e
- (iii) combinação de ambos.

O programa experimental foi desenvolvido na Gerência de Serviços Tecnológicos de Engenharia de Furnas Centrais Elétricas S.A., localizada em Aparecida de Goiânia – GO, e no Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), localizado em Lisboa.

### **3.1 - Variáveis do Estudo**

#### **3.1.1 - Variáveis Independente ou Variáveis de Controle**

As variáveis independentes ou de controle são os parâmetros que podem influenciar as características e propriedades das misturas do estudo. O presente estudo apresenta as seguintes variáveis independentes:

- Relação água incorporada/cimento –  $a_{inc}/c$  - (0; 0,045 e 0,067);
- Teor de adição mineral nanossílica – NS - (0%; 1% e 2%).

A associação das variáveis relação água incorporada/cimento ( $a_{inc}/c$ ) e teor de adição mineral nanossílica (NS) forma uma matriz 3x3, resultando numa combinação de 9 diferentes situações de estudo, todas com relação água/cimento ( $a/c$ ) igual a 0,30.

A relação água incorporada/cimento refere-se à quantidade de água incorporada que será adicionada na mistura para a cura interna, tendo o polímero superabsorvente como agente de cura interna. Assim, as misturas que possuem água de cura interna apresentam relação água/cimento igual a 0,30 e relação água incorporada/cimento igual a 0,045 ou a 0,067. Ao fazer o somatório da relação água/cimento com esses valores de relação  $a_{inc}/c$  se obtém 0,345 e 0,367, essas somas são denominadas de relação água/cimento total. Então, entende-se por relação água/cimento total ( $a/c_{total}$ ) a soma da relação  $a_{inc}/c$  e da relação água/cimento básica ( $a/c_{básica}$ <sup>11</sup>).

Para permitir a comparação das misturas com a mesma relação  $a/c_{básica}$  e com a mesma relação  $a/c_{total}$  foram adicionadas a matriz 3x3 mais duas situações de estudo, sem adição de nanossílica e sem água incorporada, com relação água/cimento igual a 0,345 e a 0,367, resultanto em 11 situações de estudo, como é mostrado na Figura 57.

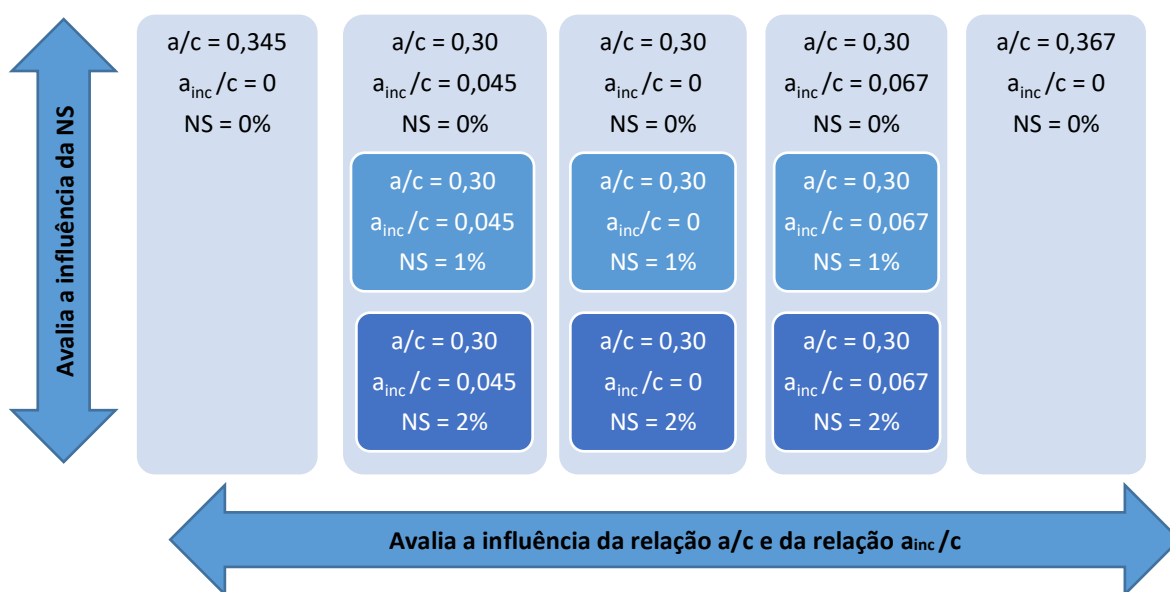


Figura 57 - Combinação das variáveis independentes do estudo

A Tabela 10 apresenta a nomenclatura adotada para identificação de cada traço do estudo.

<sup>11</sup> O termo relação água/cimento básica ( $a/c_{básica}$ ) refere-se a relação água/cimento tradicionalmente conhecida, sendo a relação entre a quantidade de água da mistura e a quantidade de cimento.

Tabela 10 - Nomenclatura adotada no presente estudo para identificação dos traços

Traço		Variáveis Independentes			
		Relação água/cimento básica $a/C_{básica}$ (kg/kg)	Relação água incorporada/cimento $a_{inc}/c$ (kg/kg)	Relação água/cimento total $a/C_{Total}$ (kg/kg)	Teor de Nanossílica (%)
1	REF 0,30	0,30	0	0,30	0
2	SAP(0,30+0,045)	0,30	0,045	0,345	0
3	REF 0,345	0,345	0	0,345	0
4	SAP(0,30+0,067)	0,30	0,067	0,367	0
5	REF 0,367	0,367	0	0,367	0
6	0,30 1NS	0,30	0	0,30	1
7	0,30 2NS	0,30	0	0,30	2
8	SAP(0,30+0,045)1NS	0,30	0,045	0,345	1
9	SAP(0,30+0,045)2NS	0,30	0,045	0,345	2
10	SAP(0,30+0,067)1NS	0,30	0,067	0,367	1
11	SAP(0,30+0,067)2NS	0,30	0,067	0,367	2

### 3.1.2 - Variáveis de Resposta ou dependentes

As variáveis de resposta ou dependentes são as características ou propriedades relacionadas ao comportamento dos concretos 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 dos concretos no estado fresco, no estado endurecido e caracterização da microestrutura.

No estado fresco os concretos foram caracterizados pelas seguintes propriedades:

- Consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBR NM 67/1998)
- Massa específica e teor de ar (NBR 9833/2008)
- Tempo zero (Método proposto por SILVA, 2007)

No estado endurecido os concretos foram caracterizados pelas seguintes propriedades:

- Resistência à compressão (NBR 5739/2007);
- Resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222/2011);
- Módulo de deformação (NBR 8522/2008);
- Retração por secagem (ASTM C157);
- Fluência (NBR 8224/2012);
- Variação autógena;
- Microestrutura.

A técnica utilizada para a avaliação da microestrutura dos concretos foi a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), associada à Espectrografia por Dispersão de Energias (EDS).

Na Figura 58 é mostrada uma representação esquemática das variáveis de resposta do estudo.

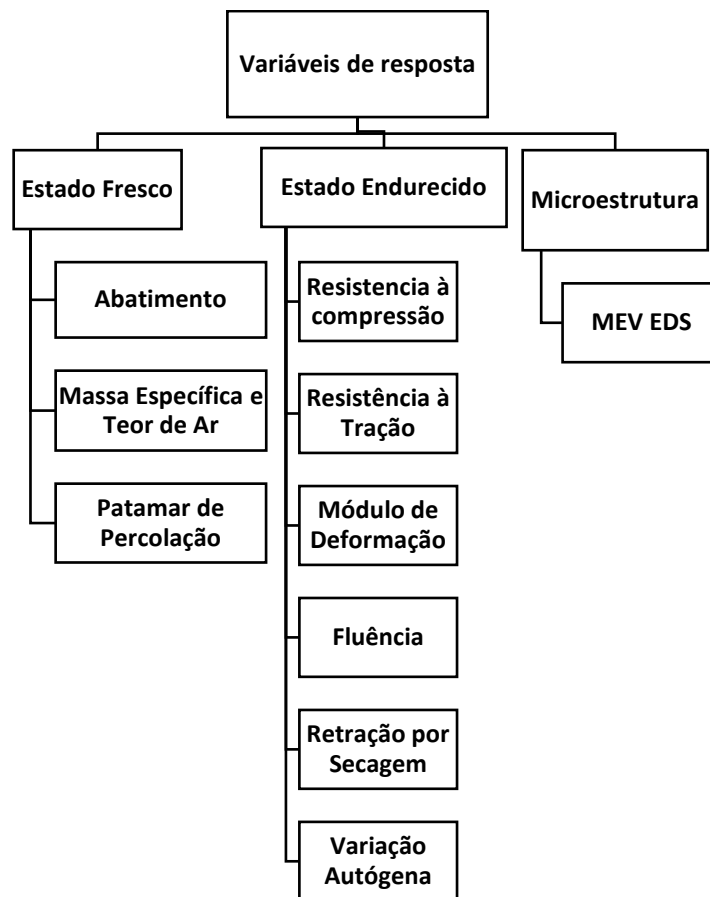


Figura 58 – Representação esquemática das variáveis de resposta do estudo

### 3.2 - Matriz Experimental

Na Tabela 11 é apresentada a combinação das variáveis de respostas e independentes em uma matriz experimental, indicando as determinações que foram realizadas em cada situação de estudo.

Tabela 11 - Matriz experimental do estudo

Traço	Variáveis Independentes			Variáveis de resposta											
	Relação a/c <sub>básica</sub> (kg/kg)	Relação a <sub>inc</sub> /c (kg/kg)	Teor de NS (%)	Estado fresco				Estado endurecido					Estrutura Interna		
				Abatimento	Ar Aprisionado	Densidade	Tempo zero (T <sub>0</sub> )	Compressão	Tração	Módulo	Fluência	Ret. Autógena	Ret. Secagem	MEV EDS	
REF 0,30	0,30	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SAP(0,30+0,045)	0,30	0,045	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
REF 0,345	0,345	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SAP( 0,30+0,067)	0,30	0,067	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
REF 0,367	0,367	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
0,30 1NS	0,30	0	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,30 2NS	0,30	0	2	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
SAP(0,30+0,045)1NS	0,30	0,045	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SAP(0,30+0,045)2NS	0,30	0,045	2	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
SAP(0,30+0,067)1NS	0,30	0,067	1	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
SAP(0,30+0,067)2NS	0,30	0,067	2	X	X	X	X	X	X	X		X	X		

Para ensaio de microestrutura foram escolhidos os traços REF 0,30, REF 0,345, SAP(0,30+0,045), 0,30 1NS e SAP(0,30+0,045)1NS. Esses traços foram escolhidos para permitir a comparação da estrutura interna de uma mistura com polímero com as referências de mesma relação a/c<sub>básica</sub> (0,30) e mesma relação a/c<sub>total</sub> (0,345) e também os efeitos da adição de 1% de nanossílica e a sua combinação com o polímero. A necessidade de escolha se deu em função dos custos para realização dos ensaios.

### **3.3 - Materiais Empregados**

Para desenvolvimento do programa experimental foram empregados os seguintes materiais:

#### **a) Aglomerante Hidráulico**

O Aglomerante hidráulico utilizado na produção dos concretos foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V ARI (NBR 5733). Na produção das argamassas foi empregado o cimento Portland CEM I 42,5 de acordo com a norma EN 197-1(CEN, 2000). Ambos aglomerantes apresentam baixo conteúdo de adição mineral e, conseqüentemente, elevado teor de clínquer Portland ( $\geq 95\%$ ).

As caracterizações físicas, químicas e mecânicas dos aglomerantes utilizados são mostradas no Apêndice A.

#### **b) Sílica Ativa**

A sílica ativa utilizada, tanto para a produção dos concretos como para produção das argamassas, é um resíduo da fabricação de silício-metálico, comercialmente disponível em pó, do tipo não densificada. As caracterizações físicas e químicas das sílicas são mostradas no Apêndice A.

#### **c) Agregado Miúdo**

O agregado miúdo utilizado na produção dos concretos foi areia natural lavada proveniente do depósito aluvial do Rio Corumbá, situado na região de Pires do Rio-GO, a cerca de 220 Km de Brasília. A escolha do agregado miúdo se deu com base em sua distribuição granulométrica, buscou-se uma composição contínua, dentro da zona utilizável e mais próxima da zona ótima, conforme critérios da NBR 7211/2009. A caracterização do agregado miúdo é mostrada no Apêndice A. A curva granulométrica da areia utilizada na produção dos concretos é mostrada na Figura 59.

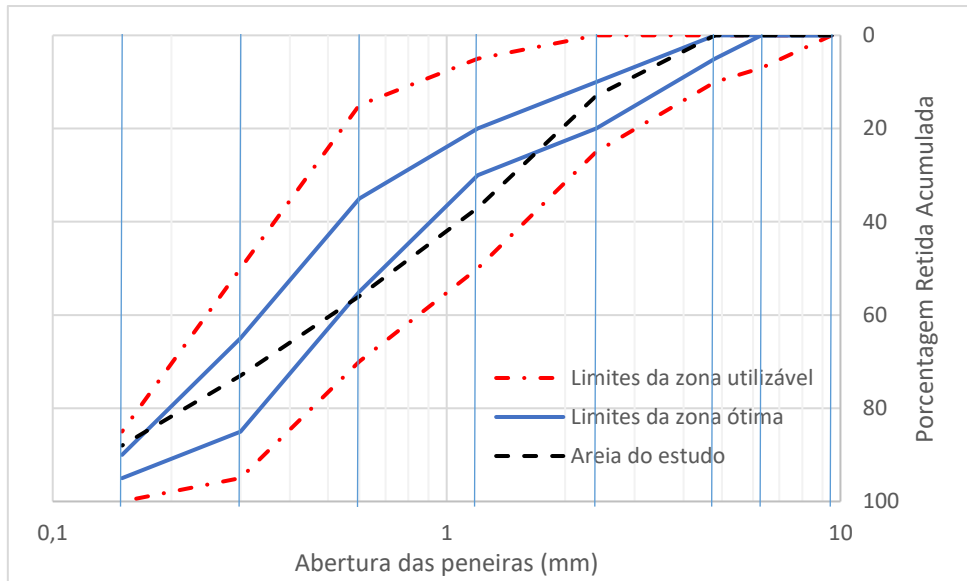


Figura 59 - Curva granulométrica da areia utilizada na produção dos concretos

Para produção das argamassas, utilizando frações de areia padrão da norma EN 196-1 (CEN, 2016), foi preparado um agregado miúdo de tal forma que apresentasse uma curva granulométria o mais próximo possível da curva da areia empregada na produção dos concretos. A Figura 60 mostra a curva granulométrica do agregado miúdo preparado para a produção das argamassas em comparação com a curva da areia natural empregada na produção dos concretos

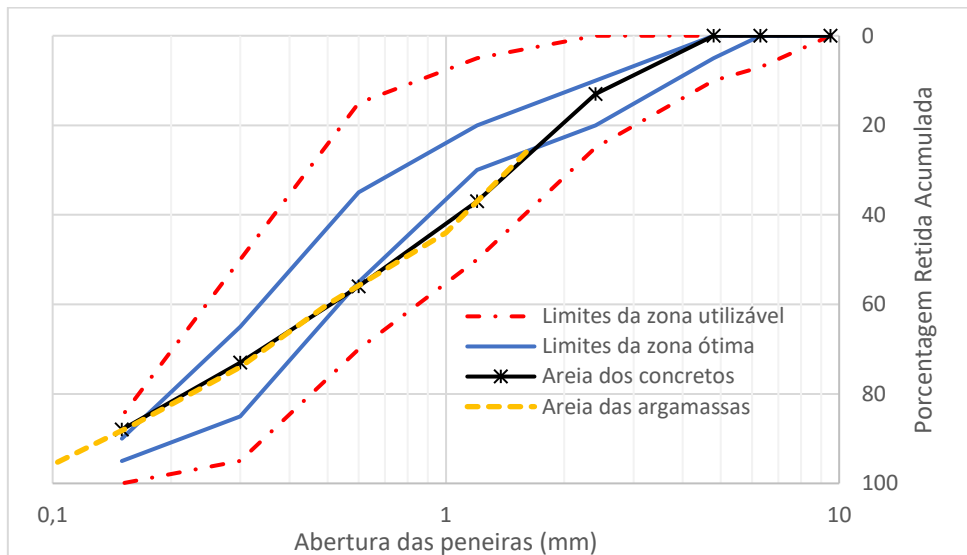


Figura 60 - Curva da composição de agregado miúdo preparada com as frações do padrão europeu, em comparação com a curva granulométrica da areia natural empregada na produção dos concretos

#### d) Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na produção dos concretos foi de graduação zero, proveniente do britamento de uma rocha do tipo litológico gnaisse<sup>12</sup>, cuja jazida fica localizada no município de Guapó-GO, há 240 km de Brasília. Os resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo utilizado na produção dos concretos são mostrados no Apêndice A. A Figura 61 mostra a curva granulométrica da brita utilizada na produção dos concretos.

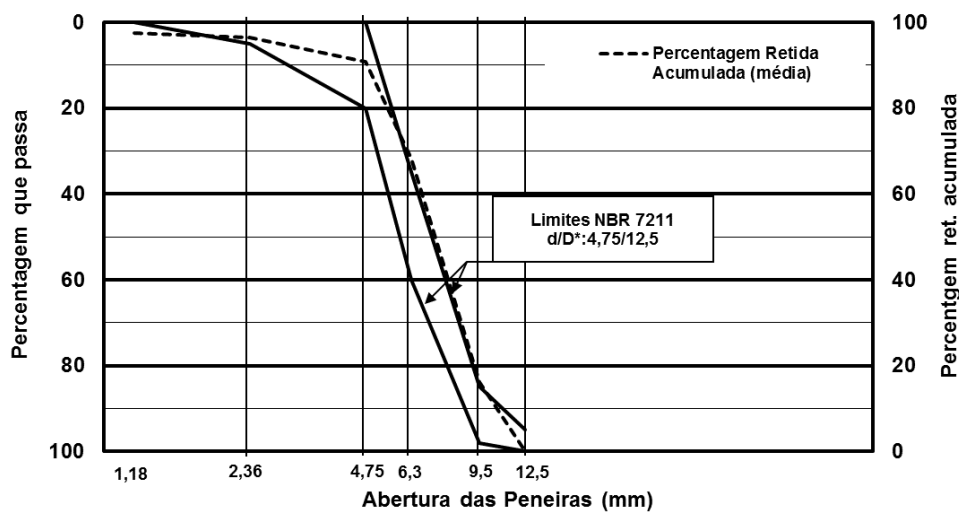


Figura 61 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado no estudo

#### e) Nanossílica

Foi empregada uma nanossílica ( $\text{SiO}_2$ ) comercialmente disponível em solução aquosa de sílica coloidal com teor de sólidos de 30%. A dispersão é um líquido translúcido, ligeiramente mais viscoso que a água. Sua utilização é especialmente recomendada para uso em concreto, com funções de controlar a estabilidade, a segregação e a perda de água, melhorar a durabilidade, reduzir a penetração de cloretos e promover desenvolvimento rápido da resistência (AKZONOBEL, 2013). A Tabela 12 apresenta as características da nanossílica empregadas no presente estudo. As informações foram fornecidas pelo fabricante.

<sup>12</sup> Gnaisse é uma rocha de origem metamórfica, composta por diversos minerais, sendo mais de 20% de feldspato potássico, plagioclásio, e ainda quartzo e biotita.



Tabela 12 - Características da nanossílica de acordo com o fabricante

Natureza química	Sílica amorfa
Apresentação – estado físico	Solução aquosa coloidal – líquido
Cor – odor	Claro (ligeiramente turvo) – odor suave
Teor de dióxido de silício (%)	30
Tamanho aproximado das partículas	~ 5nm
Área superficial	300 m <sup>2</sup> /g
pH	10,5 (9 – 11)
Viscosidade (MPa·s)	< 50
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,2
Teor NaO <sub>2</sub> (%)	0,55

O teor de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) foi verificado de acordo com os procedimentos indicados nas secções 4.5.4 e 4.5.9 da norma NP EN 196-2:2014, “Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos” e o resultado foi igual a 29,96%, mostrando estar muito próximo do valor indicado pelo fabricante. Também foi realizada a difração de raios-x da nanossílica, que confirmou o amorfismo do material como mostra a Figura 62.

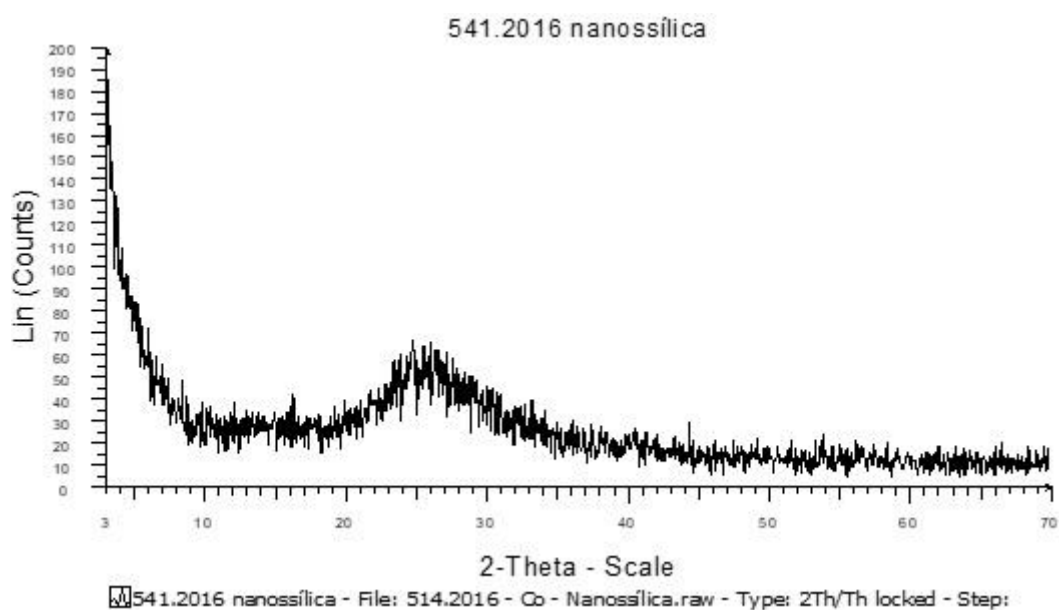


Figura 62 - Perfil difratométrico da nanossílica empregada no estudo

#### **f) Aditivo Superplastificante**

Os aditivos químicos utilizados na produção dos concretos e das argamassas foram do tipo redutor de água de grande eficiência (superplastificante de 3ª geração), à base de éter policarboxílico, fornecidos pelo mesmo fabricante. No entanto, o aditivo empregado na produção dos concretos foi declarado pelo fabricante como de pega normal (N), conforme classificação da ABNT NBR 11768/2011, enquanto o aditivo empregado na produção das argamassas foi declarado ter como função secundária acelerar o endurecimento. Na Tabela 13 são mostradas as características físico-químicas, fornecidas pelo fabricante, dos aditivos empregados no trabalho.

Tabela 13 - Características do superplastificante empregado

Característica	Aditivo empregado na produção dos concretos	Aditivo empregado na produção das argamassas
Base química	Eterpolicarboxilato	Eterpolicarboxilato
Função principal	Superplastificante	Superplastificante
Função secundária	--	Acelerador de endurecimento
Aspecto	Líquido viscoso	Líquido viscoso
Cor	Branco turvo	Turvo acastanhado
Viscosidade	< 150 cps	< 140 cps
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 – 1,107	1,061 – 1,065
pH	6,0 ± 1,0	5,7 ± 1,0
Teor de cloretos (%)	Isento	≤ 0,1%

#### **g) Polímero Superabsorvente (SAP)**

O Polímero Superabsorvente (SAP) utilizado foi desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU) pelo Professor Ole Mejlhede Jensen. Trata-se de um polímero do tipo ácido acrílico/acrilamida, com ligações cruzadas covalentes, produzido pela técnica de polimerização por suspensão inversa (JENSEN e HANSEN, 2001).

O SAP foi especialmente desenvolvido para uso em ambiente alcalino elevado, como o meio cimentício. Ele foi fornecido como um pó seco e branco, com partículas esféricas. Na Tabela 14 são apresentadas algumas características do polímero superabsorvente.

Tabela 14 - Características do Polímero Superabsorvente (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

Em 2007, a RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*) criou o comitê TC 225 SAP para a avaliar as propriedades do SAP por meio de ensaios interlaboratoriais realizados em diversos centros de pesquisa do mundo, empregando materiais locais. Para realização dos ensaios, o comitê TC 225 SAP recomendou uma composição para a produção das argamassas que é mostrada na Tabela 15.

Tabela 15 - Composição recomendada pelo comitê TC 225 SAP (RILEM, 2012)

Componente	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Traço unitário (kg/kg de cimento)
Cimento CP V ARI	700,0	1
Sílica ativa	70,0	0,1
Areia natural (SSS)	1339,8	1,914
Água	210,0	0,3
Ar	20,0	--

A composição apresentada na Tabela 15 tem sido a referência para a realização dos estudos sobre estratégias mitigadoras da retração autógena em concretos de alta resistência, desenvolvidos pelo grupo de pesquisa da Universidade de Brasília. Utilizando

essa composição e empregando os mesmos materiais do presente estudo, Manzano (2016) e Santos (2016) desenvolveram seus estudos. Desse modo, dando continuidade aos estudos e para permitir a comparação de resultados com os trabalhos citados, buscou-se definir a composição dos concretos a partir da composição mostrada na Tabela 15.

Definiu-se que o traço unitário da argamassa do concreto deveria ser o traço recomendado pelo comitê TC 225 SAP, logo o traço unitário do concreto de referência seria 1:0,1:1,914:p:0,30 (cimento: sílica ativa: agregado miúdo: agregado graúdo: água). Para determinação do agregado graúdo no traço unitário foram realizadas misturas com diferentes teores de argamassa seca, de modo a se obter um concreto que apresentasse boa coesão entre os materiais constituintes e abatimento igual a  $(200\pm 10)$  mm, com o menor teor de aditivo superplastificante possível. Após algumas tentativas foi adotado o teor de argamassa seca igual a 64%<sup>13</sup>, que resultou no traço 1:0,1:1,914:1,686:0,30 (cimento: sílica ativa: agregado miúdo: agregado graúdo: água). A partir desse traço foram determinados os demais traços unitários dos concretos, com a premissa de que a consistência de todos os concretos, determinada por meio do abatimento no tronco de cone, estivesse no intervalo de  $(200\pm 10)$  mm. Essa condição resultou em concretos com diferentes teores de aditivo superplastificante.

Para isolar e discutir a influência da variação do teor de aditivo superplastificante, além das onze diferentes situações de estudo, foram produzidos mais quatro concretos e dez argamassas. Esses concretos e argamassas adicionais tiveram o teor de superplastificante fixo e variava-se a consistência da mistura.

Na Tabela 16 são mostrados os traços unitários dos concretos do estudo.

---

<sup>13</sup> Teor de argamassa seca =  $(1+0,1+1,914)/(1+0,1+1,914+1,686) = 0,6413$

Tabela 16 - Traço unitário dos concretos do estudo

Traço		Composição unitária (kg/kg de cimento)						Composição unitária (% massa de cimento)		
		Cimento	Sílica	Areia <sup>14</sup>	Brita	a/c <sub>básica</sub>	a <sub>inc</sub> /c	Aditivo	SAP <sup>15</sup>	NS
1	REF 0,30	1	0,10	1,914	1,686	0,30	-	2,25	-	-
2	SAP (0,30+0,045)	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,045	2,51	0,30	-
3	REF 0,345	1	0,10	1,914	1,686	0,345	-	1,50	-	-
4	SAP (0,30+0,067)	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,067	2,80	0,447	-
5	REF 0,367	1	0,10	1,914	1,686	0,367	-	1,44	-	-
6	0,30 1NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	-	2,69	-	1
7	0,30 2NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	-	3,21	-	2
8	SAP(0,30+0,045)1NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,045	2,80	0,30	1
9	SAP(0,30+0,045)2NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,045	3,40	0,30	2
10	SAP(0,30+0,067)1NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,067	3,00	0,447	1
11	SAP(0,30+0,067)2NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,067	3,20	0,447	2
Concretos adicionais										
12	REF 0,30	1	0,10	1,914	1,686	0,30	-	1,50	-	-
13	SAP (0,30+0,045)	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,045	1,50	0,30	-
14	0,30 1NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	-	1,50	-	1
15	SAP(0,30+0,045)1NS	1	0,10	1,914	1,686	0,30	0,045	1,50	0,30	1
<p>Água Inc. = água incorporada</p> <p>SAP = polímero superabsorvente</p> <p>NS = nanossílica</p>										

Na Tabela 17 são mostrados os traços unitário das argamassas.

<sup>14</sup> Areia na condição Saturada Superfície Seca (SSS)

<sup>15</sup> O teor de polímero superabsorvente foi calculado dividindo o valor de água incorporada pela absorção do polímero em meio cimentício (15g/g), multiplicado esse quociente por cem.

Tabela 17 - Traço unitário das argamassas em estudo

Traço		Composição unitária (kg/kg de cimento)					Composição unitária (% massa de cimento)		
		Cimento	Sílica	Areia <sup>16</sup>	a/c <sub>básica</sub>	a <sub>inc</sub> /c	Aditivo	SAP <sup>17</sup>	NS
1	REF 0,30	1	0,10	1,914	0,30	-	1,50	-	-
2	SAP (0,30+0,045)	1	0,10	1,914	0,30	0,045	1,50	0,30	-
3	REF 0,345	1	0,10	1,914	0,345	-	1,50	-	-
4	SAP (0,30+0,067)	1	0,10	1,914	0,30	0,067	1,50	0,447	-
5	REF 0,367	1	0,10	1,914	0,367	-	1,50	-	-
6	0,30 1NS	1	0,10	1,914	0,30	-	1,50	-	1
7	SAP(0,30+0,045)1NS	1	0,10	1,914	0,30	0,045	1,50	0,30	1
8	SAP(0,30+0,067)1NS	1	0,10	1,914	0,30	0,067	1,50	0,447	1
9	REF 0,30	1	0,10	1,914	0,30	-	1,00	-	-
10	REF 0,30	1	0,10	1,914	0,30	-	1,25	-	-

Água Inc. = água incorporada  
SAP = polímero superabsorvente  
NS = nanossílica

### 3.4.1 - Argamassas

Foram produzidas oito argamassas com o teor de aditivo superplastificante fixo e igual a 1,5% em relação à massa de cimento. Essas argamassas foram produzidas para avaliar o comportamento da variação autógena e do tempo zero em misturas com o mesmo teor de aditivo superplastificante. As argamassas avaliadas foram: REF 0,30; REF 0,345; REF 0,367; SAP(0,30+0,045); SAP(0,30+0,067); 0,30 1NS; SAP(0,30+0,045)1NS e SAP(0,30+0,067)1NS.

Para a argamassa de referência REF 0,30 ainda foram realizadas mais duas misturas com 1,00% e 1,25% de aditivo superplastificante.

<sup>16</sup> Areia na condição Saturada Superfície Seca (SSS)

<sup>17</sup> O teor de polímero superabsorvente foi calculado dividindo o valor de água incorporada pela absorção do polímero em meio cimentício (15g/g), multiplicado esse quociente por cem.

### 3.4.1.1 Mistura das argamassas

O roteiro de mistura para a produção das argamassas foi baseado nas recomendações do Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012), para realização dos ensaios interlaboratoriais. Na Tabela 18 é mostrada a sequência e os tempos de mistura.

Tabela 18 - Roteiro de mistura das argamassas

Ação	Tempo
Homogeneização dos componentes secos (velocidade baixa)	4 min
Adição de água, incluindo o aditivo superplastificante e nanossílica pré-dissolvidos	1 min
Mistura inicial 1 (velocidade baixa)	1 min
Mistura inicial 2 (velocidade alta)	2 min
Descanso e raspagem de material aderidos a pá e cuba do misturador	1 min
Mistura final (velocidade alta)	3 min

Para realização das misturas foi utilizado um misturador planetário com capacidade de 5 litros, como é mostrado na Figura 63. Ao final da mistura de cada argamassa era realizada a medida da consistência por meio do espalhamento do tronco de cone de *Hagermann* sem golpes, conforme recomendado pelo Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012) e como mostra a Figura 64.



Figura 63 - Misturador utilizado na produção das argamassas (a) com detalhe dos materiais na cuba (b)

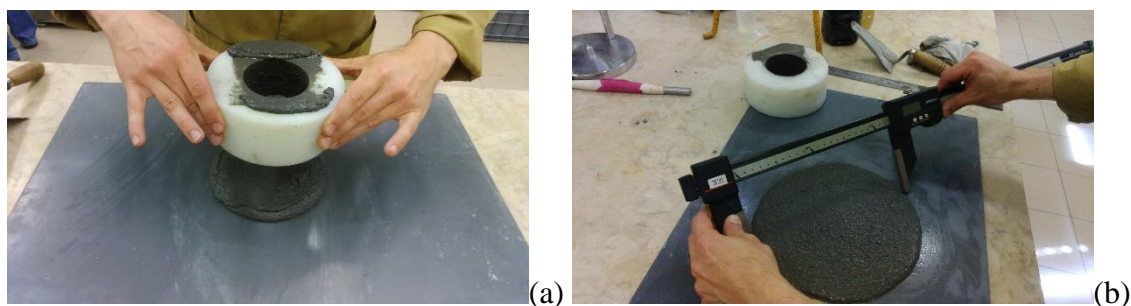


Figura 64 - Medida da consistência das argamassas pelo espalhamento na mesa

### 3.4.2 - Concretos

Foram produzidos onze concretos com abatimento igual a  $(200 \pm 10)$  mm e diferentes teores de aditivo superplastificante, conforme apresentado na Tabela 16. Além desses onze traços, foram preparadas mais quatro misturas com teor de aditivo superplastificante fixo e igual a 1,5% em relação à massa de cimento. Esses concretos adicionais apresentam diferentes consistências (abatimento) e foram produzidos para avaliar o comportamento das propriedades no estado fresco. Os quatro concretos adicionais foram: REF 0,30; 0,30 1NS; SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,045)1NS. Esses quatro concretos junto com o concreto REF 0,345 formaram um conjunto de cinco concretos com o mesmo teor de aditivo superplastificante.

#### 3.4.2.1 Mistura dos concretos

Para produção dos concretos, inicialmente fazia-se a imprimação da betoneira com argamassa e então após a pesagem dos materiais, os mesmos eram colocados na betoneira na seguinte ordem: agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e SAP. Esses materiais eram misturados a seco durante 4 minutos. Ao final dessa mistura e sem desligar a betoneira, a água, previamente misturada com o aditivo superplastificante e a nanossílica, era lançada à mistura durante um intervalo de tempo de 1 minuto. Ao final do lançamento da água, deixava-se a mistura dos materiais na betoneira por mais 6 minutos, quando então a betoneira era desligada e procedia-se a medida do abatimento do concreto no tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Após a medida do abatimento, retornava-se a massa de concreto para betoneira e misturava-se o concreto por mais 2 minutos. Concluída essa última mistura, o concreto era retirado da betoneira e procedia-se a moldagem dos corpos de prova. A Figura 65 apresenta o roteiro da mistura dos concretos.



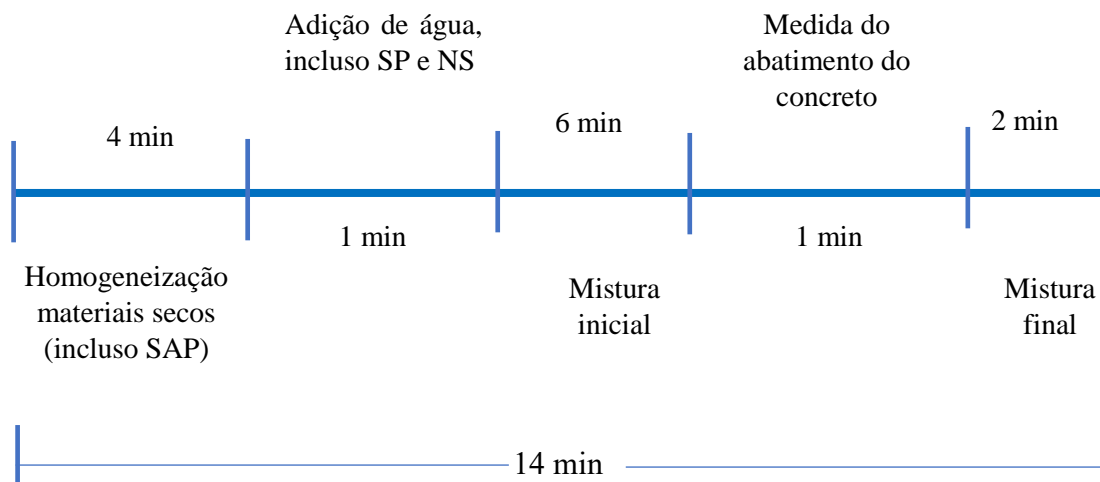


Figura 65 - Representação esquemática do roteiro de mistura dos concretos

O agregado miúdo foi utilizado na condição úmida. Determinava-se a umidade superficial por meio do método do frasco de Chapman, conforme a NBR 9775/2011, e então procedia a correção do teor de umidade superficial para a condição saturada com superfície seca (SSS). Na Figura 66 são ilustradas algumas etapas da produção dos concretos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 66 - Etapas da produção dos concretos: a) determinação da umidade superficial da areia; b) materiais secos no interior do misturador, antes da mistura; c) misturador utilizado; d) determinação do abatimento do concreto

Para a produção dos concretos foi utilizada uma betoneira de eixo vertical com capacidade nominal de 420 litros, como mostra a Figura 66 c.

### 3.4.2.2 - Moldagem, Adensamento e Cura dos Corpos de Prova

Para cada concreto estudado foram moldados corpos de prova para realização de ensaios, conforme apresentado na Tabela 19. As moldagens dos corpos de prova foram realizadas em sala com temperatura controlada ( $23 \pm 2$  °C).

Os corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm foram moldados em duas camadas, sendo cada camada adensada por meio de vibrador com agulha de imersão. Os corpos de prova prismáticos de 75x75x285 mm foram moldados em duas camadas, sendo o adensamento de cada camada realizado em mesa vibratória. Os corpos de prova prismáticos de 150x150x300mm foram moldados em três camadas, sendo que o adensamento de cada camada foi realizado aplicando 30 golpes uniformemente distribuídos. O soquete utilizado na aplicação dos golpes é descrito na NBR 7215/1996.

Tabela 19 - Propriedades, idade de ensaio, número de corpos de prova, idade, dimensões e formatos dos corpos de prova do estudo

Propriedade	Idade do ensaio (dias)	Nº de corpos de prova por idade	Dimensões (mm) / formato do corpo de prova
Resistência à compressão <sup>18</sup>	1, 3, 7, 28, 90 e 180	3	100x200/cilíndrico
Resistência à tração por compressão diametral	3, 7, 28, 90 e 180	3	100x200/cilíndrico
Módulo de deformação			
Retração por secagem	-	3	75x75x285/prismático
Fluência	1, 3 e 7	2	100x200/cilíndrico
Varição autógena	T <sub>0</sub> até 28 dias	3	75x75x285/prismático
Tempo Zero	Após a moldagem até 48 horas	1	150x150x300/prismático
Microestrutura <sup>19</sup>	1, 3, 7 e 28 dias	4	75x75x285/prismático

<sup>18</sup> O ensaio com a idade de 1 (um) dia somente foi realizado nos concretos que foram submetidos ao ensaio de fluência

<sup>19</sup> Foram moldados corpos de prova prismáticos de onde foram retiradas as amostras para os ensaios de microestrutura

Após a moldagem, os moldes dos corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm foram cobertos com filme plástico até serem desmoldados com 24 horas, quando então eram levados para cura em câmara úmida, com umidade relativa igual ou superior a 95% e temperatura igual a  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ , até a idade de ensaio. Os corpos de prova prismáticos de 75x75x285 mm destinados ao ensaio de retração por secagem e microestrutura, após a moldagem eram envolvidos com filme plástico e conduzidos para câmara úmida onde permaneciam por 24 horas. Ao final de 24 horas os corpos de prova de retração por secagem eram desmoldados e submersos em uma solução saturada de cal, onde permaneciam até a idade de ensaio (28 dias), enquanto os destinados aos ensaios de microestrutura eram desmoldados e selados com filme plástico e fita adesiva, permanecendo selados até atingirem a idade para paralisação da hidratação. Esse último procedimento tinha por objetivo submeter as amostras destinadas ao estudo da estrutura interna, às mesmas condições dos corpos de prova destinados ao ensaio de retração autógena.

Os corpos de prova prismáticos de 75x75x285 mm e de 150x150x300 mm destinados, respectivamente, para os ensaios de retração autógena e patamar de percolação, logo após a moldagem eram selados com filme plástico e fita adesiva, com o objetivo de evitar a perda de água, e imediatamente conduzidos para o início dos ensaios. A Figura 67 mostra a moldagem e adensamento dos corpos de provas cilíndricos 10x20cm.



Figura 67 - Enchimento das formas cilíndricas 10x20 cm (a) e adensamento com vibrador de agulha de imersão (b)

## 3.5 - Métodos

### 3.5.1 - Propriedades no estado fresco

O termo estado fresco é definido no presente estudo como o período decorrido desde o momento da adição da água de amassamento ao cimento até o momento em que se observa o patamar de percolação.

A Tabela 20 apresenta as propriedades e métodos de ensaios empregados na caracterização dos concretos e argamassas no estado fresco.

Tabela 20 - Propriedades e métodos de ensaios empregados na caracterização dos concretos e argamassas no estado fresco

Material	Propriedade	Método
Concreto	Consistência (abatimento)	NBR NM 67
	Teor de ar e massa específica	NBR 9833
	Tempo zero / transição suspensão-sólido	Ultrassom
Argamassa	Espalhamento na mesa	DIN 18555-2
	Tempo zero/ transição suspensão-sólido	Taxa de deformação

Apresenta-se a seguir, a descrição dos métodos para determinação do Tempo zero / transição suspensão-sólido. Os métodos das demais propriedades podem ser consultados em detalhes nas referidas normas.

#### 3.5.1.1 - Tempo zero / transição suspensão-sólido

Tempo zero é o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que se adiciona a água de amassamento ao cimento até o instante em que se observa a transição suspensão-sólido ou patamar de percolação. A transição suspensão-sólido por sua vez, corresponde ao instante que o sistema cimentício desenvolve uma estrutura sólida e estável para permitir a transferência de tensões (WEISS, 2002). A determinação precisa do tempo zero é fundamental para medição da variação autógena e modelagem do potencial de fissuração de um sistema cimentício.

A ASTM C1698 (ASTM, 2014) sugere usar o tempo de final pega determinado pelo aparelho Vicat como o tempo zero. Devido à arbitrariedade relativa do método de penetração de Vicat, alguns pesquisadores (SANT et al., 2006b; DARQUENNES et al., 2011; HUANG e GUANG, 2017) questionam a confiabilidade de usar o tempo de fim de pega como o tempo zero para a determinação da retração autógena. Eles acreditam que o método de penetração não corresponde precisamente ao tempo zero. Como resultado, uma variedade de técnicas de teste para detectar o tempo zero são propostas. Um dos métodos consiste em identificar o momento em que a retração química e a deformação autógena de uma pasta de cimento começam a se desviar, como mostra a Figura 68 (SANT et al., 2006a). Embora este conceito geral seja bem conhecido, uma determinação analítica desse tempo não está bem definida.

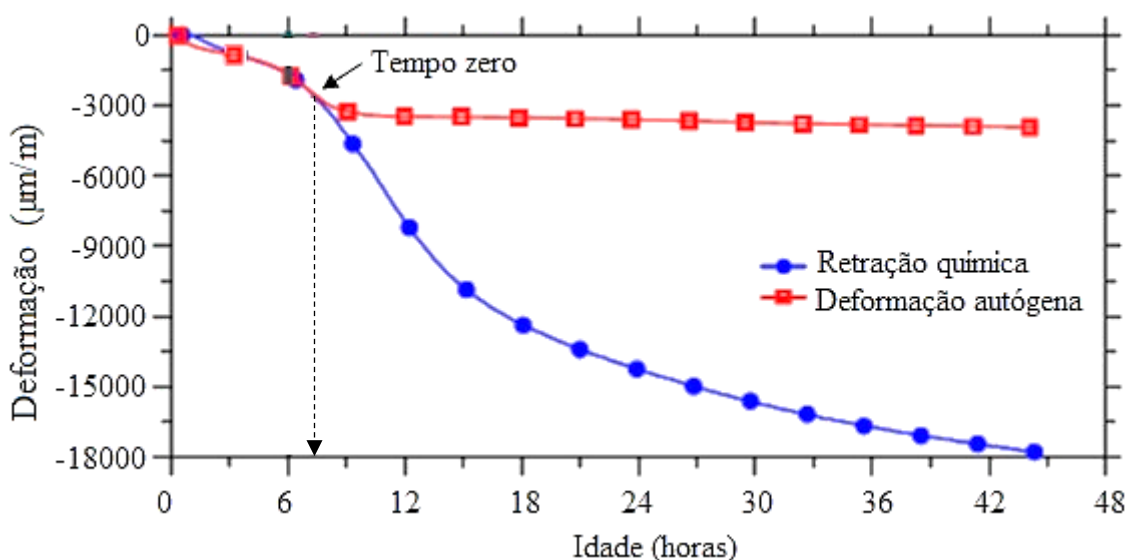


Figura 68 – Identificação do tempo zero por meio do desvio entre a retração química e a deformação autógena - adaptado (SANT et al., 2006a)

Além da determinação do momento que ocorre a separação entre a retração química e deformação autógena, a condutividade elétrica (SANT et al., 2006b), a emissão acústica (COUCH, 2006), a velocidade de propagação do pulso ultrassônico (SILVA, 2007), a taxa de desenvolvimento de deformação (BETTENCOURT e GONÇALVES, 2010), a variação da umidade relativa interna (HUANG e GUANG, 2017) e a calorimetria isotérmica (HUANG e GUANG, 2017), têm sido utilizados para determinar o tempo zero. No presente estudo foram utilizados para a determinação do tempo zero a taxa de desenvolvimento da deformação, no caso das argamassas, e a velocidade de propagação

do pulso ultrassônico, para os concretos. A escolha dessas metodologias se deu em função da disponibilidade dos equipamentos.

#### a) Determinação do tempo zero por meio da taxa de desenvolvimento da deformação

Para ajudar a explicar como encontrar o tempo zero por meio da taxa de variação da deformação, na Figura 69 é mostrado um exemplo das medidas absolutas de deformação de uma argamassa nas primeiras 100 horas, determinada em dois corpos de prova da mesma mistura de amassamento.

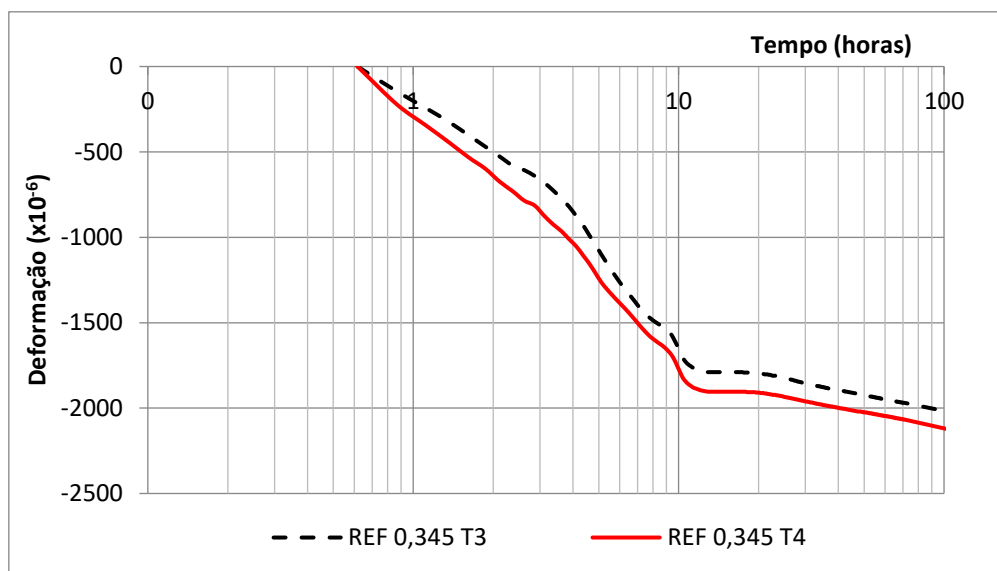


Figura 69 - Deformação absoluta da argamassa REF 0,345

Pode-se perceber que a deformação dos dois corpos de prova (T3 e T4) é diferente. No entanto, após o início da deformação, o comportamento é semelhante nos dois corpos de prova, mas o aumento da deformação começa a diminuir mais cedo no Tubo 3, o que indica um estágio mais avançado na solidificação da amostra. A diminuição da taxa no Tubo 4 ocorre apenas alguns minutos após o Tubo 3, mas a diferença é suficiente para mostrar valores absolutos distintos significativos. A Figura 70 mostra a taxa de aumento de deformação dos dois tubos.

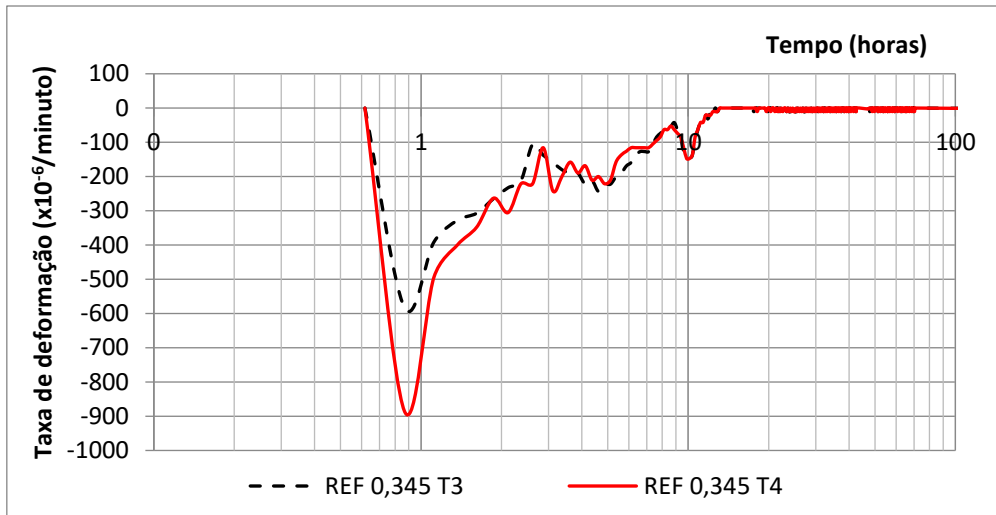


Figura 70 - Taxa de deformação absoluta da argamassa REF 0,345

Os valores apresentados na Figura 70 são os resultados da seguinte equação:

$$\text{taxa de deformação} = \frac{\varepsilon_{ti} - \varepsilon_{(ti+15)}}{15} \quad (19)$$

Onde,  $\varepsilon_{ti}$  é a deformação no tempo  $i$ , e  $\varepsilon_{(ti+15)}$  é a deformação 15 minutos após o tempo  $i$ .

Essa taxa de deformação é a média do incremento da deformação por minuto, calculado com 3 medidas de sobreposição de 5 minutos. A média de medidas de 15 minutos foi escolhida para diminuir a dispersão do gráfico e facilitar a sua leitura.

Na Figura 70 se pode ver um comportamento semelhante dos tubos. Nota-se que a taxa de desenvolvimento da retração é elevada no início e vai diminuindo com o tempo. Bettencourt e Gonçalves (2010) demonstraram que essas medidas iniciais podem ser entendidas como um comportamento semelhante a um líquido e não são muito relevantes para a análise da fissuração. Estas deformações iniciais estão na mesma ordem esperada para a contração de *Le Chatelier*. Após a transição do comportamento líquido para o sólido, o mecanismo da deformação muda da variação do volume dos materiais para as tensões de compressão no corpo sólido. No estado sólido, as mudanças de volume dos materiais devido à reação química estão ocorrendo, mas não causam diretamente alterações no volume aparente no corpo. Normalmente, a deformação neste estado é atribuída à tensão capilar nos poros, o que induz às tensões de compressão na rede sólida. Os dois fenômenos, a variação da densidade e a deformação por tensões de compressão

são muito diferentes, não apenas na natureza, mas também na amplitude, e não é surpreendente que a taxa de deformação mostre uma redução como vista na Figura 70.

Se está principalmente interessado na mudança do comportamento líquido para sólido. A escolha de um instante que representa a transição é difícil e provavelmente não é correto, pois é um processo lento e gradual. No entanto, é útil para comparar diferentes sistemas cimentícios. Levando em consideração as limitações do método proposto, após algumas tentativas, Bettencourt e Gonçalves (2010) estabeleceram a transição líquido-sólido como o instante corresponde ao início do platô na curva de deformação absoluta, associada à redução da taxa de deformação e, além disso, ao instante a partir do qual as menores diferenças entre os resultados de retração dos dois corpos de prova são obtidas. Usando este critério, a Figura 71 mostra as deformações nos tubos correspondentes a argamassa REF 0,345. Nesta figura, a deformação foi zerada em 13,1 horas.

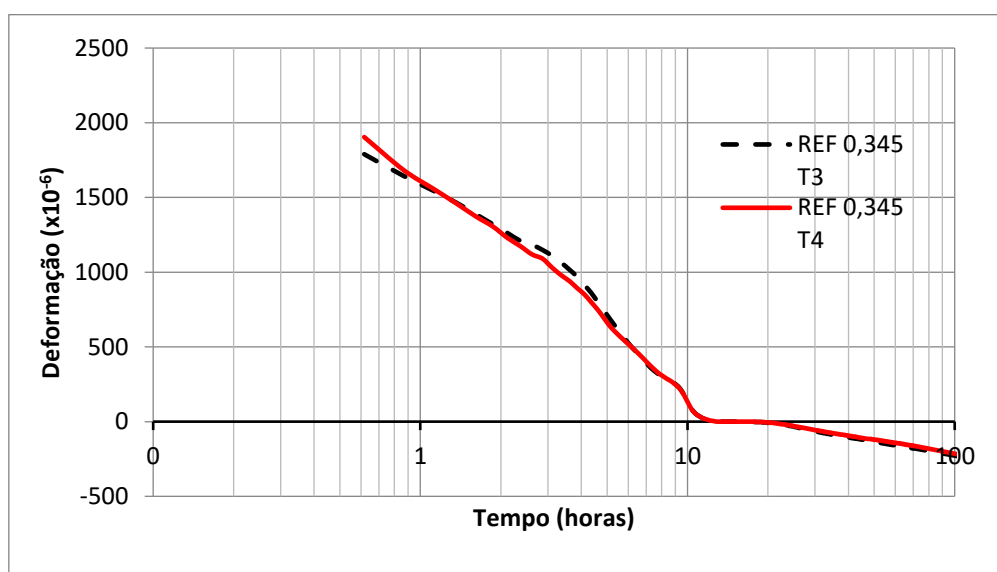


Figura 71 – Deformações após a determinação do Tempo zero

A Figura 72 mostra os resultados de outra argamassa, que tem uma fase de inchamento. São mostradas a deformação absoluta, a taxa de deformação e a deformação após a determinação do tempo zero. Novamente, nota-se entre os dois corpos de prova uma deformação absoluta diferente, mas comportamento semelhante após o início da deformação. Aplicando o critério para determinação do tempo zero, a deformação foi zerada em 4,8 horas, revelando que a fase de inchaço é semelhante nos corpos de prova.



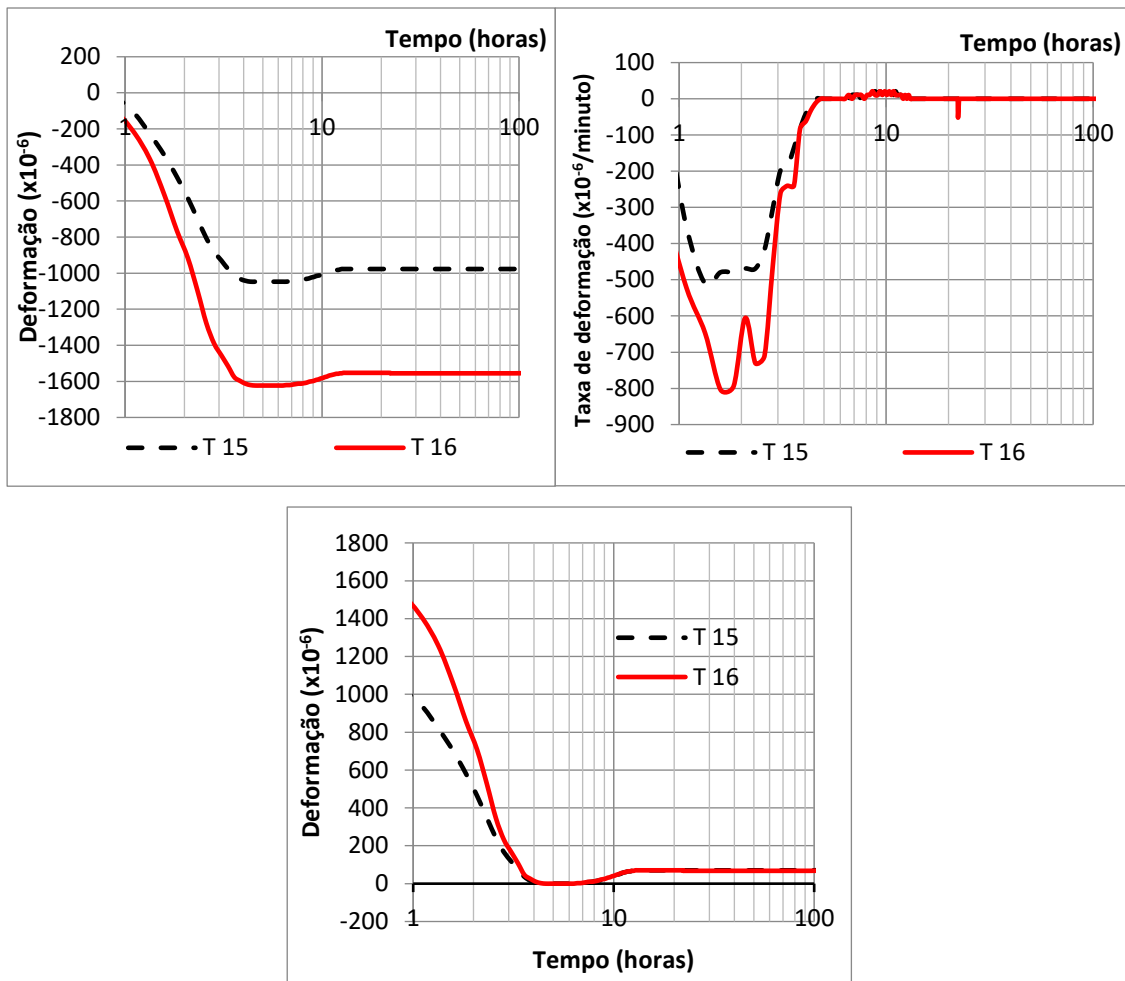


Figura 72 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa SAP(0,30+0,067)1NS

Os resultados obtidos nas diferentes argamassas sugerem que os critérios utilizados para definir o tempo zero permitem a obtenção de deformações muito semelhantes nos dois corpos de prova. Isso indica que os possíveis problemas do método durante a fase líquida não são transferidos para as análises do comportamento como um sólido, se as deformações antes do tempo zero são desprezadas. Além disso, à medida que as diferenças entre os dois corpos de prova são reduzidas, tipicamente com uma variação inferior a 10  $\mu\text{m/m}$  após o tempo zero, o método foi considerado adequado para os fins do estudo.

#### **b) Determinação do tempo zero pela propagação do pulso ultrassônico**

O método proposto por Silva (2007) tem como referência as normas NM 58/1996 e NBR 8802/2013. 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.

Para realização do ensaio foi confeccionada uma forma prismática de 150x150x300 mm, utilizado chapa compensada de madeira resinada com espessura de 10 mm. Nas duas faces da seção transversal a forma possui um orifício de diâmetro igual a 50mm para acoplar os transdutores de frequência. A Figura 73 apresenta a forma utilizada no ensaio.



Figura 73 - Forma empregada no ensaio de determinação do patamar de percolação

Silva (2007) justifica que a adoção de um corpo-de-prova prismático com dimensões de 150x150x300mm teve por objetivo atender as recomendações da RILEM NDT 1 (1972) e da NM 58/1996. O ensaio foi realizado seguindo as etapas a seguir.

- 1) Proceder a calibração do equipamento de ultrassom usando a barra de referência que acompanha o aparelho;
- 2) Untar as faces dos transdutores com uma fina camada de gel de silicone, a fim de garantir contato contínuo entre as superfícies dos transdutores e o concreto;
- 3) Encaixar os transdutores (receptor e transmissor) nos furos de 50mm de diâmetro, existentes nas faces da seção transversal da forma, de modo que os transdutores devem facear a forma internamente;
- 4) Produzir o concreto em uma sala com temperatura igual a  $(21\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Os equipamentos e materiais constituintes também devem estar nessa temperatura. Deve-se anotar a hora em que a água de amassamento é adicionada à mistura;
- 5) Moldar o corpo de prova em três camadas de altura aproximadamente iguais, aplicando 30 golpes de adensamento em cada camada;

- 6) Cobrir a superfície exposta do concreto com filme plástico e fita adesiva, para impedir a evaporação de água do concreto;
- 7) Fazer a aquisição automática dos dados de velocidade de propagação da onda longitudinal. No presente estudo, o intervalo entre as leituras foi de 3 minutos;
- 8) Traçar a curva velocidade de propagação versus tempo;
- 9) O patamar de percolação é assumido como sendo o momento onde houve um aumento brusco na velocidade de propagação da onda ultrassônica;
- 10) O Tempo zero é calculado determinando o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que se lançou a água de amassamento no concreto e o momento em que se observou o patamar de percolação.

A Figura 74 ilustra algumas das etapas descritas anteriormente.

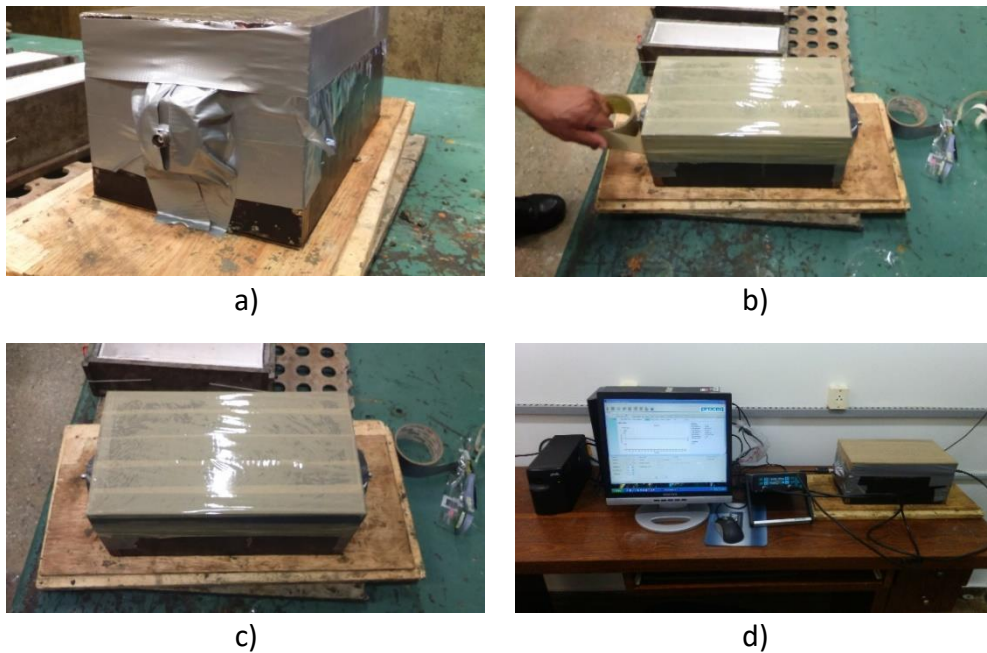


Figura 74 – Preparação para determinação do patamar de percolação: a) detalhe da fixação dos transdutores; b) selagem do corpo de prova; c) corpo de prova selado; d) ensaio em andamento

### 3.5.2 - Propriedades no estado endurecido

A Tabela 21 apresenta as propriedades e os correspondentes métodos de ensaios empregados na caracterização dos concretos e argamassas no estado endurecido.

Tabela 21 - Métodos empregados na determinação das propriedades dos concretos e argamassas no estado endurecido

Material	Propriedade	Método
Concreto	Resistência à compressão	NBR 5739
	Módulo de deformação	NBR 8522
	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222
	Fluência	NBR 8224
	Retração por secagem	ASTM C157
	Varição autógena	Relógios comparadores Extensômetros embutidos
Argamassa	Varição autógena	ASTM C1698

Para a determinação da variação autógena dos concretos, existia inicialmente dúvida sobre qual metodologia adotar para realização dos ensaios. Assim sendo, os primeiros quatro concretos produzidos foram ensaiados empregando duas metodologias. A primeira, denominada neste trabalho como método dos relógios comparadores e a segunda, denominada aqui como método do extensômetro embutidos. A partir do quinto concreto produzido a variação autógena dos concretos foi determinada somente pelo método do extensômetro embutido. A escolha desse último método em relação ao método dos relógios comparadores foi basicamente devida as seguintes vantagens: o início das leituras das deformações pode ocorrer imediatamente após a moldagem e selagem do corpo de prova, permite o manuseio do corpo de prova durante o período de realização do ensaio e é menos sensível a interferências externas tais como movimentação nas proximidades e falta de iluminação.

A seguir, apresentam-se as duas metodologias empregadas na determinação da variação autógena dos concretos e também uma breve descrição do método da ASTM C1698 (ASTM, 2014) empregado para as argamassas. Os métodos empregados para determinação das demais propriedades no estado endurecido podem ser vistos em detalhes nas referidas normas.

### 3.5.2.1 - Descrição dos métodos de determinação da Variação Autógena

#### a) Determinação da deformação autógena das argamassas – ASTM C1698

Para cada argamassa foram moldados dois corpos de prova para realização de ensaios de determinação da deformação autógena, conforme norma ASTM C1698 (ASTM, 2014). 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 e diâmetro externo  $(29 \pm 0,5)$  mm e duas tampas cônicas para fechamento das extremidades. A Figura 75 mostra um conjunto de tubos corrugados e tampas usados para moldagem dos corpos de prova.



Figura 75 – Conjunto de tubos corrugados e tampas utilizados como moldes para determinação da deformação autógena segundo a ASTM C1698

A moldagem dos corpos de prova consiste em fechar uma das extremidades do tubo corrugado com uma das tampas e, com o auxílio de um funil colocado na outra extremidade do tubo, preencher o molde com argamassa, em quatro camadas. Cada camada recebe adensamento por meio da mesa vibratória. A vibração da mesa era ajustada para reduzir a formação de bolhas no interior do tubo, que era verificado visualmente. Ao concluir o preenchimento do tubo a tampa superior era firmemente ajustada para selar o molde. Para fixação das tampas foi empregada cola epóxi. A Figura 76 mostra o corpo de prova pronto para início do ensaio de deformação autógena.



Figura 76 - Tubo corrugado preenchido com argamassa, pronto para o ensaio de deformação autógena segundo ASTM C1698

Concluída a moldagem, era determinada a massa de cada corpo de prova e, então, colocava-se o molde preenchido no equipamento de ensaio. O início das medições se dava somente quando dois corpos de prova da mesma argamassa eram colocados no equipamento. O preenchimento dos corpos de prova foi realizado um de cada vez, portanto, o tempo de repouso, após a moldagem do tubo e antes do início das medições, foi diferente para os dois corpos de prova.

Após a colocação dos dois corpos de prova sobre a estrutura de ensaios, a deformação do tubo corrugado foi registrada por um relógio comparador (precisão de 0,001mm) conectado a um sistema de aquisição de dados. Durante os primeiros três dias, os registros foram feitos automaticamente a cada 3 minutos. Ao completar três dias de leituras, os corpos de prova eram removidos do equipamento de ensaio e armazenados em uma folha de plástico ondulado, a fim de liberar o equipamento para novos testes. As medidas subsequentes nos corpos de prova, até a idade de 28 dias, foram realizadas manualmente, colocando novamente o tubo corrugado no equipamento de ensaio e registrando o valor mostrado no relógio comparador, após a zeragem do equipamento com uma barra de

referência. Ao final de 28 dias constrói se a curva deformação versus tempo de onde se extrai o tempo zero das misturas e, então, determina-se a variação autógena.

A Figura 77 mostra o equipamento para determinação das deformações e um conjunto de corpos de prova em ensaio.

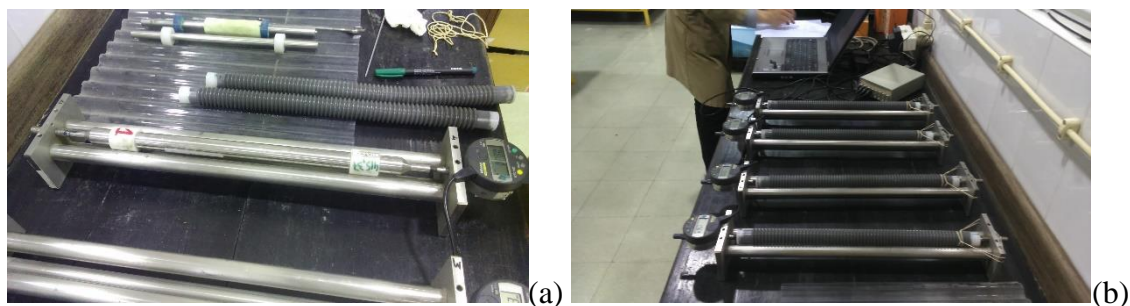


Figura 77 - Equipamento para determinação da deformação autógena segundo ASTM C1698 (a) e conjunto de quatro corpos de prova em ensaio (b)

## **b) Determinação da deformação autógena dos concretos**

### **b.1) Método dos relógios comparadores**

A metodologia para determinação da variação autógena foi adaptada por Silva (2007) e é baseada nas prescrições normativas do *JCI - Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete*. No presente estudo esse método foi empregado em quatro traços de concreto.

O procedimento inclui a moldagem de três corpos de prova prismáticos com dimensões 75 mm x 75 mm x 285 mm provenientes de uma mesma betonada. A determinação é realizada a partir do patamar de percolação até 28 dias. As formas metálicas usadas no ensaio são preparadas com antecedência e forradas com folhas de poliestireno expandido (espessura 5 mm), para diminuir o atrito entre o material e as paredes da forma e permitir a movimentação do material no seu interior. Instala-se dois pinos metálicos, rosqueados nas extremidades, que coincidem com o eixo longitudinal da amostra, e mede-se a distância entre os mesmos (medida “G”). No presente estudo essa distância foi fixada em 220mm e as deformações foram determinadas nesse comprimento. Então, são moldados os corpos de prova, preenchendo as formas em duas camadas adensadas em mesa vibratória. Em seguida, cobre-se a superfície exposta com uma folha de poliestireno e a

amostra é envolvida, juntamente com a forma, com várias camadas de filme plástico e fita adesiva, com o intuito de evitar a perda de água por evaporação. O conjunto é pesado e levado a uma sala com umidade ( $50 \pm 2\%$ ) e temperatura ( $21 \pm 2^\circ\text{C}$ ) controladas. A pesagem do molde preenchido é para avaliar a perda de massa de água durante a realização do ensaio e é verificada ao término (28 dias). A Figura 78 ilustra algumas etapas da preparação do ensaio de variação autógena segundo a metodologia adaptada por Silva (2007).

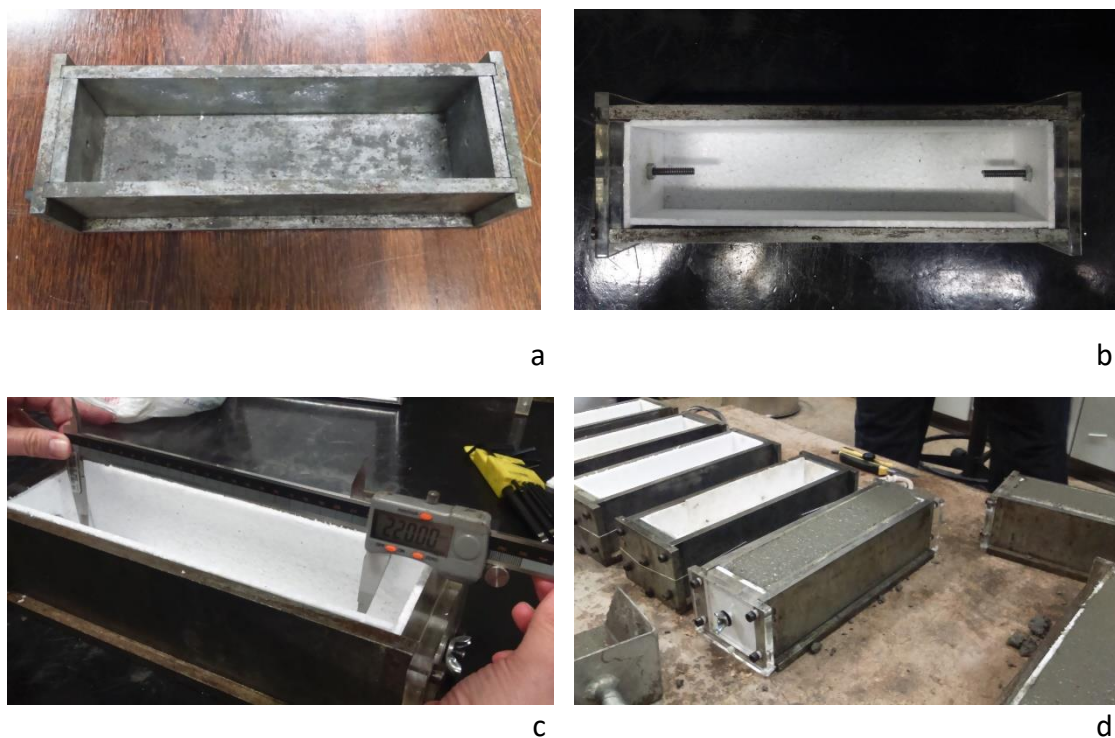


Figura 78 - Sequência de preparação para o ensaio de variação autógena proposto por Silva (2007): a) forma prismática; b) forma forrada com poliestireno expandido e com pinos; c) determinação da distância entre os pinos; d) corpo-de-prova moldado

Os corpos de prova são colocados numa bancada sobre base metálica e, no patamar de percolação, inicia-se a determinação da retração, acoplando dois extensômetros, um em cada um dos pinos localizados nas extremidades. Para a leitura dos extensômetros são instaladas câmeras digitais que são ligadas a um computador e por meio de um *software* de registro de imagens são captadas as leituras dos extensômetros em um intervalo de tempo regular. Os extensômetros utilizados devem possuir resolução de 0,001mm. Após 28 dias, finaliza-se o ensaio e o conjunto molde e corpo de prova é novamente pesado para a verificação da perda de massa. Um esquema geral do ensaio é mostrado na Figura 79.



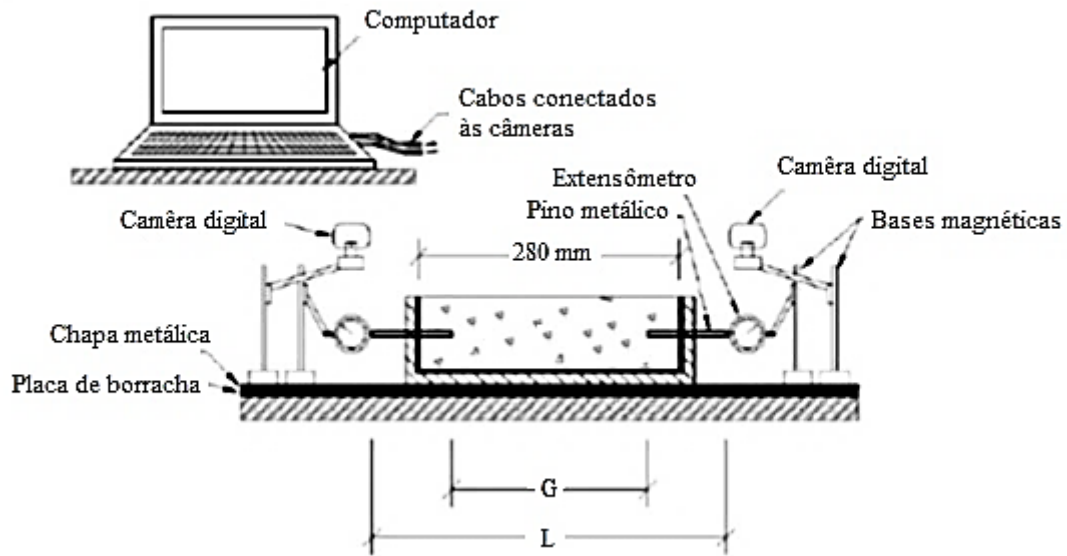


Figura 79 - Representação esquemática do ensaio de determinação da variação autógena (SILVA et al., 2011a)

A variação autógena é expressa em relação ao comprimento e é dada pela expressão:

$$\Delta L = \frac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{G} \quad (20)$$

Onde:

$\Delta L$  = Variação autógena;

$G$  = distância entre as extremidades dos pinos, determinada antes da moldagem;

$X_{0a}$ ,  $X_{0b}$  = Leituras iniciais nos extensômetros;

$X_{ia}$ ,  $X_{ib}$  = Leituras nos extensômetros no tempo  $i$ .

A Figura 80 apresenta um ensaio de determinação da variação autógena do concreto pelo método dos relógios comparadores.



Figura 80 - Ensaio de determinação da variação autógena pelo método dos relógios comparadores

### b.2) Método do extensômetro embutido

A metodologia utilizada no presente estudo para determinar a variação autógena de todos os concretos foi o método do extensômetro embutido, fundamentado nas prescrições da Instrução de Trabalho IT.MC 201 do laboratório de Furnas (FURNAS, 2015).

Os ensaios foram realizados de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Revestir os moldes prismáticos com dimensões (75 x 75 x 285) mm com folhas de poliestireno expandindo de 5mm de espessura no fundo e nas faces laterais, a fim de diminuir o atrito e permitir a livre movimentação da amostra do material no interior do molde. A Figura 81 mostra o molde prismático utilizado e o mesmo com a forração de poliestireno;



a



b

Figura 81 - Forma prismática 75x75x285mm (a) e a mesma forma forrada com poliestireno expandido (b)

- 2) Instalar um extensômetro no interior do molde, fazendo-o coincidir com o eixo longitudinal do molde, como mostra a Figura 82;

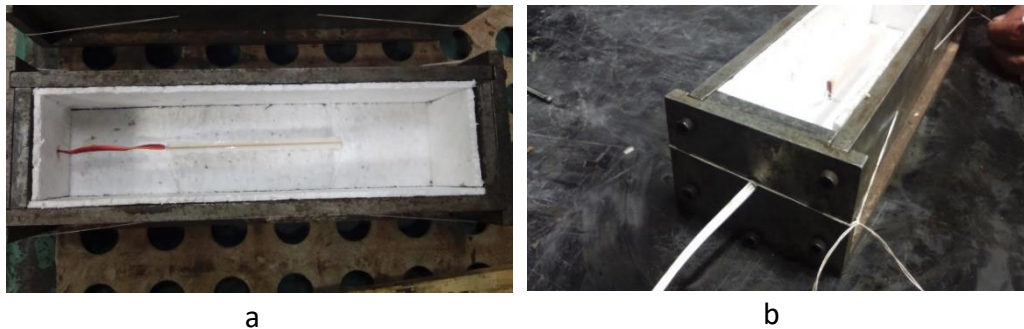


Figura 82 - Extensômetro colocado no interior do molde (a), com detalhe da fixação e saída do cabo de leitura (b)

- 3) Produzir o concreto em uma sala com temperatura igual a  $(21 \pm 2)$  °C. Os equipamentos e materiais constituintes também devem estar nessa temperatura. Deve-se anotar a hora em que a água de amassamento é adicionada à mistura;
- 4) Moldar o corpo 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. A Figura 83 apresenta a moldagem do corpo de prova com extensômetro embutido;



Figura 83 - Moldagem do corpo-de-prova com extensômetro embutido

- 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;

- 6) Pesar o conjunto e levar para a sala de ensaios, com umidade ( $50\% \pm 2\%$ ) e temperatura ( $21 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) controladas. A pesagem do molde preenchido é para avaliar a perda de massa de água, verificada após o término do ensaio (28 dias);
- 7) Iniciar as determinações de variação autógena no instante do patamar de percolação, previamente determinado;
- 8) Realizar leituras diariamente até os 28 dias de idade;
- 9) Pesar, ao final de 28 dias, o conjunto e retirar o corpo-de-prova do molde;
- 10) Armazenar o corpo de prova em sala com umidade ( $50\% \pm 2\%$ ) e temperatura ( $21\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) controladas para avaliar a retração por secagem.

A Figura 84 mostra o ensaio de determinação da variação autógena do concreto pelo método do extensômetro embutido.

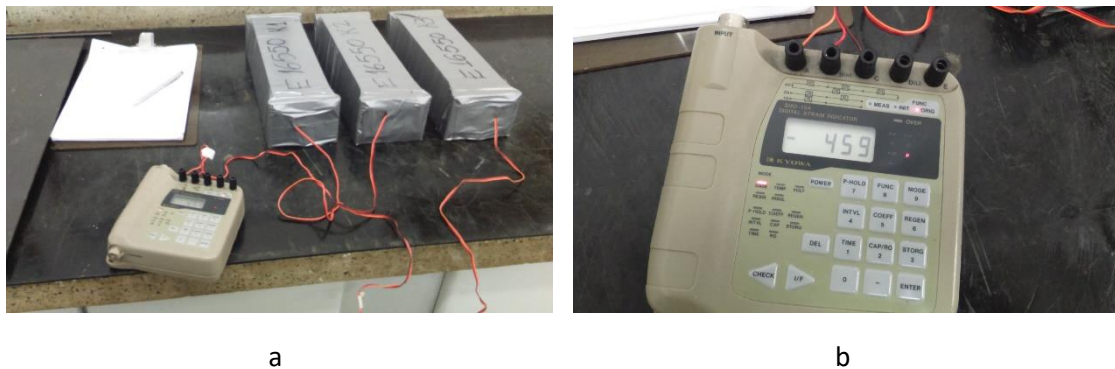


Figura 84 - Ensaio de determinação da variação autógena com extensômetro embutido (a) e detalhe da leitora de deformação (b)

### 3.5.2.2 - Comparação entre os extensômetros Kyowa KM 120 e Carlson M-4

Buscando identificar qual extensômetro seria adotado para ser utilizado na metodologia de determinação da variação autógena por meio de extensômetro embutido, procedeu-se à realização de medidas da variação autógena, para um mesmo traço de concreto,

utilizando dois tipos de extensômetros: um do tipo Carlson e outro do tipo *strain gage* de embutir.

Os extensômetros tipo Carlson utilizam dois princípios eletromecânicos distintos: o da variação da tensão em fio, que provoca variação da resistência elétrica, e o da variação da alteração da temperatura de um fio, que provoca o mesmo efeito. Desse modo, o extensômetro tipo Carlson funciona também como termômetro (FURNAS, 1997), permitindo assim que sejam determinadas as deformações devido aos efeitos de tensões induzidas e da variação da temperatura.

Os extensômetros tipo Carlson possuem dimensões variáveis, possibilitando dessa forma que sejam empregados de acordo com a finalidade a que se destinam na determinação das deformações nas estruturas, ou conforme a dimensão máxima característica do agregado, em laboratório. No presente estudo, foi testado o extensômetro tipo Carlson M-4, cujas características são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Características do extensômetro tipo Carlson M-4 (FURNAS, 1997)

Característica	Extensômetro tipo Carlson M-4
Amplitude (milionésimo)	3900
Menor leitura (milionésimo)	5,8
Menor leitura de temperatura (°F)	0,1 (-1,72 °C)
Comprimento de medição (pol.)	4,062 (103,17 mm)
Peso (libra)	0,2 (90,72 gramas)

O princípio básico de operação dos extensômetros do tipo *strain gage* é similar ao dos extensômetros Carlson (FURNAS, 1997). No entanto, alguns modelos são denominados de temperatura auto compensável, os quais são livres dos efeitos das variações de temperatura. Significa que é um medidor no qual o coeficiente de resistência de temperatura do fio ou lâmina é controlado. Desse modo, se o tipo certo de medidor é usado para o material certo, a expectativa de erro deve estar dentro de  $\pm 1,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , o que significa alta precisão (FURNAS, 1997).

O extensômetro do tipo *strain gage* de temperatura auto compensável pode ser fornecido em seis tipos, dependendo da aplicação: madeira, aço de construção e concreto, aço inox,

liga de alumínio, liga de magnésio e plásticos. A Tabela 23 apresenta o coeficiente de dilatação linear para o extensômetro tipo strain gage de temperatura controlada em função do tipo de material compatível.

Tabela 23 - Característica do extensômetro tipo strain gage de temperatura auto compensável em função do tipo de material compatível (FURNAS, 1997)

Objeto de medição compatível	Coefficiente de dilatação linear ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	Codificação
Madeira	5,0	5
Aço, concreto	10,8	11
Aço inox	16,2	16
Liga de alumínio	23,4	23
Liga de magnésio	27,0	27
Plásticos	65,0	65

No presente estudo, foi testado o extensômetro do tipo *strain gage* de resistência igual a 120  $\Omega$ , da marca *Kyowa*, modelo KM 120-H2-11-L100-3. Na Figura 85 é apresentada a codificação desse extensômetro.

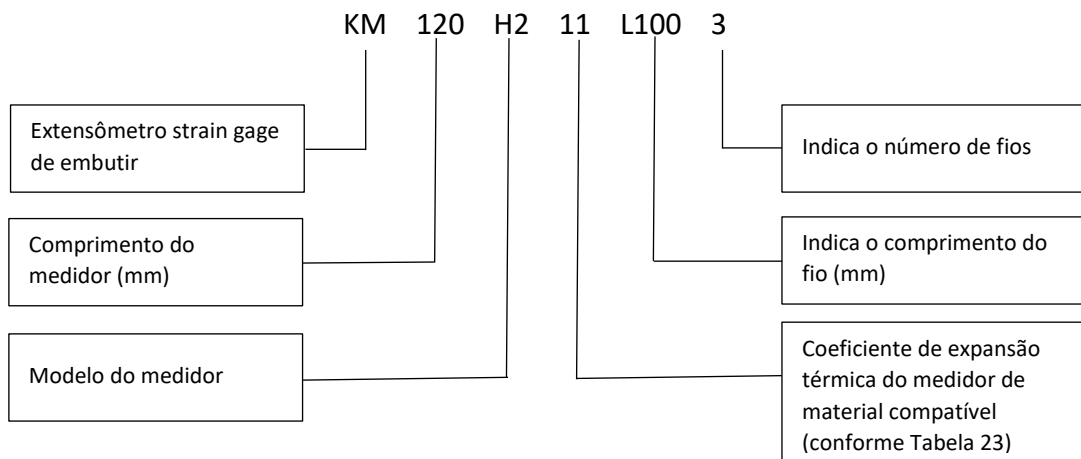


Figura 85 - Sistema de codificação do extensômetro tipo *strain gage* da marca *Kyowa* empregado na pesquisa

Na Figura 86 são mostrados os dois modelos de extensômetros embutidos que foram comparados.

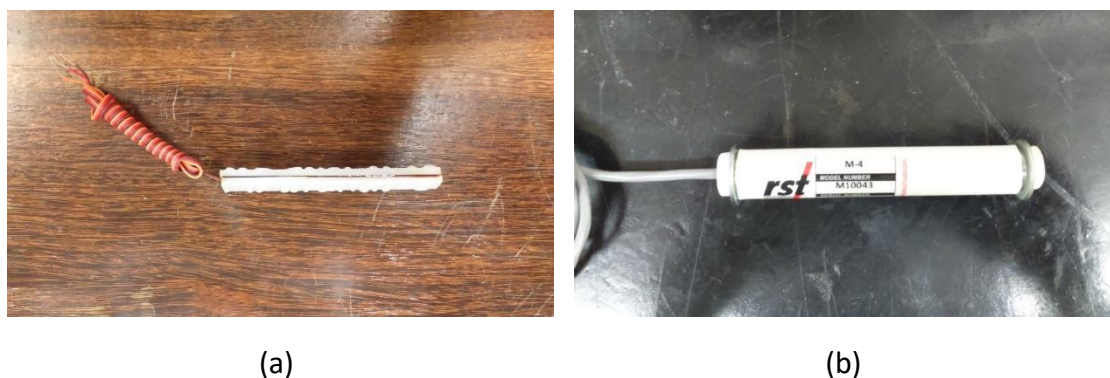


Figura 86 - Extensômetros testados para determinação da variação autógena com extensômetro embutido: a) modelo KM 120-H2-11-L100-3; b) modelo Carlson M-4

Para facilitar a compreensão e identificação na comparação dos dois tipos de extensômetros o tipo Carlson M-4 será chamado apenas de Carlson e o modelo Kyowa KM 120-H2-11-L100-3 será denominado de KM120.

A Figura 87 apresenta os resultados obtidos para a variação autógena ao longo do tempo, para um mesmo concreto, utilizando os dois tipos de extensômetros testados. Foram realizadas determinações em dois corpos de prova para cada tipo de extensômetro.

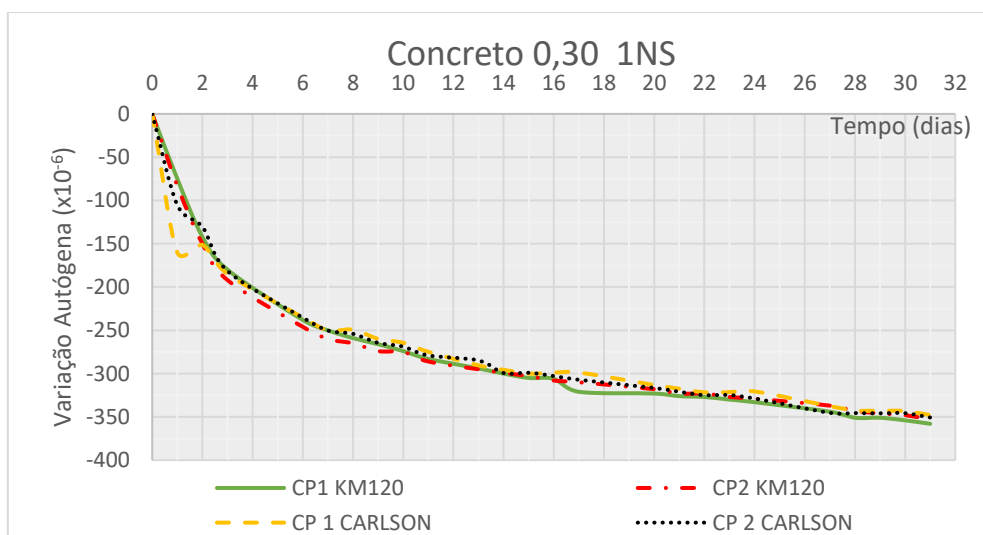


Figura 87 - Variação autógena ao longo do tempo determinada por meio de dois tipos de extensômetros: KM120 e Carlson

Nota-se que as curvas de comportamento da variação autógena, ao longo tempo, são bastante similares para todos os corpos de prova, independentemente do tipo de extensômetro utilizado. Tal observação pode ser melhor visualizada na Figura 88 que apresenta a média dos resultados dos dois corpos de prova de cada extensômetro.

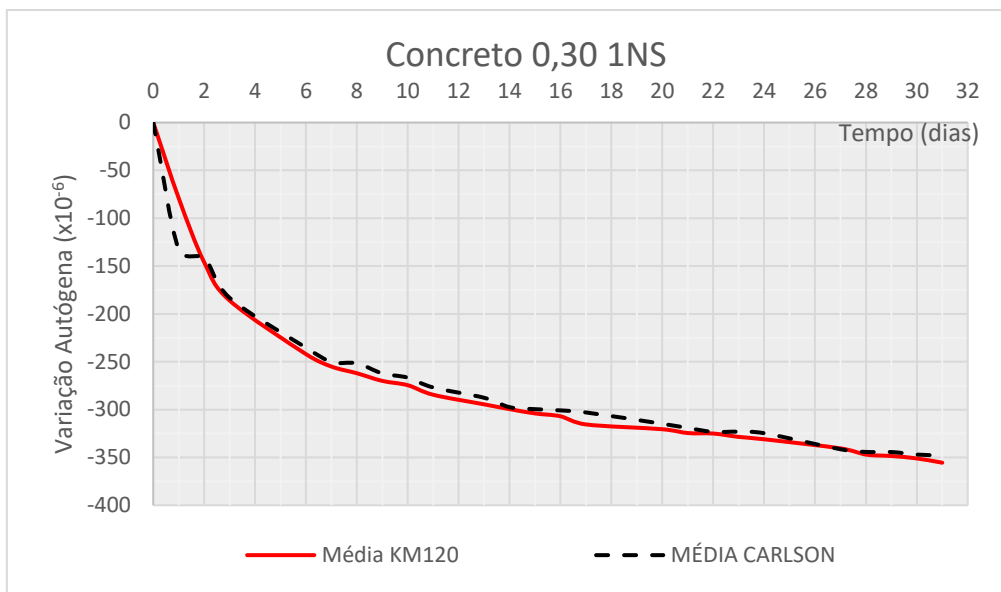


Figura 88- Comportamento da variação autóloga ao longo do tempo obtido da média de dois corpos de prova para cada tipo de extensômetro testado

Considerando que os extensômetros do tipo Carlson também funcionam como termômetro, o que permite a determinação da deformação devido ao efeito da temperatura, na Figura 89 são mostradas três curvas: uma curva descontando a retração de origem térmica, outra sem tal correção e uma terceira com as determinações do extensômetro KM120.

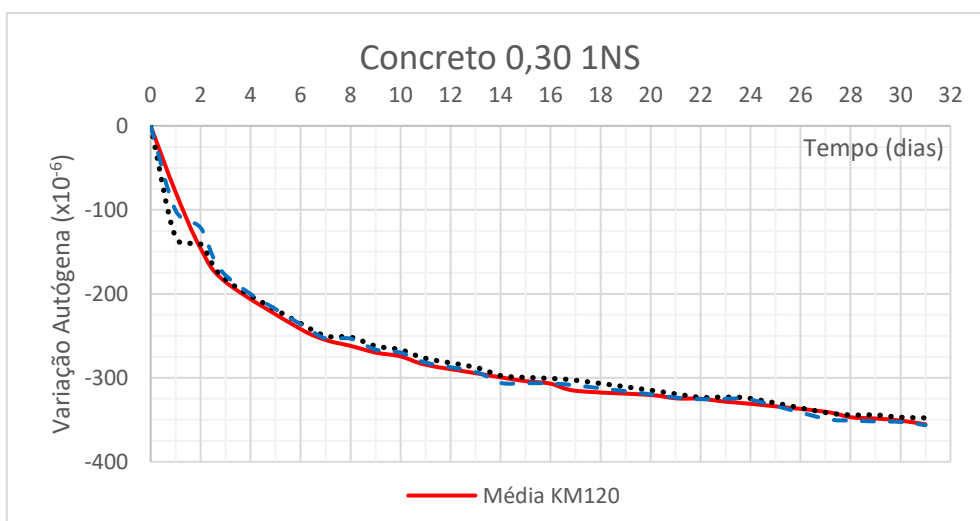


Figura 89 - Comparação da variação autóloga ao longo do tempo considerando e não considerado o efeito da temperatura

Nota-se que, as curvas são praticamente coincidentes, mostrando que a parcela de retração de origem térmica é desprezível. Daí, pode-se afirmar que não há grandes diferenças na determinação da variação autóloga medida pelo extensômetro tipo Carlson ao não



considerar o efeito da temperatura, provavelmente isso pode ser explicado pelas dimensões dos corpos de prova empregados no estudo, representando um pequeno volume, não provocando grande quantidade de calor de hidratação e conseqüentemente reduzindo o efeito da variação da temperatura. Pode-se concluir ainda que a similaridade dos resultados obtidos com os extensômetros KM120 comprovam a eficiência do sistema de temperatura auto compensável desses extensômetros, nas condições do estudo. Desse modo, os resultados mostram que tanto o extensômetro Carlson como o KM120 podem ser adotados para a realização da medição da variação autógena, por meio do método do extensômetro embutido. Desse modo, no presente estudo optou-se pela adoção do extensômetro KM120 em função do seu custo relativamente baixo, em comparação com o extensômetro Carlson<sup>20</sup>.

### **3.5.3 – Microestrutura**

#### **3.5.3.1 - Processo de paralisação da hidratação**

Nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias realizou-se a paralisação da hidratação de amostras dos concretos REF 0,30, REF 0,345, SAP(0,30+0,045), 0,30 1NS e SAP(0,30+0,045)1NS, que foram submetidos ao ensaio de microestrutura.

O processo consistiu em retirar a selagem do corpo de prova prismático e, por meio de uma serra, cortar e reduzir em amostras de forma cúbica, com aresta variando de 2 a 3 cm. As faces externas do corpo de prova eram descartadas. Lavou-se e secou a superfície das pequenas amostras com um secador portátil. Submergiu as amostras em acetona por 24 horas. Em seguida as amostras foram secas em estufa à temperatura de 60 °C, durante 48 horas. E, por fim, foram armazenadas em sacos plástico com sílica gel e cal sodada para evitar umidade e carbonatação, respectivamente, até o momento de realização do ensaio.

---

<sup>20</sup> Em novembro de 2015 o extensômetro tipo Carlson M-4 custava R\$1.300,00 (US\$ 334,44), enquanto que o extensômetro tipo KM 120-H2-11-L100-3 era adquirido por R\$100,00 (US\$ 25,73).

### 3.5.3.2. - Microscopia eletrônica de varredura - MEV

Para realização da microscopia eletrônica de varredura, após o processo de paralisação da hidratação, as amostras foram fraturas para que se coletasse do seu interior a parte que seria submetida ao ensaio. Estas amostras não tiveram nenhum tratamento especial para sua análise, apenas sendo removidas as partículas soltas oriundas da quebra do material. As amostras foram coladas no porta-amostra de alumínio e já levadas para o processo de metalização com ouro (visando torná-las condutoras e permitir a passagem de elétrons sobre suas superfícies) onde é utilizado vácuo. Depois foram acondicionadas em dessecador à vácuo com sílica gel e cal sodada, a fim de impedir a umidade e carbonatação das amostras, até as análises.

O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura da marca Tescan, modelo Vega 3XMU do Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A - Aparecida de Goiânia, de magnificação 5x a 300.000x, resolução de 2 nm e voltagem de aceleração de 300V a 30 kV. O microscópio é integrado a um espectrofotômetro de raios-X (microanálise semi-quantitativa através da Espectrofotometria por Energia Dispersiva – EDS), que utilizam os detectores de elétrons secundários (SE). O EDS é da marca *Oxford Instruments*, composto de duplo detectores tipo SDD (*Silicon Drift Detector*), modelo X-Max, com área ativa de 20 mm<sup>2</sup> e software de análises *AZtecEnergy*.

## 4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e análise das misturas de concreto e de argamassas. São apresentados resultados da caracterização das misturas no estado fresco, propriedades no estado endurecido e microestrutura.

### 4.1 - Propriedades no Estado Fresco

Na Tabela 24 são apresentadas as propriedades dos concretos obtidas no estado fresco.

Tabela 24 - Propriedades dos concretos no estado fresco

Traço	Concreto			
	Abatimento (mm)	Teor de SP (%)	Teor de Ar (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
REF0,30	210	2,25	1,8	2426
REF0,345	195	1,50	2,4	2378
REF0,367	190	1,44	3,9	2350
SAP(0,30 + 0,045)	200	2,51	2,5	2394
SAP(0,30 + 0,067)	205	2,80	3,5	2330
0,30 1NS	210	2,69	2,9	2407
0,30 2NS	190	3,20	3,5	2406
SAP(0,30+0,045)1NS	205	2,80	2,7	2359
SAP(0,30+0,045)2NS	200	3,20	2,6	2368
SAP(0,30+0,067)1NS	200	3,00	3,8	2310
SAP(0,30+0,067)2NS	210	3,40	4,5	2279
Concretos Adicionais				
REF 0,30	150	1,5	1,50	2406
0,30 1NS	10	1,5	3,90	2425
SAP(0,30+0,045)	80	1,5	3,10	2321
SAP(0,30+0,045)1NS	30	1,5	2,90	2362

Na Tabela 25 são mostrados os resultados de espalhamento das argamassas.

Tabela 25 - Espalhamento das argamassas na mesa de consistência

Traço	Espalhamento (mm)
REF 0,30	215
SAP (0,30+0,045)	170
REF 0,345	305
SAP (0,30+0,067)	165
REF 0,367	320
0,30 1NS	100
SAP(0,30+0,045)1NS	110
SAP(0,30+0,067)1NS	105
REF 0,30 (1,00% SP)	107
REF 0,30 (1,25% SP)	165

#### 4.1.1 - Consistência

Pode-se observar que, em todas as misturas dos concretos que tinham como premissa o valor fixo do abatimento, obteve-se o resultado dentro do intervalo definido de (200±10) mm, como mostra a Figura 90.

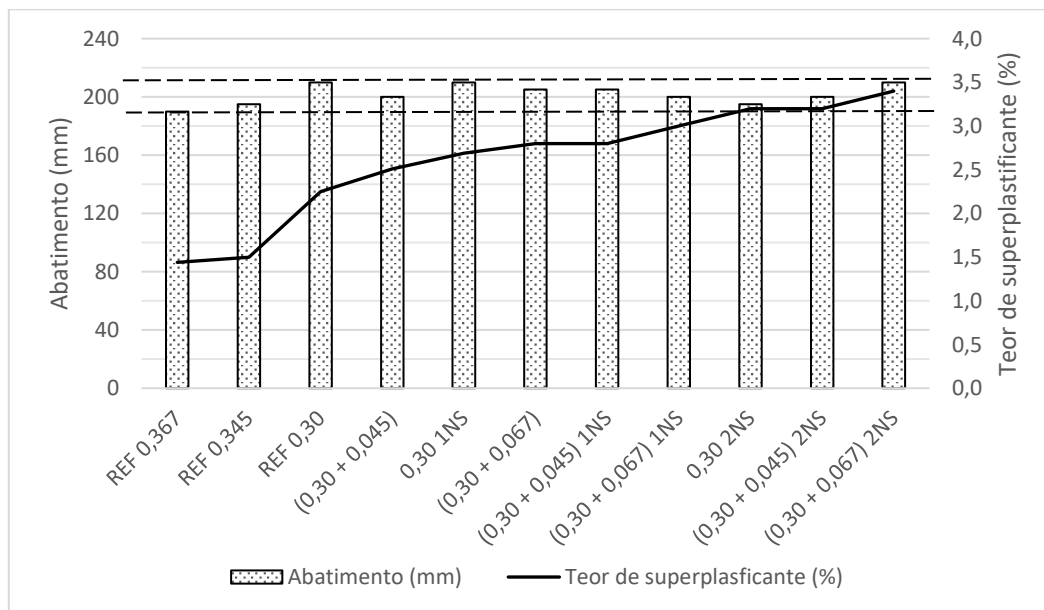


Figura 90 - Valores de abatimento, em mm, e teor de superplastificante das misturas principais de concreto. As linhas tracejadas indicam o intervalo do abatimento fixado

Obter os valores de abatimento dentro do intervalo definido no estudo ( $200 \pm 10$  mm), só foi possível variando-se o teor de superplastificante nas misturas dos concretos, como mostra a Figura 90. Nota-se que tanto com a adição de polímero superabsorvente quanto com a adição de nanossílica, foi necessário acréscimo no teor de aditivo superplastificante para manter os concretos com o mesmo valor de abatimento, mostrando que os dois materiais exercem efeito sobre a reologia das misturas.

Para manter o valor de abatimento dentro do intervalo definido os concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) tiveram um acréscimo no teor de superplastificante de 12% e 24%, respectivamente, em relação ao concreto de referência REF 0,30. Em comparação com esse concreto, os concretos 0,30 1NS e 0,30 2NS necessitaram elevar o teor de superplastificante em 20% e 42%, respectivamente.

Ao analisar o efeito da ação combinada do polímero superabsorvente com a adição de nanossílica, observa-se que os concretos SAP(0,30+0,045)1NS e SAP(0,30+0,045)2NS apresentam um teor de superplastificante maior em 12% e 27%, respectivamente, do que o teor do concreto SAP(0,30+0,045). Comportamento semelhante foi observado ao comparar os concretos SAP(0,30+0,067)1NS e SAP(0,30+0,067)2NS com o concreto SAP(0,30+0,067), nesse caso o acréscimo no teor de aditivo foi de 7% e 21%, respectivamente. Por outro lado, ao realizar a análise fixando o teor de nanossílica e variando a quantidade de polímero, nota-se menores elevações no teor do aditivo superplastificante. Nessas situações, os concretos SAP(0,30+0,045)1NS e SAP(0,30+0,067)1NS apresentaram um acréscimo no teor de superplastificante de 4% e 11%, respectivamente, em relação ao concreto 0,30 1NS, enquanto no caso dos concretos SAP(0,30+0,045)2NS e SAP(0,30+0,067)2NS, somente esse último apresentou necessidade de acréscimo no teor de superplastificante em relação ao concreto 0,30 2NS para alcançar o valor de abatimento, sendo esse acréscimo de apenas 6%.

Pode-se afirmar, portanto, que tanto o polímero superabsorvente quanto a nanossílica alteram as propriedades reológicas do concreto, aumentando a necessidade de aditivo superplastificante para manter determinado abatimento, sendo que a adição de nanossílica tem maior efeito do que o polímero superabsorvente.

Agostinho (2017) avaliou os efeitos da adição do polímero superabsorvente e da nanossílica sobre as propriedades reológicas de pastas de cimento, utilizando os mesmos materiais empregados no presente estudo. Os resultados mostraram que a adição de polímero superabsorvente não altera a viscosidade da pasta de cimento, mas aumenta a tensão de escoamento, enquanto a adição de nanossílica eleva tanto a viscosidade como a tensão de escoamento das pastas. Também foi observado que a nanossílica exerce maior influência nas propriedades reológicas que o SAP. As pastas contendo 2% de nanossílica apresentaram valores muito maiores para viscosidade e, principalmente, para a tensão de escoamento, com valores até 20 vezes maior que a pasta de referência.

Quanto maior a tensão de escoamento, maior é o esforço necessário para que a mistura comece a escoar e, após iniciar o escoamento, quanto maior a viscosidade mais difícil é manter esse escoamento. Desse modo, os maiores teores de aditivo superplastificante requeridos pelas misturas dos concretos com adição de polímero superabsorvente e de nanossílica estão de acordo com os efeitos dessas adições sobre as propriedades reológicas das pastas.

A Figura 91 mostra os resultados de espalhamento obtidos para as misturas de argamassas. Destaca-se que as misturas possuem o mesmo teor de aditivo superplastificante igual a 1,5% em relação a massa de cimento e, portanto, observa-se a variação dos valores de espalhamento. No entanto, a mesma discussão realizada para as misturas de concretos se aplicam para as argamassas, onde se observa que o polímero superabsorvente e a nanossílica provocam a redução do espalhamento, sendo os menores valores de espalhamento observados nas misturas com nanossílica. Khaloo et al. (2016) também observaram em seus estudos que a adição de partículas de nanossílica reduziu o espalhamento de concretos de alta resistência.

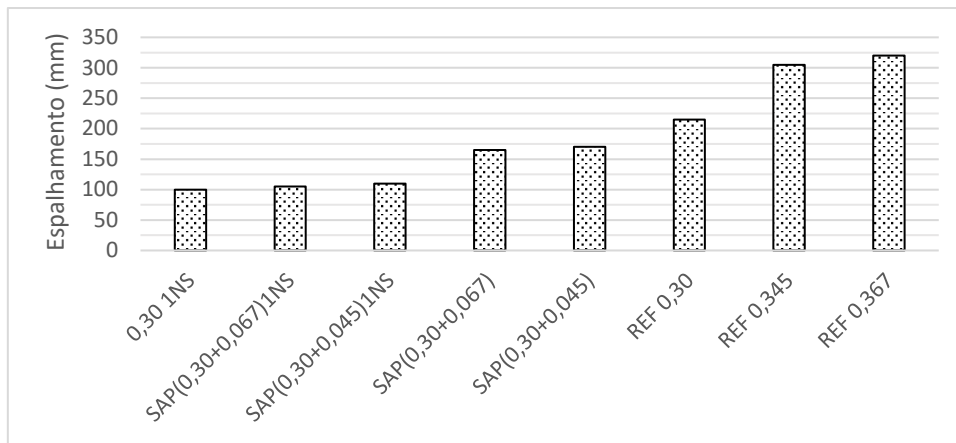


Figura 91 – Espalhamento de argamassas com mesmo teor de superplastificante

Confirmando o efeito da nanossílica e do polímero superabsorvente sobre as propriedades reológicas, comportamento semelhante é observado para as misturas dos concretos com teor de aditivo fixo, como mostra a Figura 92.

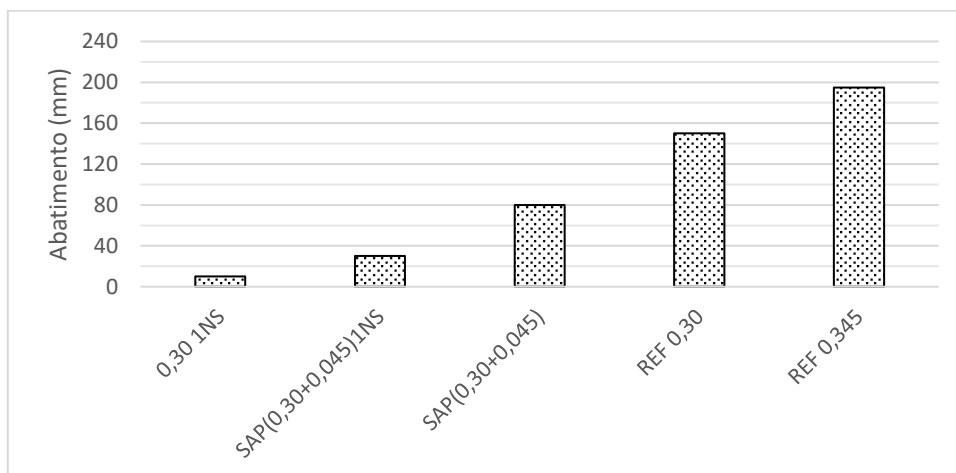


Figura 92 – Abatimento dos concretos com o mesmo teor de superplastificante

#### 4.1.2 – Teor de ar e Densidade

Buscando facilitar a discussão dos resultados de teor de ar aprisionado e de densidade, apresenta-se a seguir uma análise dividida em três etapas: a) influência da adição do polímero superabsorvente; b) influência da adição da nanossílica; e c) o efeito combinado da adição do SAP e da nanossílica.

a) Influência da adição do polímero superabsorvente

A Figura 93 mostra o comportamento da densidade e do teor de ar aprisionado com incorporação de SAP nos concretos.

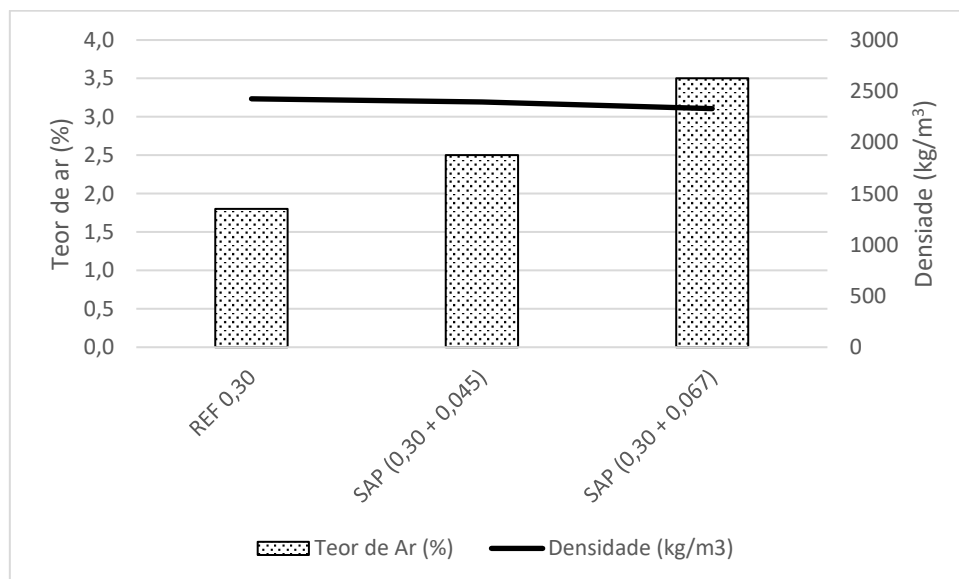


Figura 93 – Comportamento do teor de ar aprisionado e densidade em função da adição de polímero superabsorvente

Nota-se que os concretos com adição de polímero superabsorvente apresentaram maiores teores de ar aprisionado do que o concreto de referência. O concreto SAP(0,30+0,045) apresentou um teor de ar aprisionado 39% maior do que o concreto REF 0,30 e o concreto SAP(0,30+0,067) apresentou um teor de ar quase duas vezes maior do que a referência.

Dudziak e Mechtcherine (2010), Laustsen et al. (2015) e Manzano (2016) também observaram em seus resultados o acréscimo do teor de ar aprisionado no estado fresco em misturas de argamassas e concretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorvente. Laustsen et al. (2015) investigaram a causa desse efeito em concretos utilizando o mesmo polímero desta pesquisa, mas de lotes de fabricação diferentes. Os autores concluíram que o incremento do teor de ar aprisionado parece ser resultado de uma contaminação da superfície das partículas do polímero por um agente tensoativo. Esse agente é o resíduo da suspensão auxiliar utilizada no processo de produção do polímero e funciona como um aditivo incorporador de ar.



Os concretos mostrados na Figura 93 possuem diferentes teores de aditivo superplastificante, o que poderia ser um fator para influenciar o teor de ar aprisionado nas misturas. No entanto, ao comparar o teor de ar aprisionado dos concretos REF 0,30 e SAP(0,30+0,045), com o mesmo teor de aditivo superplastificante, também se observa a tendência do aumento do teor de ar e uma leve redução da densidade com a adição do polímero superabsorvente, como mostra a Figura 94. Nessa situação, o aumento do teor de ar aprisionado do concreto SAP(0,30+0,045) foi de 106% em relação ao concreto de referência. Pode-se afirmar, portanto, que o polímero do estudo causa o aumento do teor de ar aprisionado no concreto.

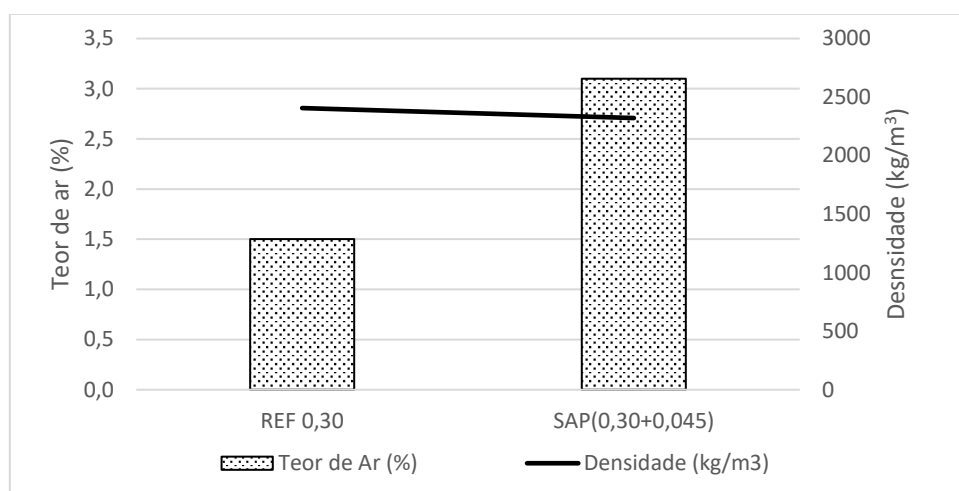


Figura 94 – Teor de ar aprisionado e densidade, no estado fresco, de concretos com e sem polímero superabsorvente, com a mesma dosagem de aditivo superplastificante

A diminuição da densidade dos concretos em função da incorporação do polímero superabsorvente foi de no máximo 4%, independente do teor de aditivo superplastificante dos concretos. Outros estudos encontraram resultados semelhantes (SUARÉZ, 2015; SANTOS, 2016; Manzano, 2016). Este comportamento pode ser explicado pelo maior teor de ar aprisionado ocasionado pelo polímero.

#### b) Influência da adição de nanossílica

A adição de nanossílica também causou aumento no teor de ar aprisionado, como é mostrado na Figura 95. Nota-se que a adição de 1% de nanossílica resultou num acréscimo do teor de ar aprisionado igual a 61% em relação a mistura de referência, enquanto que a adição de 2% de nanossílica praticamente dobrou o teor de ar aprisionado.

Em relação a densidade, a adição de nanossílica praticamente não afetou essa característica, o que está de acordo com os resultados de Santos (2016).



Figura 95 - Comportamento do teor de ar aprisionado e densidade em função da adição de nanossílica

Os resultados mostrados na Figura 95 são referentes a concretos com diferentes teores de aditivo superplastificante. Para eliminar a suspeição de que a variação do teor de aditivo superplastificante poderia estar afetando o teor de ar aprisionado das misturas, verificou-se a influência da adição de nanossílica no teor de ar e densidade em concretos com o mesmo teor de aditivo. Os resultados confirmam o acréscimo no teor de ar aprisionado com a adição de nanossílica e o efeito insignificante sobre a densidade, como é observado na Figura 96.

Senff et al. (2009b) e Santos (2016) também observaram em seus resultados o aumento do teor de ar aprisionado com o aumento do teor de adição de nanossílica. Segundo os autores, a presença de nano partículas de sílica causa a diminuição da densidade no estado fresco, o que interfere no teor de ar incorporado. No entanto, considerando que os resultados mostraram pouca influência sobre a densidade dos concretos no estado fresco, o motivo da quantidade extra de ar ainda deve ser encontrado.

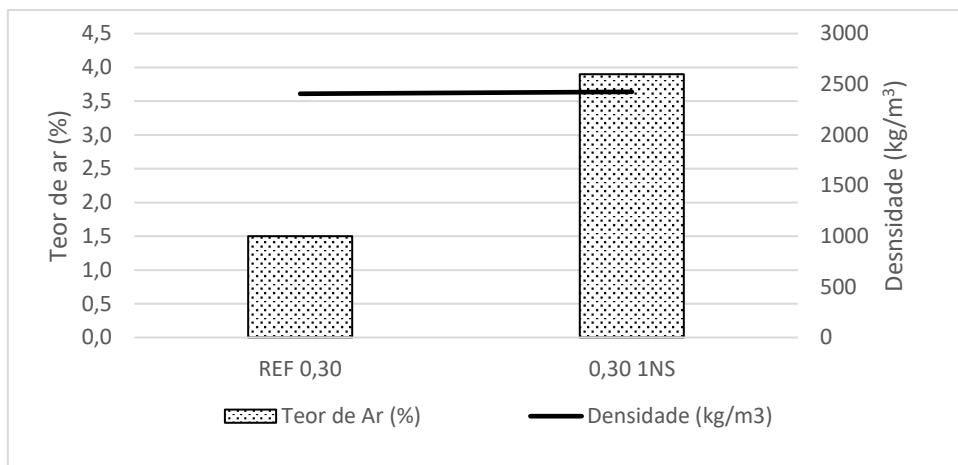


Figura 96 – Efeito da adição de nanossílica no teor de ar aprisionado e densidade em concretos com o mesmo teor de aditivo superplastificante

c) Influência da adição combinada de polímero superabsorvente e de nanossílica

Na Figura 97 são mostrados os resultados de teor de ar aprisionado e densidade para as misturas com adição combinada de polímero superabsorvente e nanossílica em comparação com os concretos que possuem somente uma das adições.

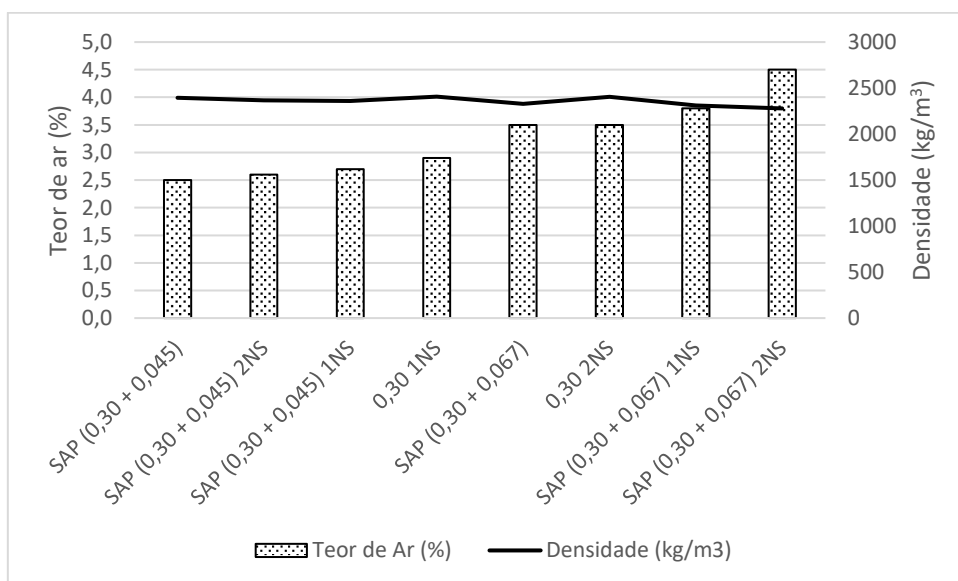


Figura 97 - Influência da adição combinada de polímero superabsorvente e de nanossílica sobre o teor de ar aprisionado e densidade dos concretos no estado fresco

Nota-se um comportamento diferente da ação combinada do polímero com a nanossílica em função da quantidade de polímero superabsorvente empregado. Enquanto para os concretos com menos SAP a adição de nanossílica não representou grandes alterações no

teor de ar aprisionado, para os concretos com mais polímero a adição de nanossílica colabora para incrementar o teor de ar aprisionado.

Os concretos SAP(0,30+0,045)1NS e SAP(0,30+0,045)2NS apresentaram respectivamente 2,7% e 2,6% de teor de ar, ou seja, praticamente o mesmo valor do concreto SAP(0,30+0,045). Por outro lado, para os concretos com maior quantidade de polímero superabsorvente ( $a_{inc}/c$  0,067) nota-se um acréscimo no teor de ar aprisionado com o aumento da adição de nanossílica. O concreto SAP(0,30+0,067)1NS apresentou um acréscimo de 9% no teor de ar em comparação com o concreto SAP(0,30+0,067), enquanto que para o concreto SAP(0,30+0,067)2NS esse aumento foi de 28%. Acredita-se que para os maiores teores de polímero há um somatório de efeitos que resultam nos maiores valores de ar aprisionado observados.

Deve-se destacar que os resultados mostrados na Figura 97 são referentes a concretos com diferentes dosagens de aditivo superplastificante. No entanto, ao comparar os concretos SAP(0,30+0,045)1NS, SAP(0,30+0,045) e 0,30 1NS com a mesma dosagem de aditivo superplastificante, nota-se um comportamento semelhante ao discutido anteriormente, como pode ser observado na Figura 98. Nessa condição observa-se um teor de ar aprisionado de 2,9% para concreto SAP(0,30+0,045)1NS, muito próximo do valor do concreto SAP(0,30+0,045) que foi de 3,1%.

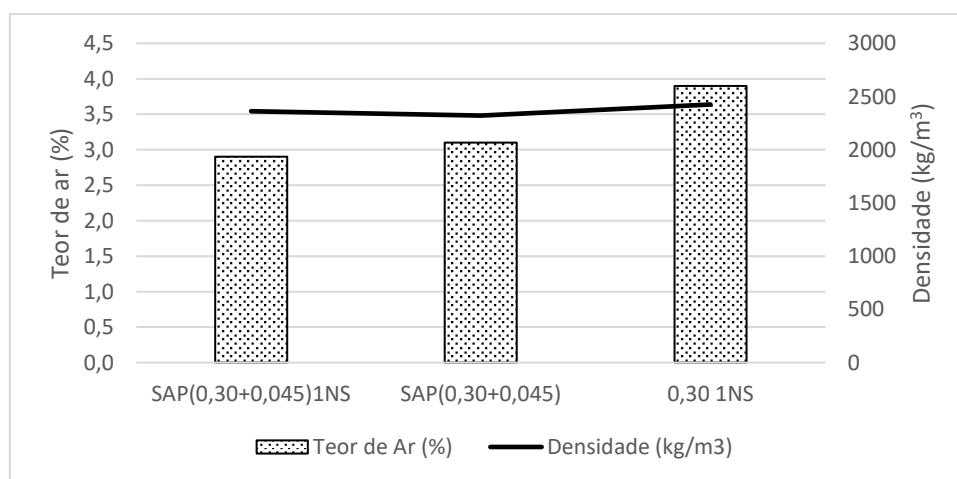


Figura 98 - Efeito da adição combinada de SAP e nanossílica no teor de ar aprisionado e densidade em concretos com a mesma dosagem de superplastificante

Em relação à densidade, não se observou grandes alterações com a adição combinada de polímero e nanossílica em nenhuma situação.

#### 4.1.3 - Tempo de Transição Suspensão-Sólido ou Tempo Zero ( $T_{zero}$ )

O tempo de transição suspensão-sólido ou simplesmente tempo zero ( $T_{zero}$ ) é o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que se adiciona a água ao cimento até o instante em que se observa que o sistema cimentício apresenta uma estrutura suficientemente rígida para se opor às variações de volume impostas pelas reações de hidratação. O tempo zero foi determinado para assegurar o momento inicial da determinação experimental da retração autógena. Os resultados de tempo zero obtidos para os concretos e argamassas estudados são apresentados na Tabela 26. Lembrando que os concretos possuem teor de aditivo superplastificante variável, enquanto as argamassas apresentam teor de aditivo superplastificante fixo.

Tabela 26 - Tempo zero dos traços de concreto e argamassa

Traço	Tempo zero (hora)	
	Concreto	Argamassa
REF 0,30	6,00	6,10
REF 0,345	3,55	13,10
REF 0,367	3,25	13,60
SAP (0,30+0,045)	5,00	5,90
SAP (0,30+0,067)	4,80	6,10
0,30 1NS	4,15	4,10
0,30 2NS	4,15	-
SAP (0,30+0,045)1NS	4,60	4,80
SAP (0,30+0,045)2NS	3,85	-
SAP (0,30+0,067)1NS	4,30	4,80
SAP (0,30+0,067)2NS	3,65	-
REF 0,30 1,00%SP	-	4,6
REF 0,30 1,25%SP	-	5,6

O tempo zero dos concretos foi determinado por meio da curva de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo. A Figura 99 mostra uma curva típica obtida para os concretos. As curvas de todos os concretos são mostradas no Apêndice B.1.

O tempo zero das argamassas foi determinado por meio do desenvolvimento da taxa de deformação em função do tempo, conforme descrito na letra “a” do item 3.5.1.1. Os gráficos utilizados para essa determinação do tempo zero das argamassas podem ser observados no Apêndice B.2.

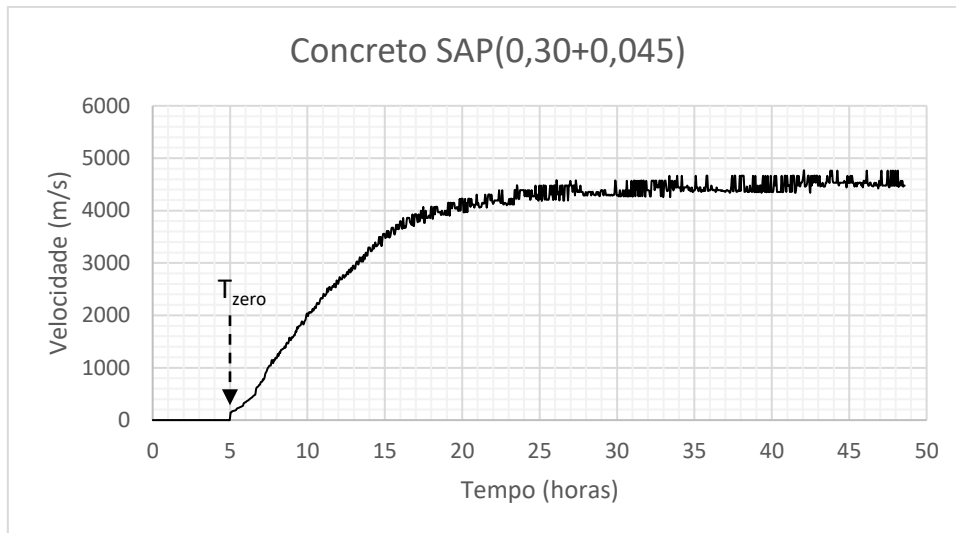


Figura 99 - Curva típica dos resultados de determinação do Tempo zero pelo método da velocidade do pulso ultrassônico

De um modo geral, todos os concretos apresentaram tempo zero menor do que o concreto de referência REF 0,30, incluindo os outros dois concretos de referência (REF 0,345 e REF 0,367), como é mostrado na Figura 100.

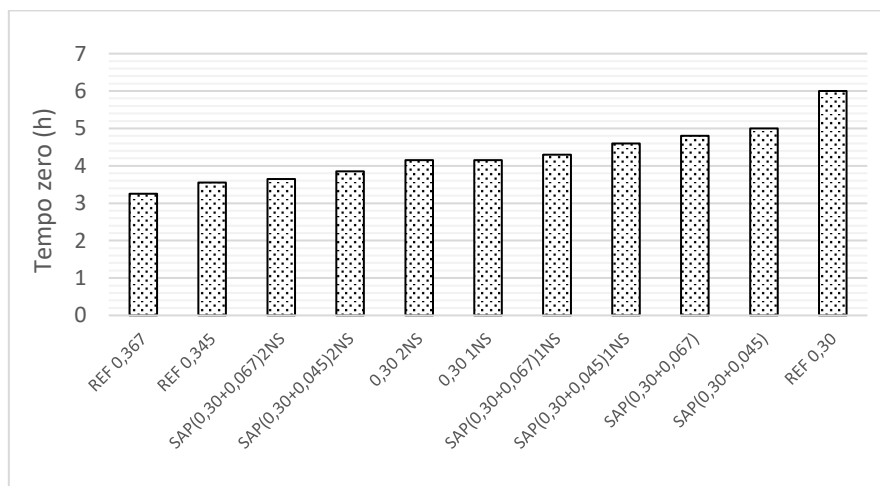


Figura 100 - Tempo zero dos concretos estudados

Analisando apenas as três misturas de concretos de referência, variando a relação água/cimento, esse comportamento relativo das misturas não era esperado, uma vez que

a uma maior quantidade de água livre presente na mistura corresponde maior distância entre partículas sólidas e menor concentração de soluto, levando ao incremento do tempo de transição suspensão-sólido dos concretos em condições normais. Porém, a presença de aditivo superplastificante normalmente faz aumentar os tempos de pega (MOUNANGA et al., 2003; ZHANG et al., 2016) devido à adsorção das moléculas na superfície das partículas de cimento, retardando o contato com as moléculas de água. Esse retardamento é tanto maior quanto maior for a dosagem de superplastificante, o que vai de encontro à variação obtida no tempo zero dos concretos de referência.

No caso das argamassas, onde se manteve constante a dosagem de SP, o comportamento relativo das misturas de referência esteve de acordo com as respectivas relações água/cimento, ou seja, tempo zero mais baixo na mistura REF 0,30 e tempo zero mais elevado na mistura REF 0,367, como é observado na Figura 101.

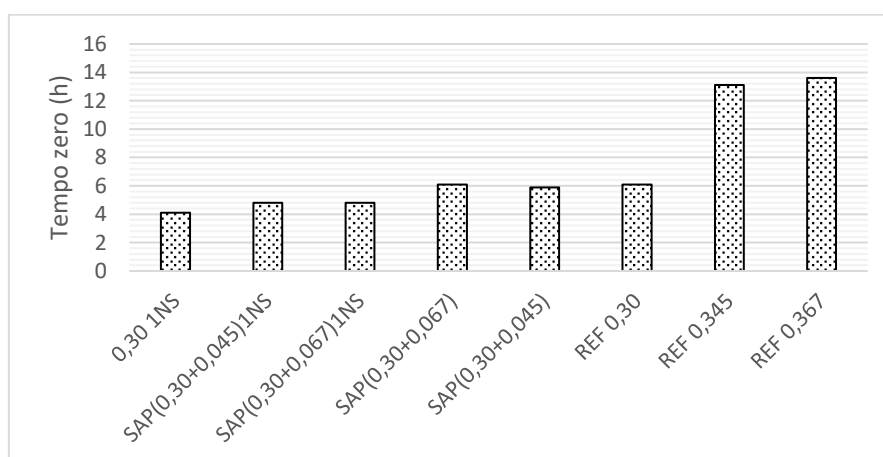


Figura 101 - Tempo zero das argamassas estudadas

A influência da dosagem de superplastificante é melhor observada na Figura 102.

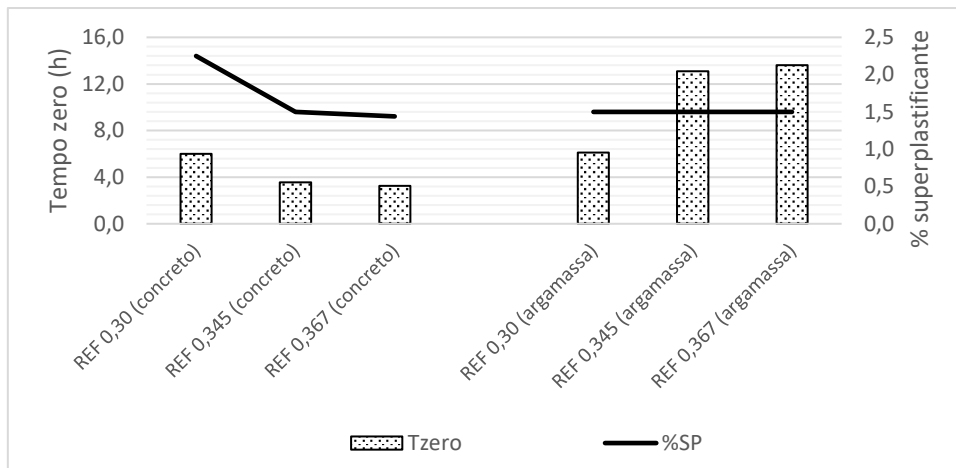


Figura 102 - Comportamento do tempo zero dos traços de referência dos concretos e argamassas em função da dosagem de superplastificante

O efeito do aditivo superplastificante em atrasar o tempo zero foi comprovado realizando a mistura da argamassa de referência REF 0,30 com outros dois teores de aditivo e se observou o aumento do tempo zero com o acréscimo da dosagem de aditivo, como mostra a Figura 103.

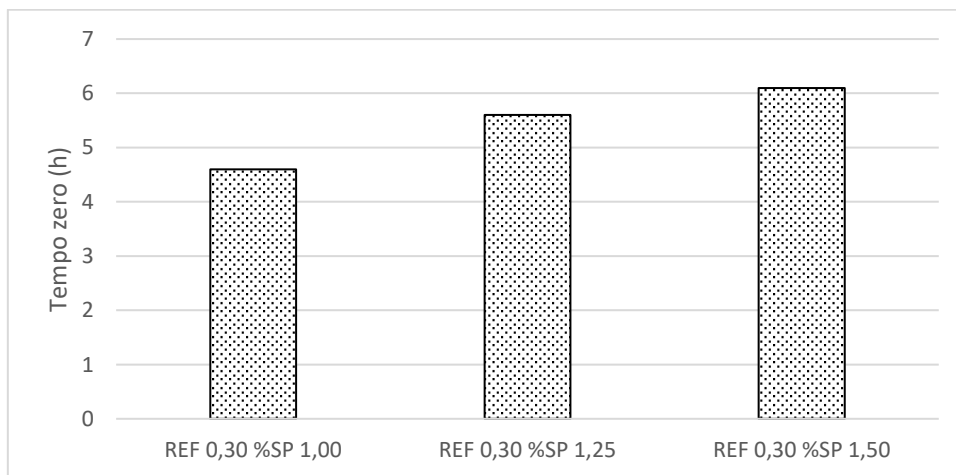


Figura 103 - Tempo zero da argamassa REF 0,30 com diferentes teores de aditivo superplastificante

O retardamento das reações de hidratação provocado pela diferença do teor de aditivo nos concretos de referência também pode ser observado na fase de desenvolvimento das curvas de velocidade do pulso ultrassônico, como é mostrado na Figura 104.



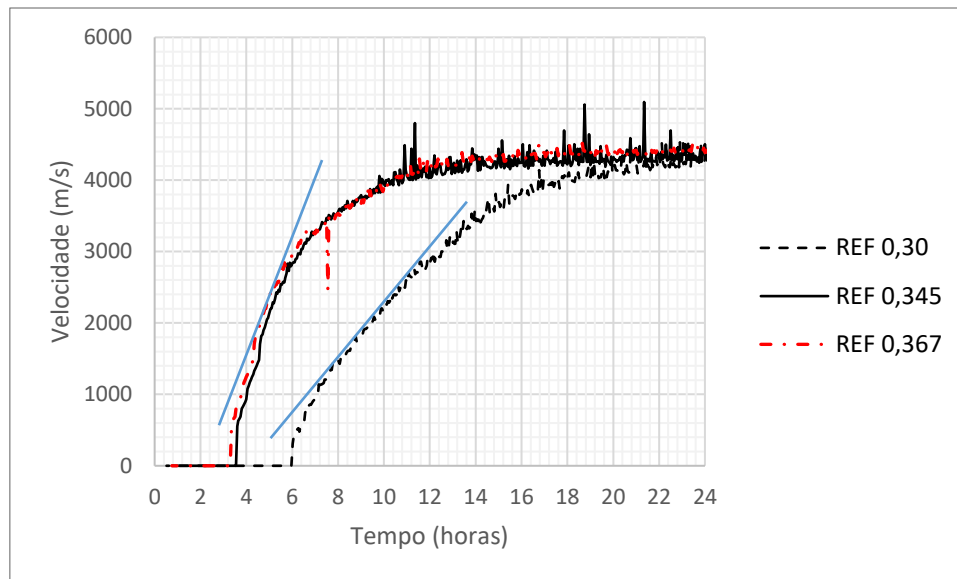


Figura 104 - Comportamento da curva de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos de referência

Nota-se que os concretos REF 0,345 e REF 0,367 apresentam um comportamento similar quanto à inclinação da curva e estabilização da velocidade do pulso, devido aos menores teores de aditivo superplastificante utilizados que foram de 1,5% e 1,44%, respectivamente. Enquanto que o concreto de referência REF 0,30, apresenta uma inclinação menos acentuada em relação às outras curvas, levando um tempo maior para atingir a estabilização da velocidade do pulso ultrassônico. Acredita-se que esse comportamento também está relacionado com o efeito retardador de pega provocado pela dosagem elevada de aditivo superplastificante para o concreto REF 0,30.

Os resultados de tempo zero das misturas REF 0,345 e REF 0,367 são também semelhantes nas argamassas, sendo, porém, díspares nos dois materiais (concreto e argamassa) apesar do teor equiparável de SP, cerca de 3,5 horas nos concretos para mais de 13 horas nas argamassas. Esta diferença muito significativa no tempo zero pode resultar do diferente superplastificante usado, mas considera-se que os diferentes tipos de cimentos utilizados tiveram uma influência mais marcante, particularmente tendo em conta o teor de aluminatos de cálcio e a finura (PLANK, et. al, 2006; ZINGG, et al., 2009; GRIESSER, 2002). Efetivamente, o cimento usado nos concretos apresenta um teor de óxido de alumínio 40% superior ao cimento usado nas argamassas e uma finura Blaine 55% superior. Assim, tendo sabendo-se que foram usados cimentos e aditivos superplastificantes distintos nos concretos e nas argamassas, apesar de não ter sido avaliado, é de esperar que a dosagem de saturação da mistura de superplastificante com

CP V ARI seja superior à da mistura de superplastificante com cimento CEM I 42,5 R (ZINGG, et al., 2009), o que vai de encontro aos tempos zero semelhantes, cerca de 6 horas, no concreto REF 0,30 (com 2,25 % de SP) e na argamassa REF 0,30 (com 1,5% de SP).

Buscando uma melhor interpretação e discussão dos resultados, apresenta-se a seguir uma análise dividida em três etapas: a) avaliação da adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna; b) análise da adição da nanossílica nas misturas; e c) o efeito combinado da adição do SAP e da nanossílica.

#### a) influência da adição do polímero superabsorvente

Os resultados mostraram que a adição de polímero superabsorvente, com a correspondente correção da água de amassamento, reduziu o tempo zero dos concretos com SAP, em comparação ao concreto REF 0,30, apesar da dosagem de superplastificante ser ligeiramente superior, como é mostrado na Figura 105.

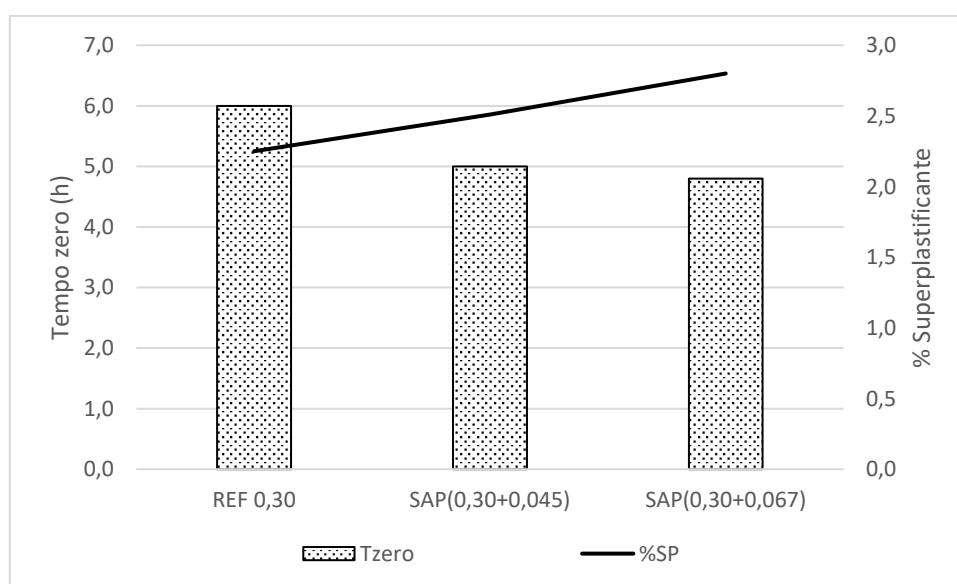


Figura 105 - Influência do teor de água incorporada no tempo zero dos concretos

Nota-se, no entanto, que ao aumentar o teor de polímero empregado, praticamente não se altera o valor do tempo zero. Observou-se que o tempo zero foi igual a 5,0 e 4,8 horas para os concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067), respectivamente, enquanto para o concreto de referência REF 0,30 o tempo zero foi igual a 6 horas, ou seja, os concretos

com adição de polímero mostraram uma redução média de 18% no tempo zero em comparação com o concreto de referência.

O menor tempo zero observado para os concretos com polímero em relação ao concreto sem polímero pode ser por causa da redução do espaço entre partículas, permitindo um tempo de percolação ligeiramente inferior. Este efeito seria mais marcante nos concretos do que nas argamassas, face à presença de agregado graúdo, anulando até o eventual efeito de retardamento de pega provocado pela maior dosagem de aditivo superplastificante no concreto de referência.

O efeito da variação da dosagem do aditivo superplastificante fica evidente ao observar os resultados de tempo zero obtidos nas misturas de argamassas. Enquanto a argamassa REF 0,30 apresentou um tempo zero igual a 6,1 horas, as argamassas SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) apresentaram tempo zero igual a 5,9 e 6,1 horas, respectivamente, ou seja, as argamassas com adição de SAP possuem praticamente o mesmo tempo zero da argamassa de referência sem o polímero, sendo que nesse caso o teor de aditivo superplastificante é igual para todas as misturas.

Na literatura, encontram-se trabalhos que mostram aumento do tempo zero ou dos tempos de pega das misturas cimentícias contendo SAP em relação às misturas sem SAP (REINHARDT e ASSMANN, 2010; ASSMANN, 2013), enquanto outros mostram que a adição de SAP não afeta o tempo zero ou tempos de pega (POURJAVADI *et al.* (2012). Ainda há trabalhos que apresentam resultados onde o tempo zero ou tempos de pega são ligeiramente reduzidos com a adição de SAP em relação às misturas sem SAP (ALMEIDA e KLEM, 2016). No entanto, se deve destacar que as condições de estudos variam muito o que torna difícil a comparação entre os resultados.

Na Figura 106 é apresentada a evolução da curva de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo para as misturas de concreto com e sem polímero superabsorvente. Nota-se um comportamento similar das três curvas, no que se refere a fase de desenvolvimento da curva, logo após o tempo zero, convergindo para uma velocidade de estabilização em intervalos de tempos similares. A diferença nas curvas consiste basicamente no valor de tempo zero, com este ocorrendo mais cedo nas misturas com polímero. A razão para esse

comportamento já foi discutida e pode resultar da antecipação da percolação de sólido devida à ocupação de espaço pelo polímero.

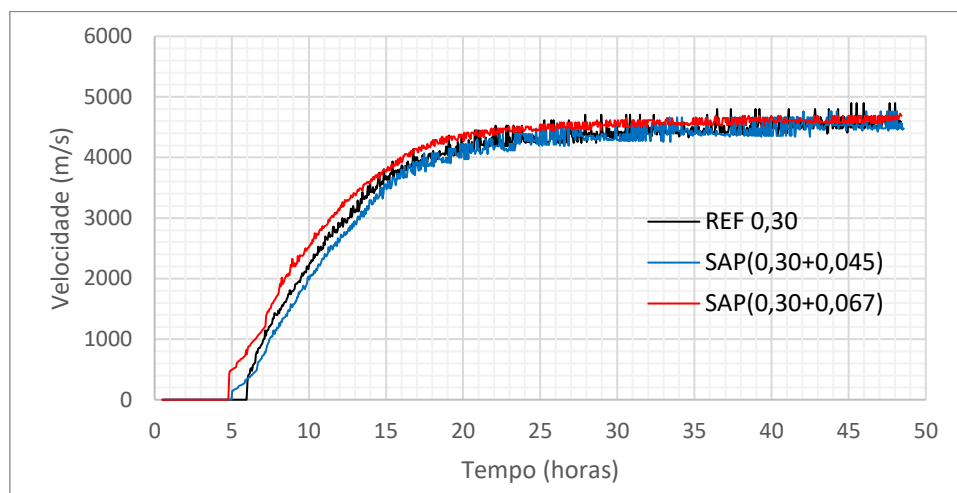


Figura 106 - Comportamento da curva de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos com e sem polímero superabsorvente

#### b) influência da adição de nanossílica

Conforme esperado o tempo zero dos concretos com adição de nanossílica foram menores do que o tempo zero do concreto REF 0,30, não só pelo aumento da concentração de sólidos, mas ainda face à natureza ligante do produto. Enquanto o concreto REF 0,30 apresentou um tempo zero igual a 6 horas, os concretos 0,30 1NS e 0,30 2NS apresentaram tempo zero idênticos e iguais a 4,15 horas. Isso representa uma redução de 30% do valor do tempo zero dos concretos com nanossílica em relação ao concreto sem adição de nanossílica. No entanto, sem considerar o efeito do superplastificante, esperaria-se que o tempo zero diminuísse com o aumento do teor de nanossílica. Acredita-se que não houve redução do tempo zero com o aumento do teor de nanossílica de 1% para 2% devido ao maior teor de aditivo superplastificante dos concretos com 2% de nanossílica, como é mostrado na Figura 107.



Figura 107 - Tempo zero e teor de aditivo superplastificante dos traços de concreto com e sem adição de nanossílica

Como já discutido anteriormente, a elevada dosagem de aditivo superplastificante provavelmente causa um efeito retardador de pega. Por outro lado, a adição da nanossílica tem um efeito oposto. Assim, o aumento do teor de nanossílica de 1% para 2% e o aumento da dosagem do aditivo resultam em equilíbrio relativamente ao tempo zero, não existindo variação entre o concreto 0,30 2NS em relação ao concreto 0,30 1NS.

O efeito sobre as reações de hidratação provocado pelo aditivo superplastificante também pode ser observado na fase de desenvolvimento das curvas de velocidade do pulso ultrassônico, como é mostrado na Figura 108.

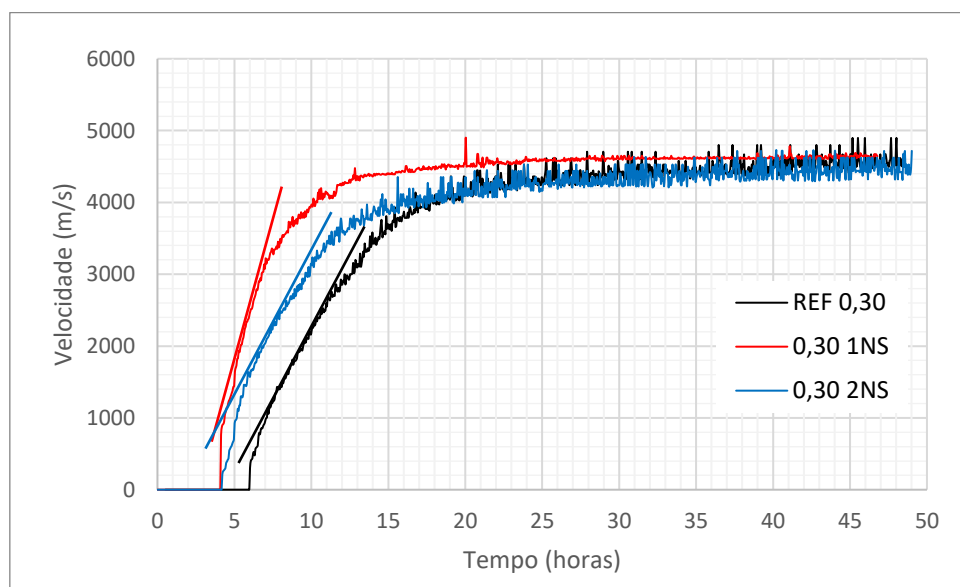


Figura 108 - Curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para concretos com e sem nanossílica

Nota-se que os concretos REF 0,30 e 0,30 2NS apresentam um comportamento similar quanto à inclinação da curva e estabilização da velocidade do pulso ultrassônico,

enquanto o concreto de 0,30 1NS, apresenta uma inclinação mais acentuada em relação às outras curvas, levando um tempo menor para atingir a estabilização da velocidade. Acredita-se que esse comportamento também está relacionado com o efeito retardador de pega provocado pela dosagem elevada de aditivo superplastificante.

No caso das argamassas, que não possui o teor de aditivo superplastificante como variável, fica mais evidente o efeito da adição de nanossílica sobre o tempo zero, pois observa-se uma redução de 33% no tempo zero da argamassa 0,30 1NS em relação a argamassa REF 0,30.

Santos (2016) também observou em argamassas de alta resistência, produzidas com os mesmos materiais empregados na produção dos concretos, uma redução no tempo zero de 55% nas misturas com adição de nanossílica, em relação à mistura sem nanossílica.

A nanossílica age como pontos de nucleação, promovendo a aceleração das reações de hidratação do cimento e também como ativadora das atividades pozolânicas, o que causa a redução do tempo zero.

#### c) influência da adição combinada de polímero superabsorvente e de nanossílica

As análises anteriores mostraram que tanto a adição de polímero superabsorvente quanto a adição de nanossílica apresentaram a tendência de reduzir o tempo zero dos concretos em relação à mistura de referência. No entanto, não se espera um efeito sinérgico ao combinar essas adições. Para analisar o efeito combinado das adições, deve-se observar o efeito de cada uma em relação a outra. Na Figura 109 é mostrado o efeito da adição do polímero superabsorvente quando o teor de nanossílica é mantido constante.

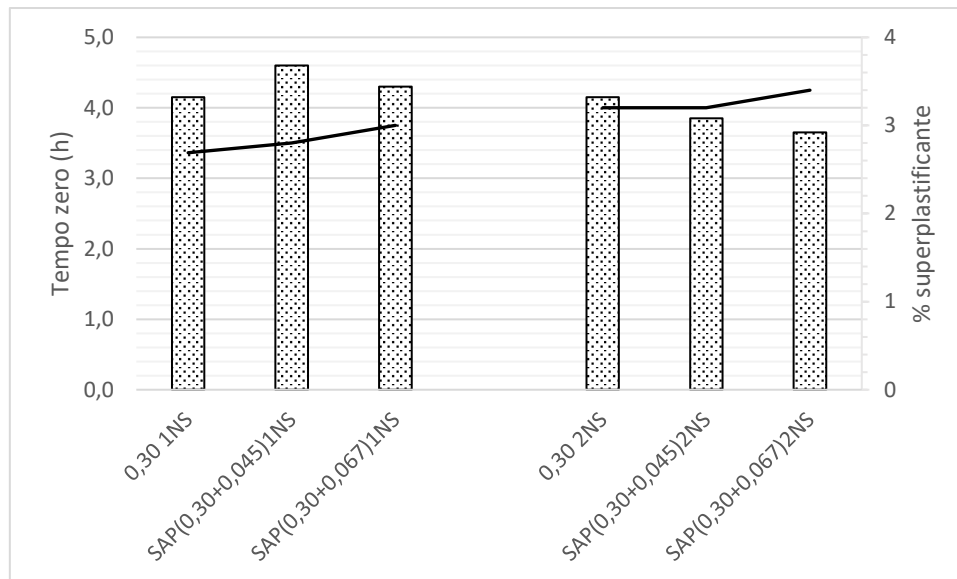


Figura 109 – Efeito da adição de polímero superabsorvente no tempo zero de concretos com teores fixos de nanossílica

Nota-se que para o teor de 1% de nanossílica, a adição de polímero superabsorvente incrementou o tempo zero em 11% e 4%, em relação ao tempo zero do concreto 0,30 1NS, respectivamente para os concretos SAP(0,30+0,045)1NS e SAP(0,30+0,067)1NS. Por outro lado, observa-se para o teor de 2% de nanossílica um efeito contrário, ou seja, ocorreu redução do tempo zero com a adição do polímero superabsorvente. Nessa situação o tempo zero dos concretos SAP(0,30+0,045)2NS e SAP(0,30+0,067)2NS foram reduzidos em 7% e 12%, respectivamente, em relação ao concreto 0,30 2NS.

No entanto, como discutido anteriormente, o tempo zero dos concretos 0,30 1NS e 0,30 2NS foram iguais e isso foi atribuído ao efeito retardador de pega ocasionado pela elevada dosagem de aditivo superplastificante. Acredita-se que sem a variável do teor de aditivo, o tempo zero do concreto 0,30 2NS seria menor e provavelmente obteria um comportamento semelhante ao observado na condição com 1% de nanossílica.

Na Figura 110 é mostrado o comportamento das curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos com teores fixos de 1% e 2% de nanossílica. É observado um comportamento muito similar entre os concretos com 2% de nanossílica, enquanto que para os concretos com 1% de nanossílica fica evidente o efeito acelerador das reações no concreto 0,30 1NS pela diferença na inclinação das curvas na fase de desenvolvimento após o tempo zero. Acredita-se que o efeito retardador do aditivo

superplastificante tenha influenciado o desempenho do concreto 0,30 2NS, prejudicando a avaliação do efeito da adição combinada com polímero para o teor de 2% de nanossílica.

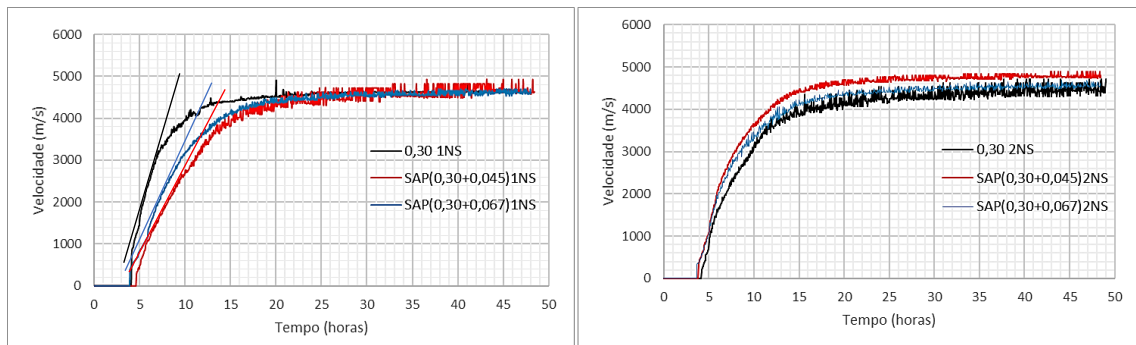


Figura 110 - Comportamento das curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos com teores fixos de 1% e 2% de nanossílica

Quando o teor de polímero superabsorvente é mantido fixo, a adição de nanossílica nas misturas e o incremento do teor dessa adição, tendem a reduzir o tempo zero, como é observado na Figura 111.

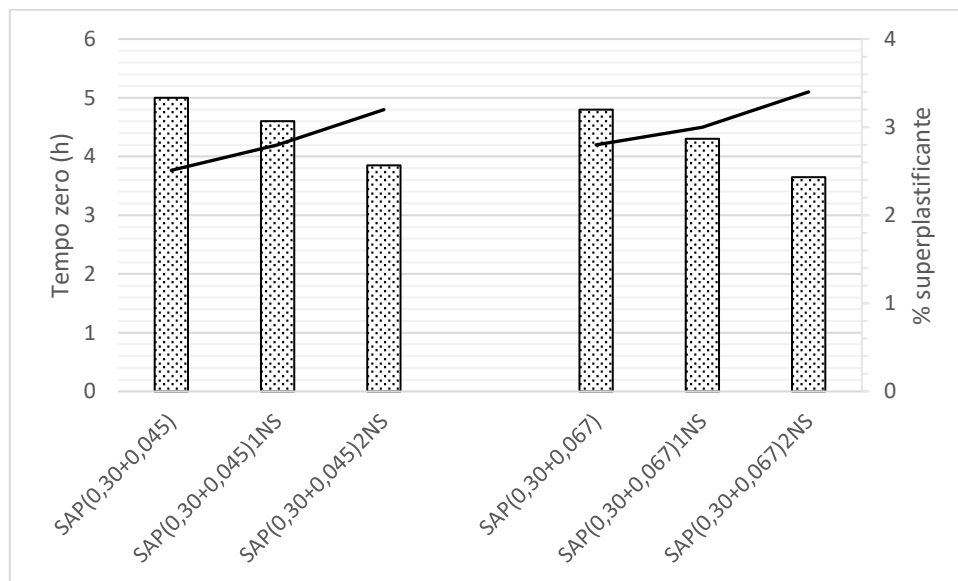


Figura 111 - Efeito da adição de nanossílica no tempo zero nos concretos com teores fixos de polímero superabsorvente

Nota-se que, para concretos com a mesma quantidade de polímero superabsorvente, o tempo zero foi reduzido em média 9% e 24% para a adição de 1% e 2% de nanossílica, respectivamente. Esses resultados confirmam a tendência do efeito da nanossílica em acelerar as reações de hidratação do cimento, mesmo com as misturas com adição combinada de nanossílica e polímero apresentando maiores dosagens de aditivo



superplastificante. O efeito da ação do aumento do teor de nanossílica nas misturas contendo o polímero superabsorvente também fica evidente ao observar o deslocamento das curvas de velocidade de pulso ultrassônico, como é mostrado na Figura 112.

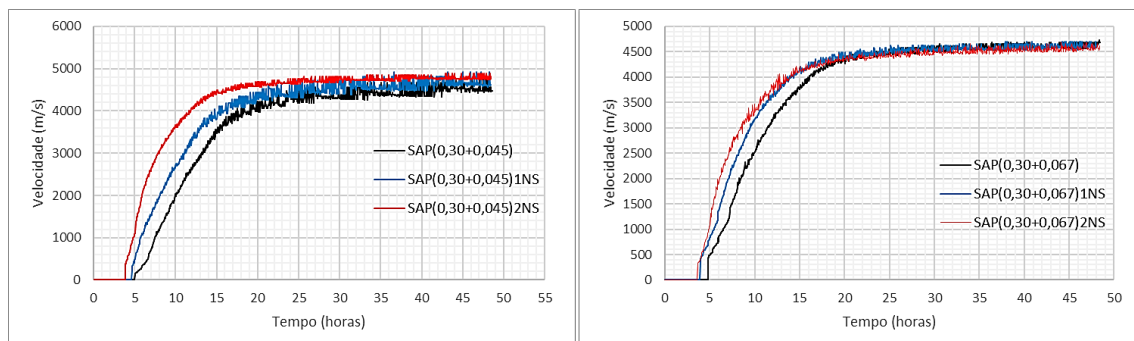


Figura 112 - Comportamento das curvas de velocidade do pulso ultrassônico em função do tempo, para os concretos com quantidades fixas de polímero superabsorvente

Ao avaliar os resultados de tempo zero obtidos para as argamassas com adição combinada de polímero superabsorvente e 1% de nanossílica, os resultados confirmam o comportamento da tendência observada no caso dos concretos, como é observado na Figura 113. Destaca-se que no caso das argamassas, o efeito da variável dosagem do aditivo superplastificante foi isolado mantendo o seu teor fixo e mais próximo das dosagens recomendadas pelo fabricante.

Nota-se que as argamassas com adição combinada de polímero superabsorvente e nanossílica apresentaram um incremento no tempo zero em relação a argamassa 0,30 1NS de 17%. Por outro lado, fazendo a comparação com o teor de polímero fixo e adicionando 1% de nanossílica, observa-se uma redução de 20% no tempo zero em relação às argamassas SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067).

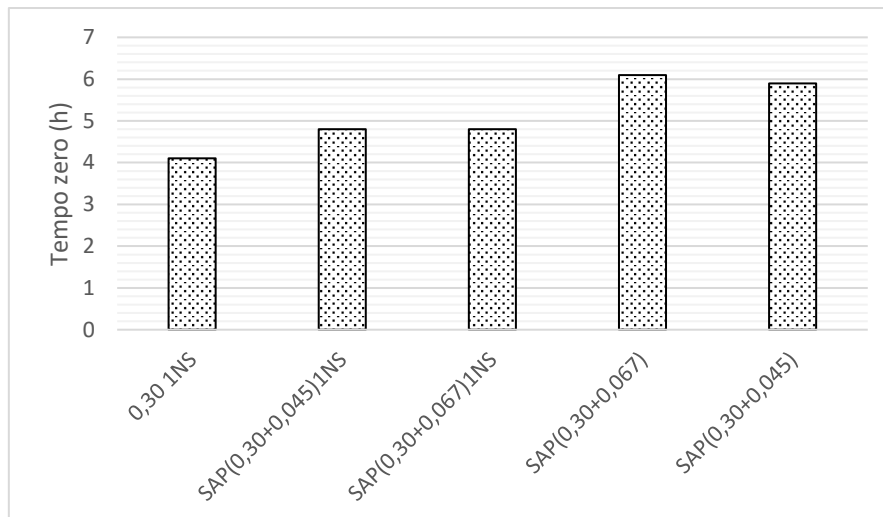


Figura 113 – Efeito da adição combinada de nanossílica e polímero superabsorvente no  $T_{zero}$  de argamassas com o mesmo teor de aditivo superplastificante

## 4.2 - Propriedades no Estado Endurecido

### 4.2.1 - Retração Autógena

Os resultados de variação autógena apresentados a seguir, são referentes à média dos valores obtidos de pelo menos dois corpos de prova ensaiados pelo método do extensômetro embutido, utilizando o extensômetro KM120. Os resultados individuais dos corpos de prova de cada concreto ensaiado podem ser observados no Apêndice B.3.

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 o corpo de prova sofreu secagem considerável. A perda de massa de água dos corpos de prova, em relação à massa total, ao final do ensaio (28 dias) de variação autógena foi 0,04%, em média. Portanto, pode-se afirmar que houve uma boa selagem dos corpos de prova. Os resultados individuais de perda de massa de água podem ser observados no Apêndice B.4.

A retração de origem térmica foi desprezada após a determinação experimental ter mostrado que, para as condições do estudo, a sua influência era insignificante, como foi discutido no item 3.5.2.2. Silva (2007) e Lopes (2011) utilizando corpos de prova com as mesmas dimensões usadas no presente estudo, também observaram em seus resultados que a retração de origem térmica pode ser desprezada em virtude do volume relativamente reduzido dos corpos de prova.

Na Tabela 27 são mostrados os resultados de variação autógena, em diversas idades, para todos os concretos estudados. Os valores positivos representam deformação de expansão, enquanto os valores negativos representam deformação de retração.

Tabela 27 - Resultados médios de variação autógena em diversas idades

Concreto	Variação autógena ( $\mu\text{m/m}$ )					
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
REF 0,30	-88	-192	-267	-303	-317	-327
REF 0,345	-99	-180	-239	-275	-305	-315
REF 0,367	-96	-148	-222	-253	-275	-302
0,30 1NS	-88	-194	-255	-295	-317	-342
0,30 2 NS	-176	-238	-289	-320	-362	-381
SAP (0,30+0,045)	57	59	49	23	6	-10
SAP (0,30+0,067)	61	56	59	48	39	34
SAP (0,30+0,045) 1NS	28	26	24	16	6	2
SAP (0,30+0,045) 2NS	-16	-22	-25	-30	-35	-52
SAP (0,30+0,067) 1NS	3	-1	6	10	4	17
SAP (0,30+0,067) 2NS	-13	-27	-24	-12	-4	11

Na Figura 114 são mostradas as curvas da variação autógena dos 11 concretos estudados, desde o  $T_0$  até a idade de 28 dias, quando o ensaio foi finalizado. Para desprezar a contração *Le Chatelier*, que ocorre antes da transição suspensão-sólido (tempo zero) e, portanto, não causa fissuração, a idade zero dos gráficos apresentados nesta seção corresponde ao tempo zero ( $T_0$ ), determinado experimentalmente para as respectivas misturas.

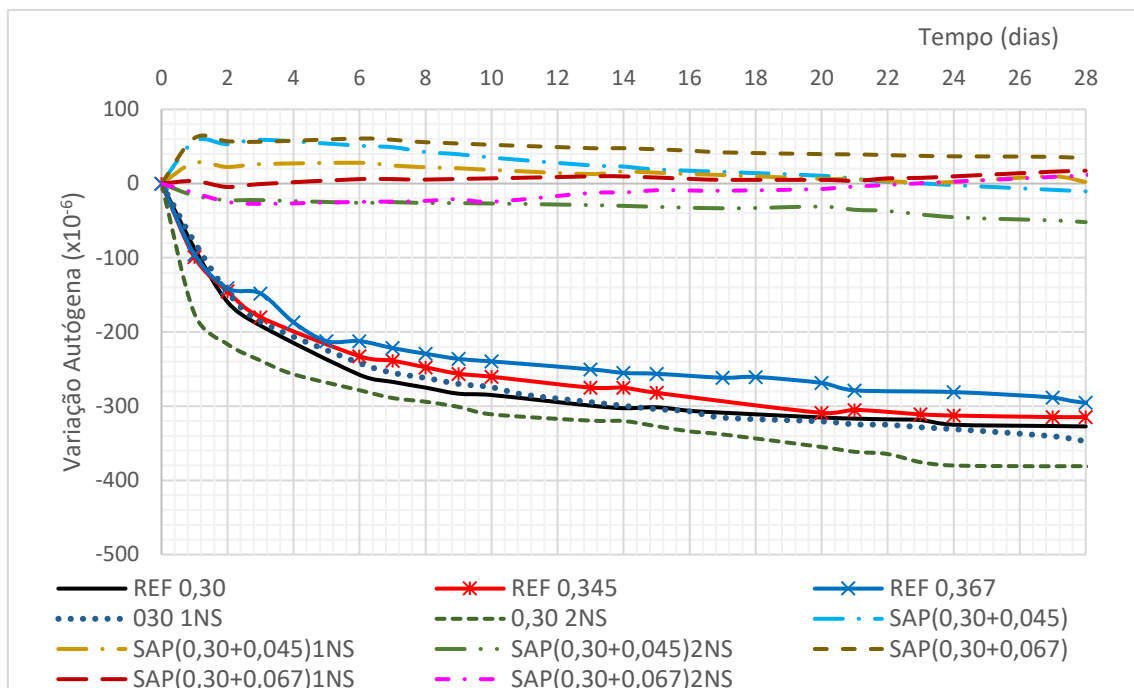


Figura 114 - Resultados médios da variação autóloga dos onze concretos estudados, a partir de  $T_0$  até 28 dias

Em uma simples observação dos resultados mostrados na Tabela 27 e na Figura 114, pode-se separar as misturas de concretos em dois grandes grupos. O primeiro formado pelas misturas de concreto sem adição de polímero superabsorvente (SAP) como agente de cura interna. Esse primeiro grupo apresenta consideráveis valores de retração autóloga, variando de - 300 a - 400  $\mu\text{m}/\text{m}$ , aos 28 dias de idade. O segundo grupo é formado pelos concretos com adição de SAP como agente de cura interna, que apresentam valores de retração autóloga expressivamente menores.

Esta característica mitigadora da retração autóloga apresentada pelo polímero superabsorvente foi verificada por um grande número de pesquisadores, dentre os quais cita-se Jensen e Hansen (2002), Mönning (2009), Mechtcherine et al. (2013), Assmann (2013), Ordoñez (2013), Santos (2016) e Manzano (2016).

Na Figura 115 são mostrados os resultados médios da variação autóloga das argamassas do estudo. Os resultados confirmam a característica do SAP empregado em reduzir ou eliminar totalmente a retração autóloga. As diferenças da magnitude das deformações observadas em relação aos concretos estão associadas a presença do agregado graúdo nos concretos, que atua como agente de restrição a deformação da pasta, reduzindo a

deformação nos concretos e, também, devido aos diferentes volumes de pasta e ao uso de aglomerantes diferentes na produção das misturas.

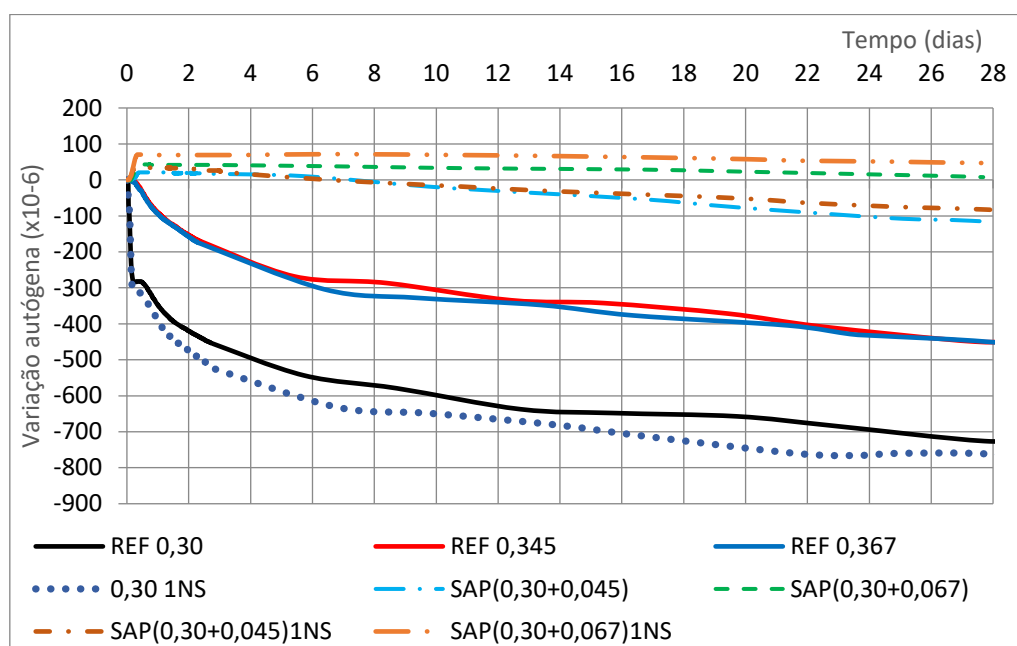


Figura 115 - Resultados médios de variação autóloga das argamassas estudadas

Considerando que o comportamento da variação autóloga das argamassas, onde o teor de superplastificante foi fixo, está em consonância com o comportamento mostrado pelos concretos, pode-se concluir que o teor variável de aditivo superplastificante dos concretos não afetou a retração autóloga. Assim, os efeitos das variáveis estudadas no presente estudo sobre a variação autóloga, serão discutidos com base nos resultados obtidos nas misturas dos concretos. Os resultados individuais dos corpos de prova de cada argamassa ensaiada podem ser observados no Apêndice B.5.

Para verificar se as variáveis estabelecidas nesse trabalho realmente exerciam influência na retração autóloga dos concretos, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). O uso da análise de variância na comparação de grupos está baseado na relação da variabilidade dos resultados dentro dos grupos e da variabilidade das médias entre os grupos, e na distribuição de Fischer (F), como nível de significância  $\alpha$  (GOMES, 1982; NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003). No presente estudo, todos os testes estatísticos foram feitos adotando um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ) e utilizando-se o programa *Statistica 10.0*<sup>®</sup>.

A Tabela 28 mostra os resultados da análise de variância para os concretos REF 0,30, REF 0,345 REF 0,367, com o objetivo de verificar a influência da relação água/cimento básica e idade sobre a retração autógena.

Tabela 28 - Análise de Variância verificando a influência da relação água/cimento básica e idade sobre a retração autógena

$R^2_{\text{mod}} = 0,904$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Relação a/c básica (A)	2	11169	5585	5,808	3,22	Sim
Idade (B)	5	365878	73176	76,102	3,43	Sim
AB	10	4660	466	0,485	2,06	Não
Erro	42	40385	962			
Total	59					

Os resultados apresentados na Tabela 28 mostram que 90% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{\text{mod}} = 0,904$ . Observa-se na coluna dos valores de F que as duas variáveis fixas consideradas nesta análise (relação a/C<sub>básica</sub> e idade) exercem um efeito significativo na retração autógena. A variável idade, neste caso, apresentou-se como o efeito mais importante (F=76,10). A interação das variáveis não foi significativa.

Na Tabela 29 são mostrados os resultados da análise de variância para verificar a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre a retração autógena, para as misturas de concreto com a mesma relação água/cimento básica (a/c<sub>básica</sub> = 0,30). Nesta análise estão envolvidas as misturas REF 0,30; SAP(0,30+0,045); SAP(0,30+0,067); 0,30 1NS; 0,30 2NS; SAP(0,30+0,045)1NS; SAP(0,30+0,045)2NS; SAP(0,30+0,067)1NS e SAP(0,30+0,067)2NS.

Tabela 29 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre a retração autógena, concretos com a/C<sub>básica</sub> = 0,30

$R^2_{\text{mod}} = 0,8998$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Água incorporada (A)	2	2653198	1326599	469,9060	3,03	Sim
Teor de nanossílica (B)	2	84693	42347	14,9999	3,03	Sim
Idade (C)	5	153857	30771	10,8998	2,25	Sim
AB	4	28200	7050	2,4972	2,41	Sim
AC	10	211688	21169	7,4984	1,87	Sim
BC	10	24399	2440	0,8643	1,87	Não
ABC	20	39751	1988	0,7040	1,62	Não
Erro	126	355713	2823			
Total	179					

Observado os resultados mostrados na Tabela 29 nota-se que praticamente 90% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{\text{mod}} = 0,8998$ . A coluna dos valores de F mostra ainda que as três variáveis fixas consideradas nesta análise (água incorporada, adição de nanossílica e idade) exercem um efeito significativo na retração autógena. A variável água incorporada apresentou-se como o efeito mais importante, com o maior valor de F (469,91) dentre todos, seguido da adição de nanossílica e idade. Em relação a interação das variáveis, mostraram-se importantes a interação entre a água incorporada e a adição de nanossílica e a água incorporada e a idade. As demais interações não se mostraram significativas.

Em resumo, as variáveis do presente estudo apresentaram-se como efeitos significativos sobre a retração autógena dos concretos estudados. Buscando uma melhor interpretação e discussão dos resultados, apresenta-se a seguir uma análise dividida em três etapas: a) avaliação da adição de água incorporada por meio da adição do SAP como agente de cura interna; b) análise da adição da nanossílica nas misturas; e c) o efeito combinado da adição do SAP e da nanossílica.

#### **4.2.1.1 - Efeito da adição de água incorporada por meio da adição de Polímero Superabsorvente (SAP) como agente de cura interna**

Neste item faz-se a análise dos três concretos de referência (REF 0,30; REF 0,345 e REF 0,367) e dos dois concretos com adição de água incorporada contendo o SAP como agente de cura interna, SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067). A Figura 116 mostra os resultados médios da variação autógena, em função do tempo, para esses concretos. A idade zero no gráfico corresponde ao início da determinação da variação autógena, referente à transição suspensão-sólido (tempo zero).

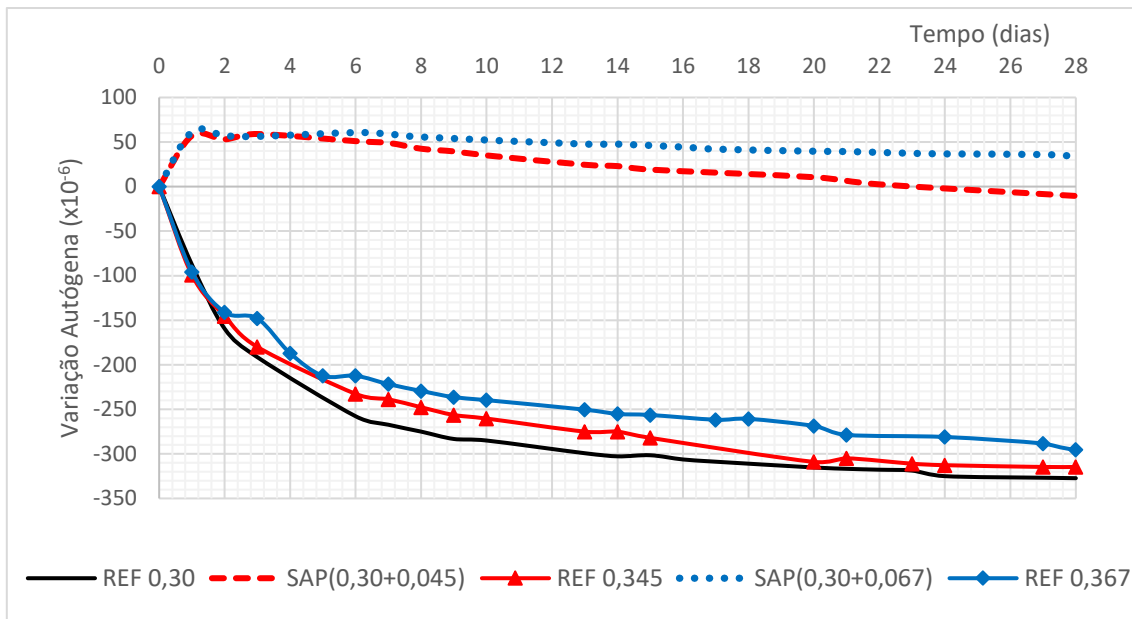


Figura 116 - Resultados médios de variação autóloga, em função do tempo, para três concretos de referência e dois com adição de SAP

Observando a Figura 116 nota-se que as misturas de referência apresentaram retração autóloga, aos 28 dias, da ordem de -300 a -350 $\mu\text{m}/\text{m}$ , enquanto que as misturas contendo SAP como agente de cura interna praticamente não apresentaram retração.

Além da diferença significativa entre os resultados de variação autóloga dos concretos com e sem água incorporada na mistura, há ainda um comportamento muito diferente no desenvolvimento da variação autóloga entre as misturas com e sem água incorporada. A adição do SAP alterou o comportamento da evolução da variação autóloga ao longo do tempo. Nota-se que, além da retração autóloga ter sido praticamente eliminada nas duas misturas de concreto que possuem SAP como agente de cura interna, ocorre uma expansão inicial que atinge o valor máximo entre 1 e 3 dias de idade. Em seguida, observa-se o desenvolvimento do fenômeno da retração, mas com uma taxa muito inferior aquelas que são observadas nas misturas sem SAP.

Ambos concretos com adição de SAP apresentaram uma expansão inicial da ordem de 60 $\mu\text{m}/\text{m}$  que se manteve em torno desse valor até os 7 dias de idade para o concreto SAP(0,30+0,045) e até os 14 dias de idade para o concreto SAP(0,30+0,067). Após essas idades, essa expansão foi se reduzindo ao longo tempo sendo que para o concreto SAP(0,30+0,045) a expansão desaparece completamente aos 22 dias de idade. No caso do concreto SAP(0,30+0,067) ainda se observa uma expansão da ordem de 34 $\mu\text{m}/\text{m}$  aos



28 dias de idade. A expansão inicial é benéfica para a mitigação da retração autógena, pois além de reduzir a magnitude dessa retração, retarda o momento de início da retração (MANZANO, 2016). 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; ESTEVES, 2009; SHEN *et al.*, 2016).

O concreto com teor de água incorporada igual a 0,067 não apresentou retração autógena ao longo do tempo, enquanto que o concreto com teor de água incorporada igual a 0,045 apresentou retração autógena somente após os 22 dias de idade. A total eliminação da retração autógena no concreto SAP(0,30+0,067) era esperada, uma vez que o teor de água incorporada igual a 0,067 foi determinado de acordo com a teoria baseada no modelo de Powers (item 2.3.1) para determinação da quantidade de água de cura interna necessária para a eliminação completa da retração autógena.

Pode-se afirmar, portanto, que o concreto SAP(0,30+0,067) apresentou uma eficiência de 100% na mitigação da retração autógena em todas as idades, enquanto que o concreto SAP(0,30+0,045) apresentou uma eficiência de 100% na mitigação da retração autógena até os 22 dias de idade. Aos 28 dias de idade essa eficiência foi de 97% em relação aos três concretos de referência. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Manzano (2016), que estudando o mesmo SAP empregado nesse estudo e realizando ensaios em argamassas de alta resistência produzidas com os mesmos materiais, mas de lotes diferentes, também observou uma eficiência de 97% na mitigação da retração autógena ao empregar o teor de água incorporada igual a 0,045.

A redução da retração autógena nos concretos com cura interna se dá devido a liberação gradativa de água de por parte do SAP, a medida que água capilar vai sendo consumida pelas reações de hidratação, mitigando ou até mesmo eliminando o fenômeno da autodessecação.

Nas três misturas de referência a evolução da retração autógena pode ser dividida em três estágios, em função da taxa de seu desenvolvimento. No primeiro estágio, que vai do tempo zero até os 3 dias de idade, se observa um desenvolvimento acelerado da retração

autógena. Nesse estágio as misturas desenvolvem de 50 a 60% da retração autógena final (28 dias de idade). No segundo estágio, compreendido entre os 3 e 7 dias de idade, ocorre uma diminuição na velocidade de desenvolvimento da retração autógena, que pode ser observado pela diminuição da inclinação da reta tangente à curva de desenvolvimento da retração apresentada na Figura 117. Ao final do segundo estágio nota-se que entre 70 e 80% da retração autógena final já se desenvolveu. Após os 7 dias de idade observa-se o início do terceiro estágio de desenvolvimento, caracterizado por uma redução ainda maior da taxa de desenvolvimento da retração autógena dos concretos de referência. A Figura 117 mostra a representação esquemática do desenvolvimento da retração autógena dos concretos de referência com a identificação dos três estágios de desenvolvimento descritos.

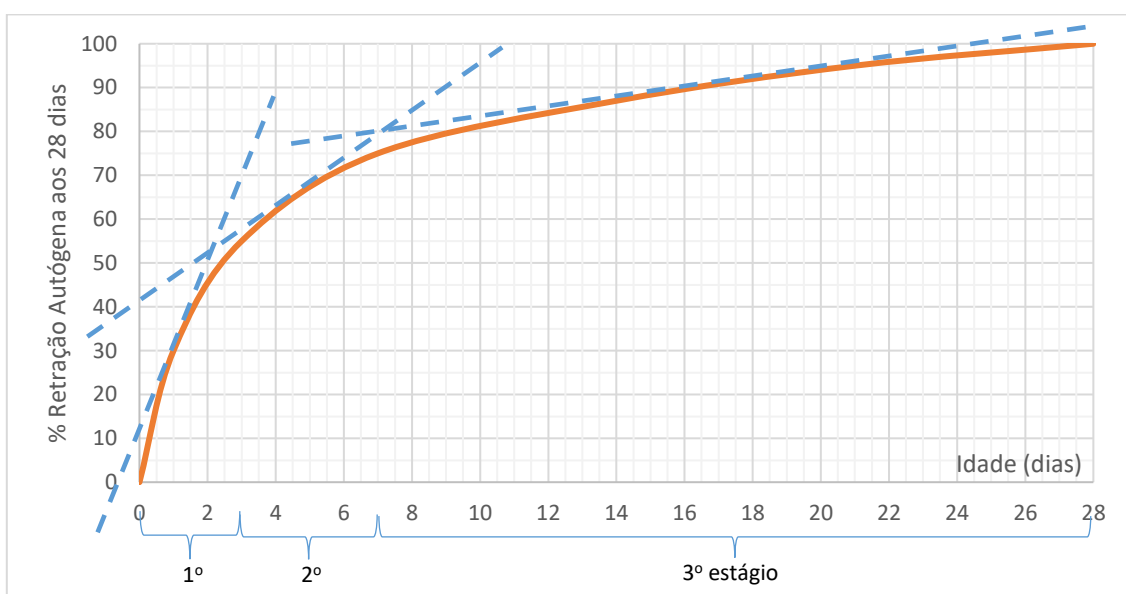


Figura 117 - Representação esquemática da evolução da retração autógena dos concretos de referência com identificação dos três estágios observados

Considerando que a relação água/cimento básica, nos concretos de referência, e o teor de água incorporada, nos concretos contendo SAP como agente de cura interna, mostraram-se variáveis significativas, como apresentado na Tabela 28 e na Tabela 29, respectivamente, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores associados a relação água/cimento e ao teor de água incorporada diferem entre si. A conclusão foi que as três relações água/cimento básica avaliadas formam dois grupos que diferem significativamente entre si, como é

mostrado na Figura 118, e que os teores de água incorporada também formam dois grupos que diferem significativamente entre si, como é mostrado na Figura 119.

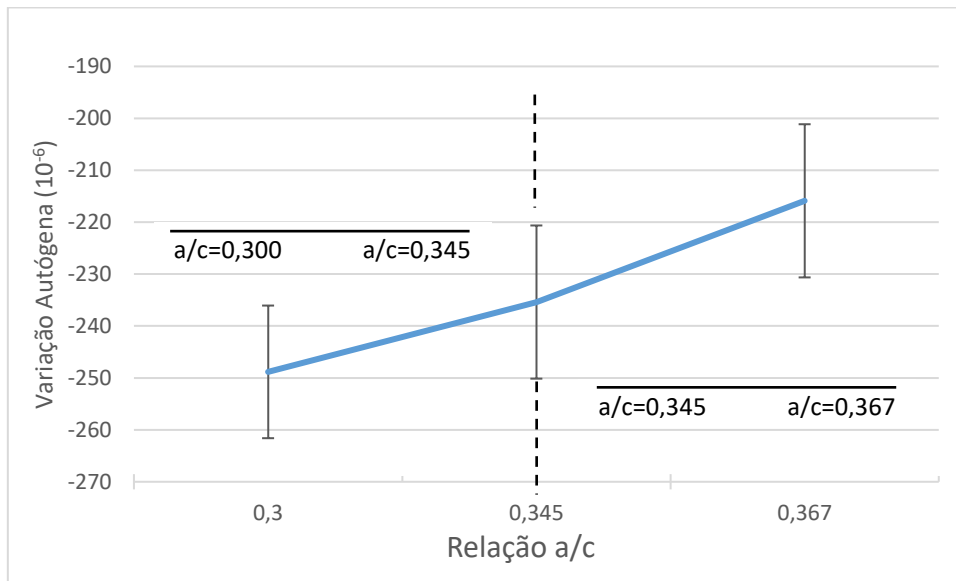


Figura 118 - Comparação múltiplas de médias associadas com a relação água/cimento básica

Observando a Figura 118 nota-se que, apesar do concreto REF 0,30 apresentar maiores valores de retração autógena seguido, respectivamente, pelos concretos REF 0,345 e REF 0,367, os valores da relação água/cimento 0,345 tanto se associam com a relação água/cimento 0,30 como com a relação água/cimento 0,367.

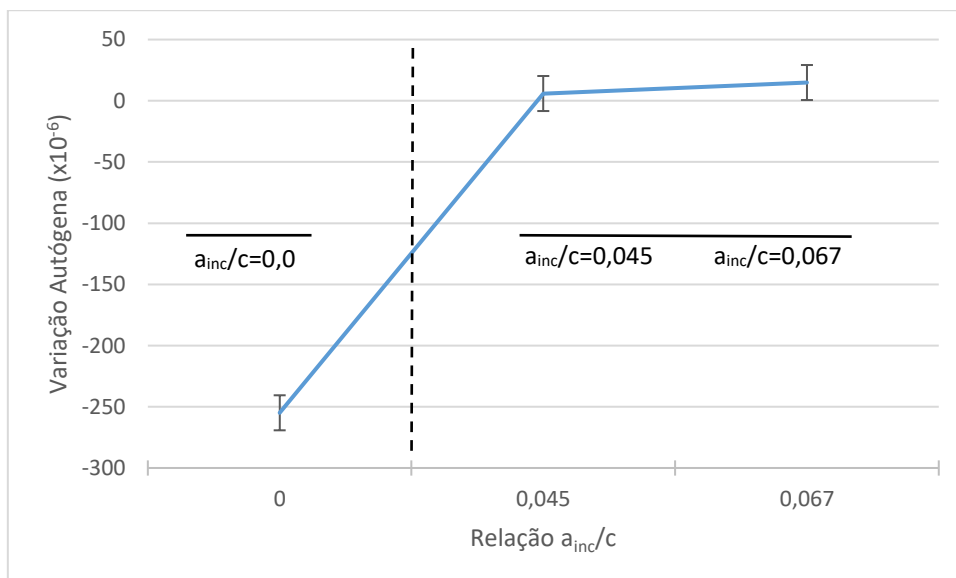


Figura 119 - Comparação múltiplas de médias associadas com o teor de água incorporada

Nota-se na Figura 119 que as relações  $a_{inc}/c$  0,045 e 0,067 se associam e formam um grupo, enquanto a relação  $a_{inc}/c = 0$  forma outro grupo distinto. Observa-se que, do ponto de vista estatístico, as misturas sem água incorporada apresentam retração e as misturas com água incorporada apresentam expansão.

Em resumo, a análise estatística mostrou que a comparação entre os três concretos de referência e os dois concretos contendo água incorporada formam três grupos de concretos que se diferenciam significativamente entre si, como mostra a Figura 120, sendo a variável água incorporada o fator mais importante.

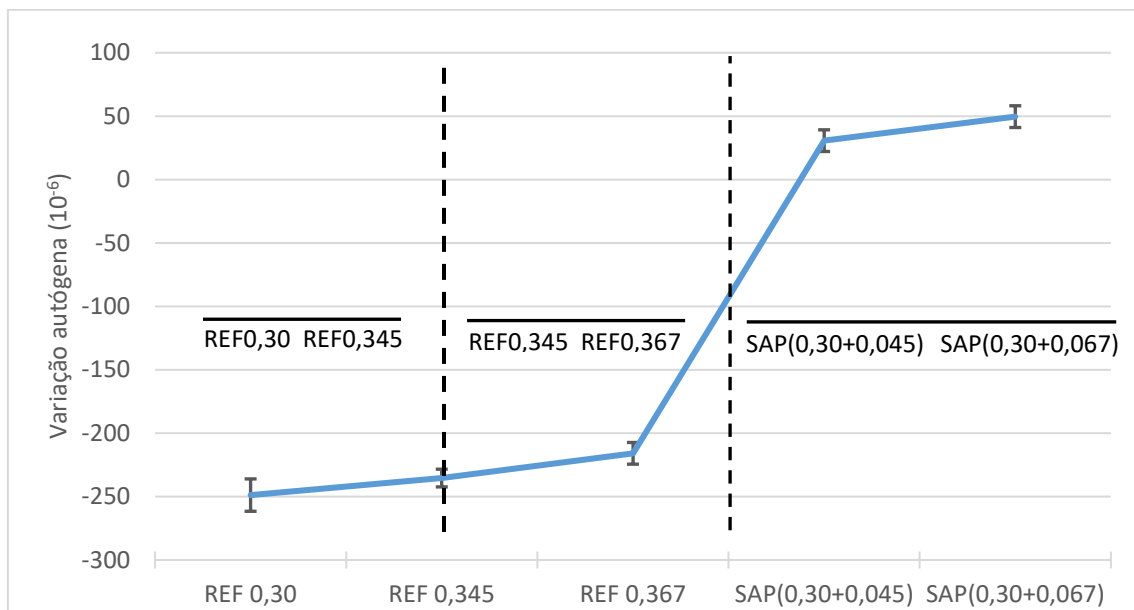


Figura 120 – Resumo da variação múltiplas de média para os concretos de referência e os concretos com água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna

Considerando as diferenças no comportamento da evolução da variação autóloga das misturas, nos valores obtidos e as análises realizadas, pode-se apontar quatro principais diferenças entre as misturas com e sem SAP: (1) a expansão inicial das misturas com SAP; (2) as taxas de desenvolvimento da retração autóloga; (3) os elevados valores de retração autóloga aos 28 dias apresentados pelas misturas sem SAP e (4) eliminação da retração autóloga nas misturas com água incorporado por meio da adição de SAP como agente de cura interna.

#### 4.2.1.2 - Efeito da Adição de Nanossílica

Neste item faz-se a análise dos concretos contendo adição de nanossílica, em relação aos concretos sem a adição de nanossílica. Na Figura 121 são apresentados os resultados médios da evolução da retração autógena para os concretos 0,30 1NS e 0,30 2NS em comparação com o concreto REF 0,30, determinados a partir do T<sub>0</sub> até a idade de 28 dias.

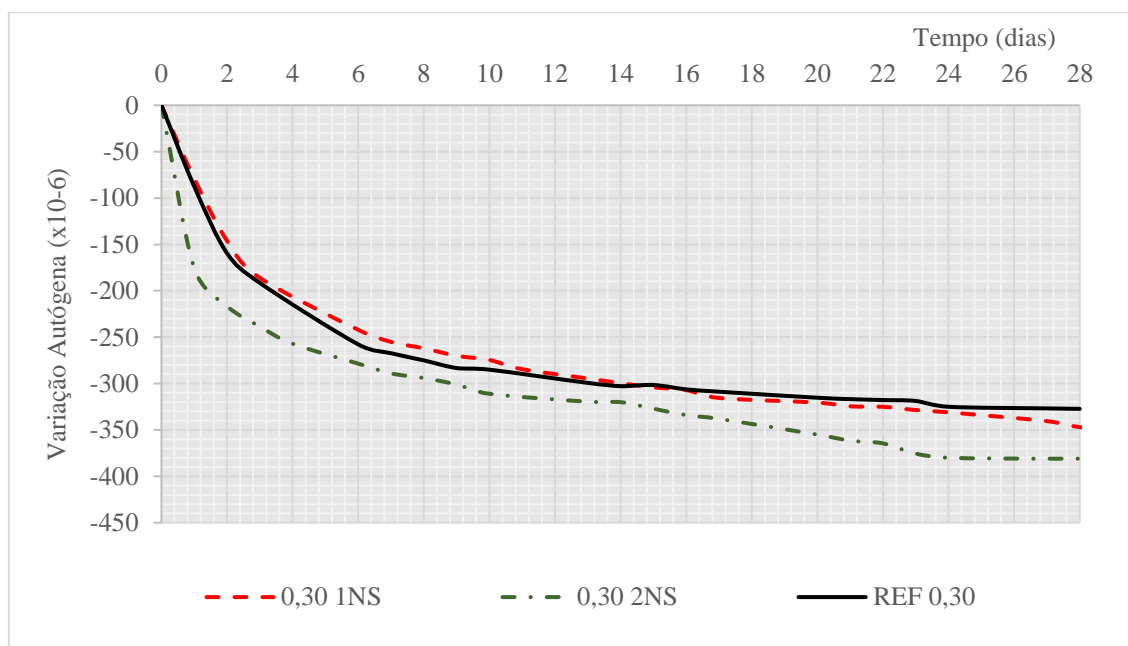


Figura 121 - Resultados médios da variação autógena das misturas contendo apenas adição de nanossílica em comparação com o traço de referência REF 0,30

A Figura 121 mostra que a retração autógena final (28 dias) das misturas com adição de nanossílica foi da ordem de -350 a -380  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Esses valores estão um pouco acima da retração autógena final da mistura de referência REF 0,30, que apresenta retração autógena aos 28 dias igual a -327  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Considerando que a adição de nanossílica se mostrou uma variável significativa, como apresentado na Tabela 29, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores associados ao teor de nanossílica diferem entre si. A conclusão foi que os três teores de adição de nanossílica estudados formam dois grupos que diferem significativamente entre si, como é mostrado na Figura 122.

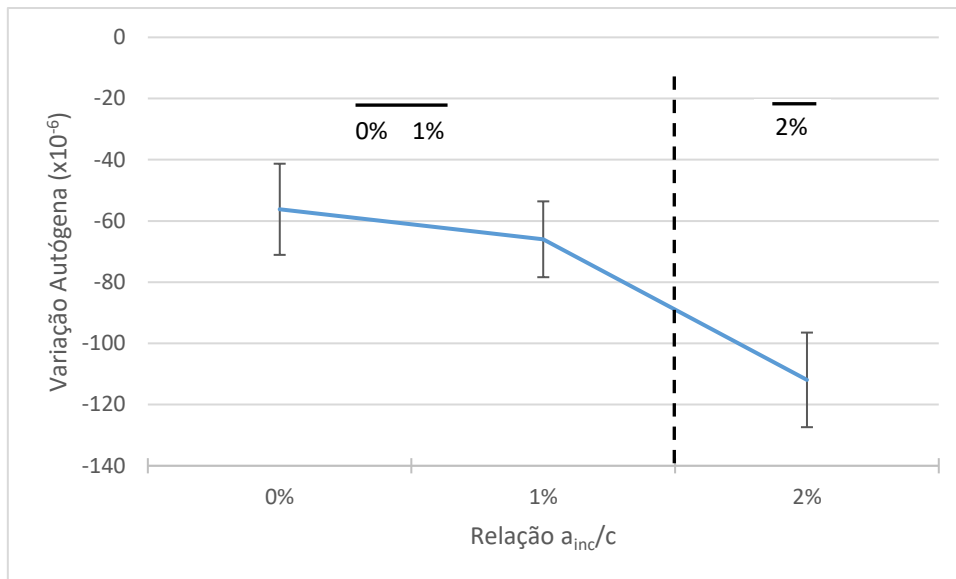


Figura 122 - Comparação múltiplas de médias associadas com a adição de nanossílica

Nota-se que as misturas sem adição de nanossílica junto com as misturas que tem 1% de adição de nanossílica formam um grupo, enquanto as misturas com 2% de adição de nanossílica forma um outro grupo que apresenta maiores valores de retração autógena. O incremento da retração autógena com o aumento do teor de adição de nanossílica era esperado uma vez que a adição de nanossílica acelera o processo de hidratação do cimento, por meio da sua elevada área superficial que promove mais rapidamente as reações pozolânicas, agem como pontos de nucleação e, por consequência, proporciona a produção de C-S-H. Segundo Lura (2003), a maior presença de C-S-H está diretamente relacionada com a redução da umidade relativa interna, fenômeno este que é considerado como o principal mecanismo de desenvolvimento da retração autógena.

Santos (2016) mediu a retração autógena em argamassas de alta resistência, produzidas com os mesmos materiais empregados no presente estudo. Seus resultados mostraram um acréscimo na retração autógena em relação a argamassa de referência para os dois teores de adição de nanossílica estudados (1 e 2%). A Figura 123 mostra uma comparação dos resultados obtidos por Santos (2016) nas argamassas de alta resistência com os concretos do presente estudo.

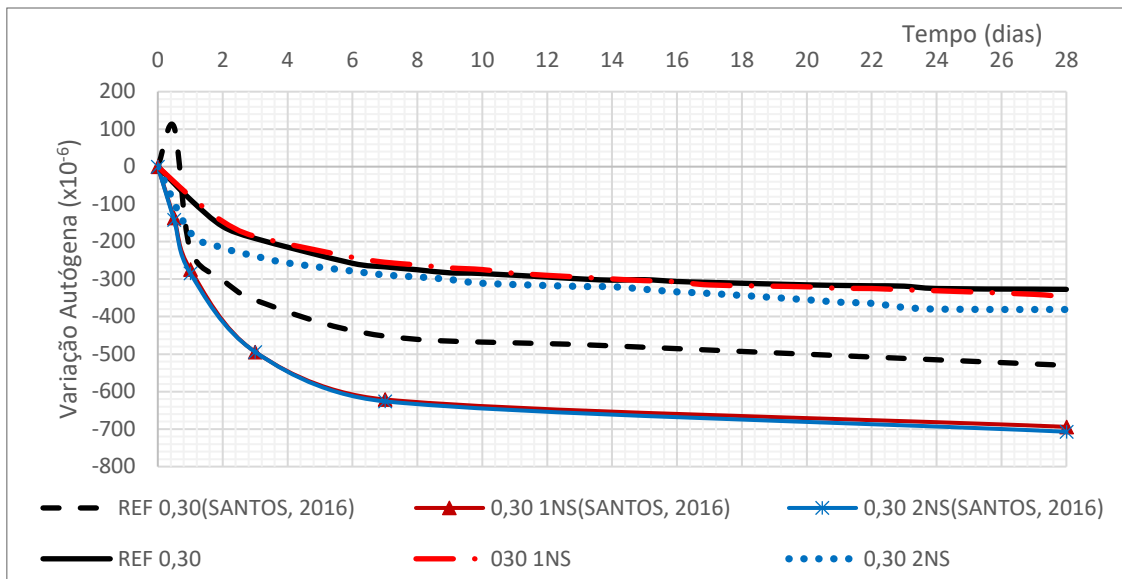


Figura 123 – Resultados médios da variação autógena das misturas de concreto com adição de nanossílica e concreto de referência em comparação com misturas de argamassa de alta resistência com adição de nanossílica e respectiva referência

Nota-se que os concretos apresentam menores valores de retração autógena do que as argamassas e que o acréscimo da retração autógena provocado na argamassa devido a adição de nanossílica, não ocorre no caso do concreto. A presença do agregado graúdo no concreto atuando como elemento de restrição de deformação da pasta e o menor volume de pasta presente nos concretos, são os fatores para que os concretos apresentem menores valores de deformação autógena em comparação com as argamassas.

No que se refere ao desenvolvimento da retração autógena ao longo do tempo, a adição de nanossílica, nos teores estudados, parece não influenciar o comportamento da evolução da retração, ou seja, o modelo descrito e apresentado na Figura 117 para explicar o desenvolvimento da retração autógena para os concretos de referência se aplica também para os concretos com adição de nanossílica.

A partir das análises e discussões realizadas, pode-se apontar três principais conclusões ao comparar concretos com e sem adição de nanossílica: (a) a adição do teor de 1% de nanossílica não representou alteração significativa na retração autógena. Por outro lado, o teor de 2% de nanossílica representou um incremento nos resultados de retração autógena em comparação as misturas sem e com 1% de adição de nanossílica; (b) os concretos com adição de nanossílica apresentam o mesmo comportamento de evolução da retração autógena ao longo do tempo que os concretos de referência (sem adição de nanossílica).

#### 4.2.1.3 - Efeito combinado da nanossílica e do polímero superabsorvente

Neste item são analisados os resultados de variação autógena das misturas híbridas contendo adição de nanossílica e de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna. Na Figura 124 são apresentados os resultados médios da evolução da retração autógena para essas misturas híbridas, a saber, SAP(0,30+0,045)1NS, SAP(0,30+0,045)2NS, SAP(0,30+0,067)1NS e SAP(0,30+0,067)2NS, em comparação com os traços REF 0,30; 0,30 1NS; 0,30 2NS; SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067). Os resultados foram determinados a partir do  $T_0$  até a idade de 28 dias.

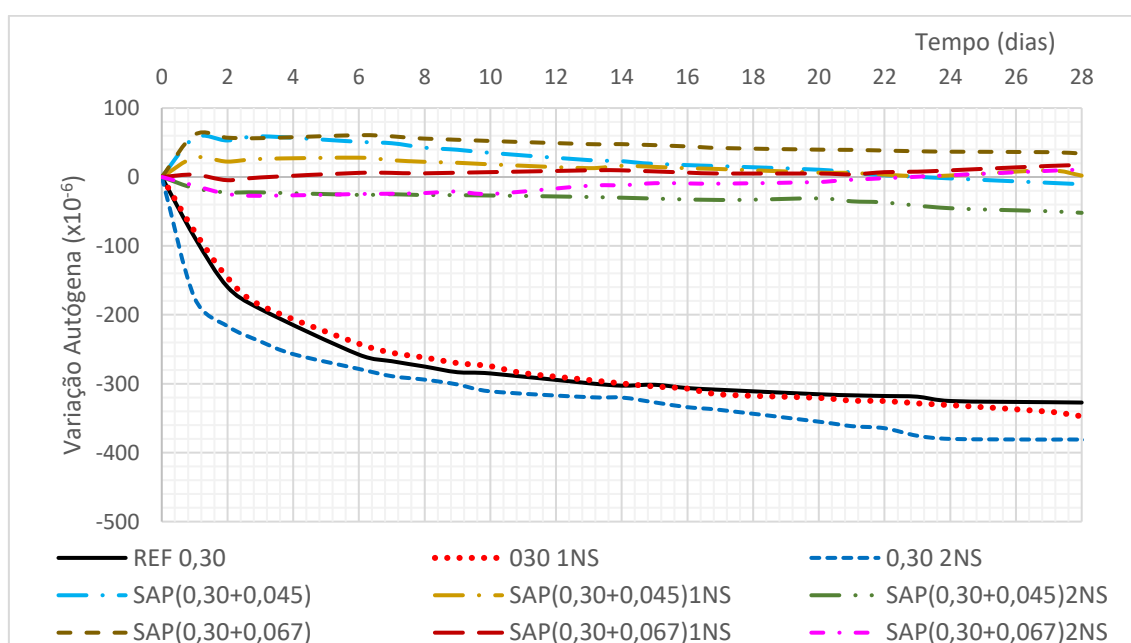


Figura 124 - Resultados médios da variação autógena das misturas contendo água de cura interna com e sem adição de nanossílica, em comparação com as misturas 0,30 1NS, 0,30 2NS e REF 0,30

Como apresentado e discutido anteriormente, a adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna, promove uma redução muito significativa ou a eliminação total da retração autógena do concreto, enquanto a adição de nanossílica, dependendo do teor de nanossílica adicionado, tende a promover um acréscimo na retração autógena. No entanto, como pode ser observado na Figura 124, os resultados mostram que com a combinação dessas duas variáveis, o teor de água incorporada por meio da adição do SAP como agente de cura interna, exerce o efeito preponderante sobre a variação autógena, promovendo a eliminação completa da retração autógena ou na pior



situação apresentando uma eficiência de 85% na redução da retração autógena final (28 dias).

Considerando que a combinação das variáveis adição de nanossílica e teor de água incorporada se mostrou uma interação significativa, como mostrado na Tabela 29, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores associados a interação da água incorporada e à adição de nanossílica diferem entre si. A conclusão foi que as misturas híbridas formam dois grupos que diferem significativamente entre si, como mostra a Figura 125.

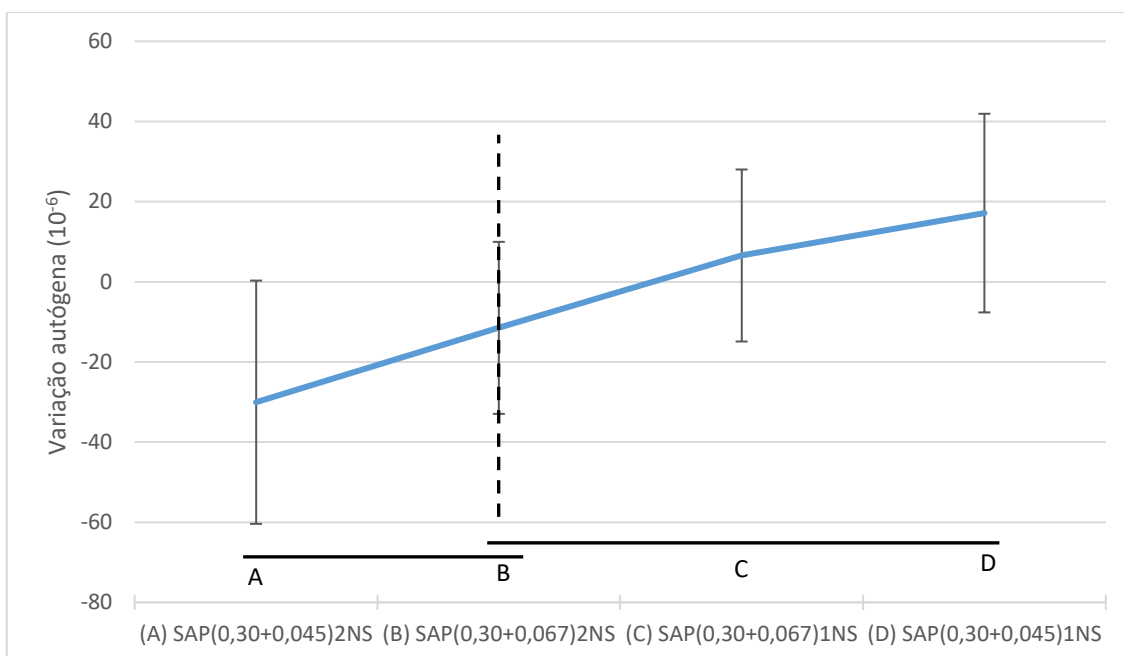


Figura 125 - Comparação múltiplas de médias associadas com as misturas híbridas

Observando-se a Figura 125, nota-se os concretos SAP(0,30+0,045)2NS e SAP(0,30+0,067)2NS formam um grupo enquanto os concretos SAP(0,30+0,045)1NS e SAP(0,30+0,067)1NS junto com o concreto SAP(0,30+0,067)2NS formam outro grupo, ou seja, os resultados desse último concreto podem ser associados aos dois grupos. Como observado na análise do efeito da adição isolada de nanossílica, nota-se também nas misturas híbridas a tendência do aumento da retração autógena com o aumento da adição de nanossílica.

Em relação ao comportamento da evolução da variação autógena das misturas híbridas, ao longo do tempo, a principal diferença em relação as misturas com água incorporada sem adição de nanossílica, está na redução ou ausência da expansão inicial.

Pode-se apontar três principais conclusões ao analisar os resultados de retração autógena das misturas híbridas: (a) a água incorporada, por meio da adição de SAP como agente de cura interna, tem efeito preponderante sobre a retração autógena em relação à adição de nanossílica; (b) a presença de nanossílica reduz ou elimina a expansão inicial observada nas misturas produzidas somente com a incorporação de água de cura interna; (c) mesmo com a presença de nanossílica, a água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, eliminou completamente a retração autógena ou apresentou uma eficiência mínima de 85% para mitigar a retração autógena.

#### **4.2.2 - Retração por Secagem**

Os resultados de retração por secagem apresentados a seguir, são referentes à média de pelo menos dois corpos de prova ensaiados. Os resultados individuais dos corpos de prova de cada concreto ensaiado, tanto pelo método da ASTM C157 como pelo procedimento do extensômetro embutido, podem ser observados no Apêndice B.6 e B.7, respectivamente.

Em alguns casos os dois métodos empregados para determinação da retração por secagem apresentaram resultados semelhantes, mas em outros casos não foram observadas similaridades, como mostra a Figura 126.

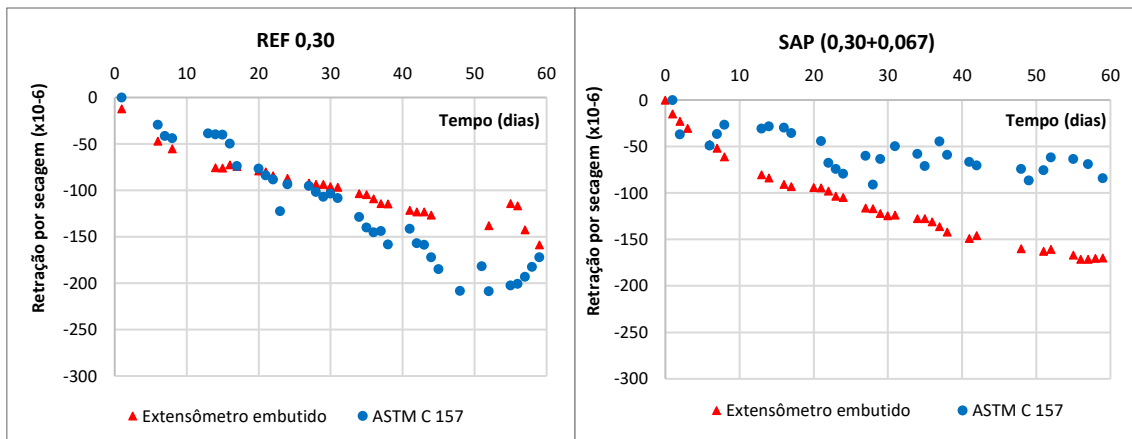


Figura 126 - Comparação entre o método da ASTM C 157 e o método do extensômetro embutido para determinação da retração por secagem dos concretos

Não é objetivo do estudo realizar a comparação entre as duas metodologias, logo não serão discutidas as razões para diferenças encontradas nas determinações. No entanto, se deve registrar que a dispersão dos resultados pelo método do extensômetro embutido é expressivamente menor. Os gráficos comparativos dos resultados de retração por secagem das duas metodologias empregadas no presente trabalho podem ser consultados no Apêndice B.8.

O procedimento da ASTM C 157 (1991) permite separar os resultados em retração obtida após 28 dias de cura submersa e em retração por secagem propriamente dita (após 28 dias). No método do extensômetro embutido o registro da retração por secagem teve início após 28 dias. Assim sendo, os resultados serão apresentados separados em três partes: a) retração após 28 dias de cura submersa pelo método da ASTM C157; b) retração por secagem pelo método da ASTM C157; e c) retração por secagem pelo método do extensômetro embutido.

#### 4.2.2.1 – Resultados de retração, após 28 dias de cura submersa, pelo método da retração por secagem da ASTM C157

Considerando o procedimento da ASTM C157, os resultados obtidos imediatamente após 28 dias de cura submersa é a soma de duas parcelas de retração: autógena e térmica, em relação à leitura inicial, realizada 24 horas após a moldagem do corpo de prova. Isso significa que as deformações térmica e autógena, durante as primeiras 24 horas, não são incluídas. Considerando que a deformação de origem térmica seja desprezível, como se observou no item 3.5.2.2, pode-se admitir que a retração determinada pelo método da

ASTM C157, imediatamente após 28 dias de cura submersa, seja de origem autógena. Assim sendo, a Tabela 30 mostra os resultados de deformação de origem autógena obtidos pelo método da ASTM C157, determinados pela média de três corpos de prova, em comparação com os resultados de retração autógena obtidos pelo método do extensômetro embutido. Para permitir a comparação dos dados, os resultados de retração autógena do método do extensômetro embutido mostrados na Tabela 30 foram calculados a partir de 24 horas de idade.

Tabela 30 - Comparação da retração medida pela ASTM C157 após 28 dias de cura submersa e a retração autógena medida pelo método do extensômetro embutido

Concreto	Retração ( $\mu\text{m/m}$ )	
	ASTM C157 (24h após moldagem até 28 dias)	Extensômetro embutido (1 até 28 dias)
REF 0,30	-116	-240
REF 0,345	-195	-216
REF 0,367	-146	-200
0,30 1NS	-123	-255
0,30 2 NS	-100	-205
SAP (0,30+0,045)	-82	-67
SAP (0,30+0,067)	-21	-27
SAP (0,30+0,045) 1NS	-58	-26
SAP (0,30+0,045) 2NS	-55	-36
SAP (0,30+0,067) 1NS	142	14
SAP (0,30+0,067) 2NS	348	24

Nota-se uma diferença nos resultados de retração entre os dois métodos, com exceção para o concreto SAP(0,30+0,067), que praticamente apresentou o mesmo resultado. SILVA (2007) relata em seus estudos uma diferença na magnitude de retração determinada aos 28 dias de cura submersa, com os resultados do ensaio em corpos de prova selados.

Os resultados apresentados na Tabela 30 mostram que a cura submersa foi eficiente na redução da retração autógena dos concretos de referência e nos concretos somente com adição de nanossílica, ao comparar com os valores de retração autógena obtidos pelo método do extensômetro embutido. Provavelmente isso se deve a entrada de água nos corpos de prova devido a cura submersa.

O método da ASTM C 157 também mostrou a eficiência do SAP na mitigação da retração autógena, pois enquanto as misturas sem SAP apresentaram retração da ordem de - 100 a - 200 $\mu$ m/m, as misturas com SAP tiveram retração da ordem de -50 a -80 $\mu$ m/m, ou tiveram expansão, como foi o caso dos concretos SAP(0,30+0,067)1NS e SAP(0,30+0,067)2NS. No que se refere a essa expansão, a cura submersa parece ter provocado um considerável incremento na expansão que esses concretos já haviam apresentados quando da medida em corpos de prova selados.

Os efeitos das adições de polímero e nanossílica sobre a retração autógena foram discutidos anteriormente e, portanto, não serão motivos de nova discussão nesse item.

#### 4.2.2.2 – Resultados de retração por secagem pelo método da ASTM C157

Na Tabela 31 são mostrados os resultados de retração por secagem obtidos pelo método da ASTM C157. É possível observar nas primeiras idades (1 e 7 dias) um valor elevado do coeficiente de variação, mostrando uma dispersão considerável dos resultados individuais em relação a média nesses casos.

Tabela 31 - Resultados médios de retração por secagem em diversos tempos de ensaio

Concreto	Retração por secagem ( $\mu$ m/m)									
	1 dia		7 dias		14 dias		28 dias		56 dias	
	<i>Ret</i>	C. Var. (%)	<i>Ret</i>	C. Var. (%)	<i>Ret</i>	C. Var. (%)	<i>Ret</i>	C. Var. (%)	<i>Ret</i>	C. Var. (%)
REF 0,30	-8	50	-47	35	-45	26	-116	12	-229	6
REF 0,345	-34	14	-119	17	-154	16	-198	13	-278	10
REF 0,367	4	220	-80	22	-151	20	-159	20	-192	26
SAP(0,30+0,045)	-1	7	-11	176	-48	20	-82	28	-73	27
SAP(0,30+0,067)	-8	60	-36	53	-28	71	-91	12	-69	49
0,30 1NS	-21	122	-122	15	-157	14	-195	3	-205	4
0,30 2NS	-43	115	-114	37	-141	34	-184	25	-248	29
SAP(0,30+0,045)1NS	-13	25	-14	61	-47	24	-73	66	-151	4
SAP(0,30+0,045)2NS	-1	346	-31	63	-38	25	-110	38	-161	28
SAP(0,30+0,067)1NS	2	229	-128	41	-96	37	-167	26	-199	21
SAP(0,30+0,067)2NS	-40	10	-200	34	-373	16	-337	8	-474	5

A Figura 133 mostra o comportamento, ao longo do tempo de execução do ensaio, da retração por secagem dos concretos estudados.

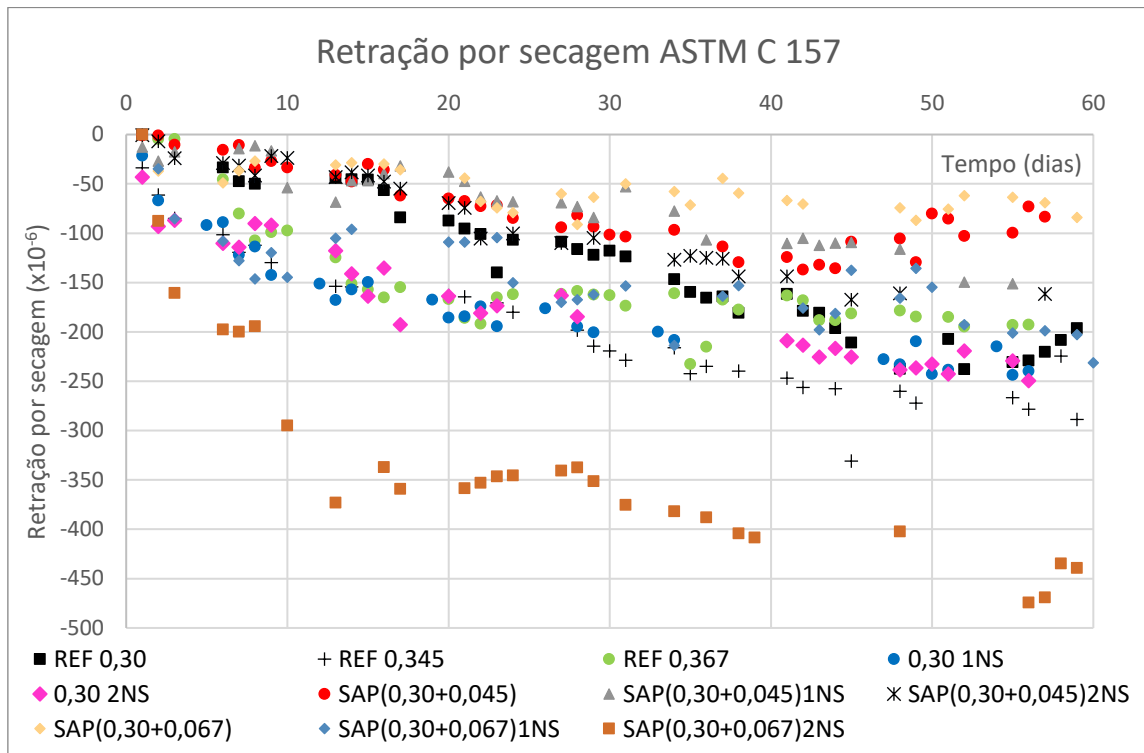


Figura 127 - Resultados médios de retração por secagem de todos os concretos estudados

Nota-se que, com exceção ao concreto SAP(0,30+0,067)2NS, os valores de retração por secagem dos concretos se situam, ao final do período de ensaio, no intervalo entre -70 a -300 $\mu\text{m}/\text{m}$ . A retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,067)2NS, ao final do período de ensaio, foi em torno de -470  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Essa grande discrepância desse resultado, em relação ao demais concretos, é observada ao longo de todo o período do ensaio, como mostra a Figura 133. Acredita-se que essa discrepância se deve a algum problema na realização do ensaio, não representando um comportamento desse concreto. Desse modo, os resultados de retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,067)2NS não serão considerados na análise.

Para uma melhor apresentação e discussão dos resultados de retração por secagem, apresenta-se a seguir, uma análise dividida nos seguintes itens: a) avaliação da adição de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna; b) análise da adição de nanossílica nas misturas e c) o efeito combinado da adição do SAP e de nanossílica.

### a) Avaliação da adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna

Neste item são analisados os resultados de retração por secagem dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com os concretos de referência. Na Figura 128 são mostrados os resultados de retração por secagem desses concretos. O zero no eixo do tempo corresponde à idade do concreto no início do ensaio (28 dias).

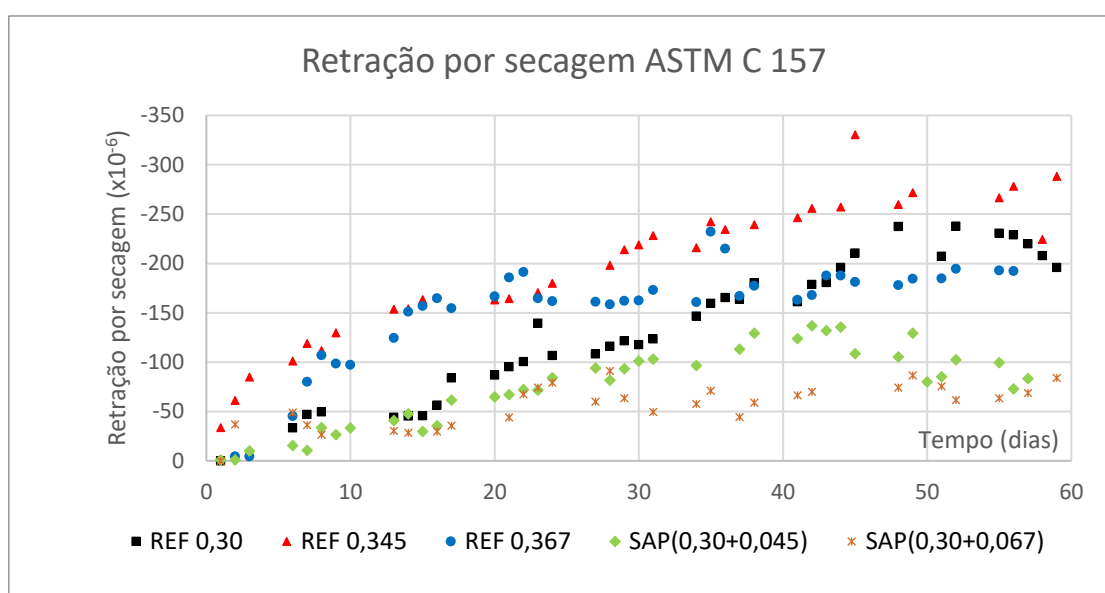


Figura 128 - Resultados de retração por secagem dos concretos com a adição de SAP em comparação com os concretos de referência

De uma maneira geral, observa-se na Figura 128, que os concretos contendo SAP apresentaram ao longo do tempo uma menor retração por secagem do que os concretos de referência. Nota-se que, do início do ensaio até aproximadamente 14 dias, os valores de retração por secagem dos concretos com água incorporada são próximos ao do concreto de referência REF 0,30 e menores do que os concretos de referência REF 0,345 e REF 0,367. Após os 14 dias de início de ensaio até o final do tempo de ensaio, as diferenças entre os valores de retração por secagem dos concretos com SAP em relação aos concretos de referência tendem a aumentar.

O mecanismo básico da retração por secagem é a evaporação da água da rede de capilares do concreto, portanto, acredita-se que a melhoria da estabilidade dimensional no que se

refere à retração por secagem, se deve principalmente à menor conexão da estrutura dos poros das amostras com SAP. Nesse sentido, Ma et al. (2017) apresenta resultados em que a adição de SAP em argamassas reduz de forma considerável a porosidade aberta, como mostra a Figura 129.

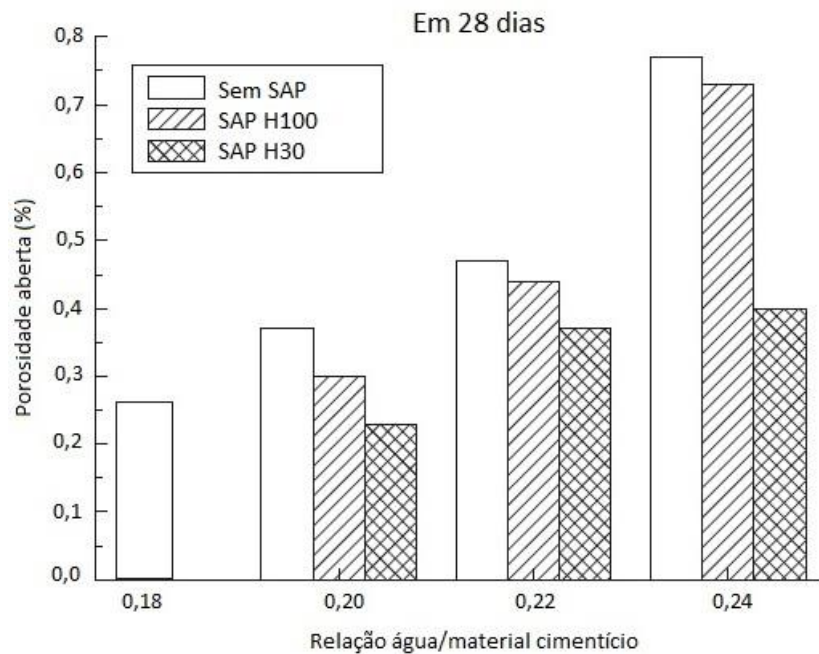


Figura 129 - Porosidade aberta de materiais cimentícios com e sem SAP (MA et al., 2017)

#### b) Efeito da Adição de Nanossílica

Neste item faz-se a análise dos concretos contendo 1% (0,30 1NS) e 2% (0,30 2NS) de adição de nanossílica, em relação ao concreto de referência REF 0,30. Na Figura 130 são mostrados os resultados médios de retração por secagem para essas misturas.



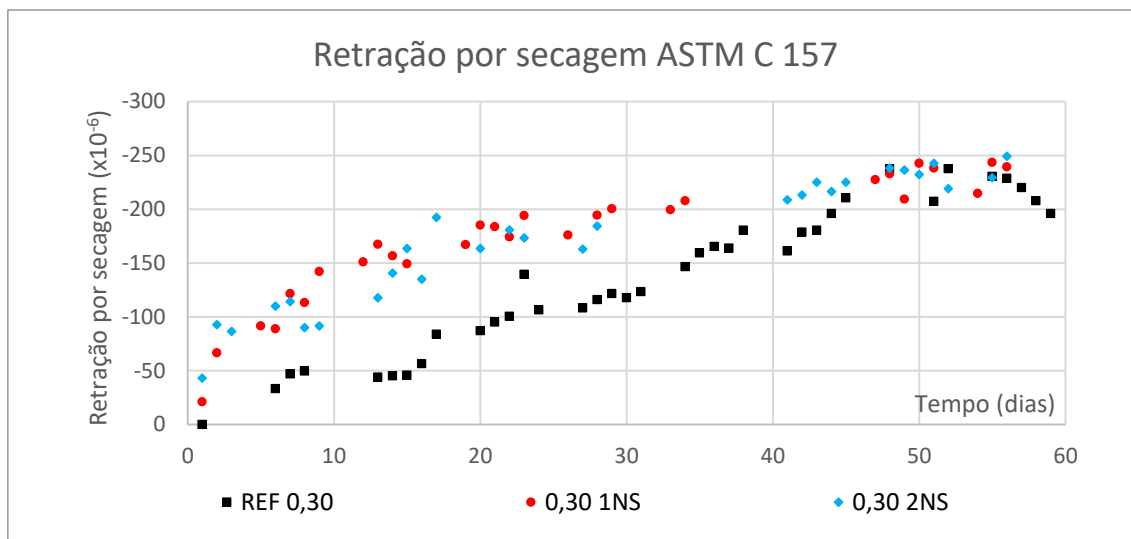


Figura 130 - Resultados de retração por secagem, obtidos pelo método da ASTM C157, para os concretos 0,30 1NS, 0,30 2NS e REF 0,30

Nota-se na Figura 130 que, apesar dos valores finais de retração por secagem ao término do ensaio tenderem para o valor entre  $-200$  e  $-250 \mu\text{m}/\text{m}$ , os concretos com adição de nanossílica apresentam maiores valores de retração por secagem do início do ensaio até, aproximadamente, 45 dias. A partir de então, os valores de retração por secagem entre os concretos com nanossílica e o concreto de referência apresentam resultados semelhantes.

Essa tendência de incremento da retração por secagem dos concretos com adição de nanossílica pode estar associada ao refinamento dos poros provocado pela nanossílica na estrutura interna do concreto.

### c) Efeito combinado da nanossílica e do polímero superabsorvente sobre a retração por secagem

Neste item são analisados os resultados de retração por secagem das misturas híbridas contendo adição de nanossílica e água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna.

A Figura 131 mostra o comportamento da retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,045 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com as misturas com adição de nanossílica.

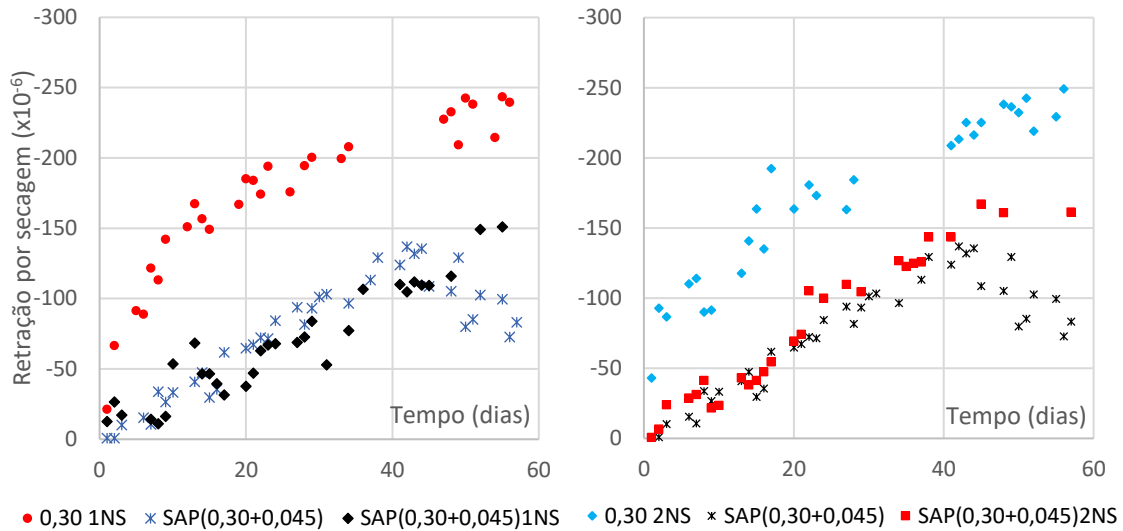


Figura 131 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,045 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com as misturas somente com adição de nanossílica

Como apresentado e discutido anteriormente, a adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna, promoveu uma redução da retração por secagem do concreto, enquanto a adição de nanossílica mostrou a tendência a promover um incremento da retração por secagem. Desse modo, se tem a combinação de duas variáveis de efeitos contrários. Observando a Figura 131 nota-se que a incorporação de água, por meio de SAP como agente de cura interna, exerce o efeito preponderante sobre a retração por secagem das misturas contendo SAP e adição de nanossílica. Tal comportamento, apesar de menos evidente, também foi observado para o teor de água incorporada 0,067, como mostra a Figura 132.

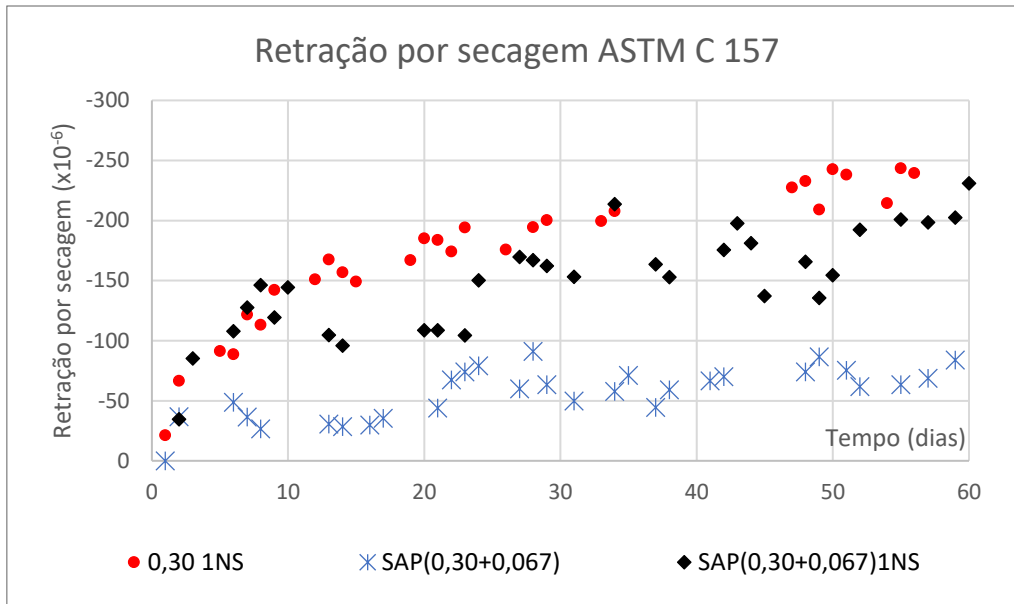


Figura 132 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,067 combinado com 1% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com a mistura somente com adição de nanossílica

#### 4.2.2.3 – Resultados de retração por secagem pelo método do extensômetro embutido

Na Tabela 31 são mostrados os resultados de retração por secagem, em algumas idades, obtidos pelo método do extensômetro embutidos para todos os concretos estudados. É possível observar que o coeficiente de variação foi menor do que os resultados obtidos pelo método da ASTM C157.

Tabela 32 - Resultados médios de retração por secagem em diversos tempos de ensaio

Concreto	Retração por secagem (µm/m)									
	1 dia		28 dias		56 dias		112 dias		196 dias	
	Ret	C. Var. (%)	Ret	C. Var. (%)	Ret	C. Var. (%)	Ret	C. Var. (%)	Ret	C. Var. (%)
REF 0,30	-17	27	-100	23	-137	20	-189	15	-198	20
REF 0,345	-24	13	-143	12	-171	16	-230	20	-280	16
REF 0,367	-33	3	-134	7	-196	3	-217	9	-252	3
SAP(0,30+0,045)	-8,5	41	-135	4	-200	0	-265	2	-308	5
SAP(0,30+0,067)	-15	24	-117	15	-171	6	-256	4	-344	2
0,30 1NS	-38	9	-120	7	-156	4	-211	5	-227	4
0,30 2NS	-7,5	9	-51,5	1	-113	9	-162	1	-201	1
SAP(0,30+0,045)1NS	-18	68	-135	10	-194	13	-255	10	-280	9
SAP(0,30+0,045)2NS	-13	27	-133	29	-192	27	-255	22	-310	22
SAP(0,30+0,067)1NS	-22	14	-81	42	-149	23	-254	16	-325	14
SAP(0,30+0,067)2NS	-10	67	-64	39	-139	25	-238	21	-311	20

Nota-se que, ao final do período de ensaio, a retração por secagem dos concretos estudados variou entre -200 a -350  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Na Figura 133 é apresentado o comportamento, ao longo do tempo de execução do ensaio.

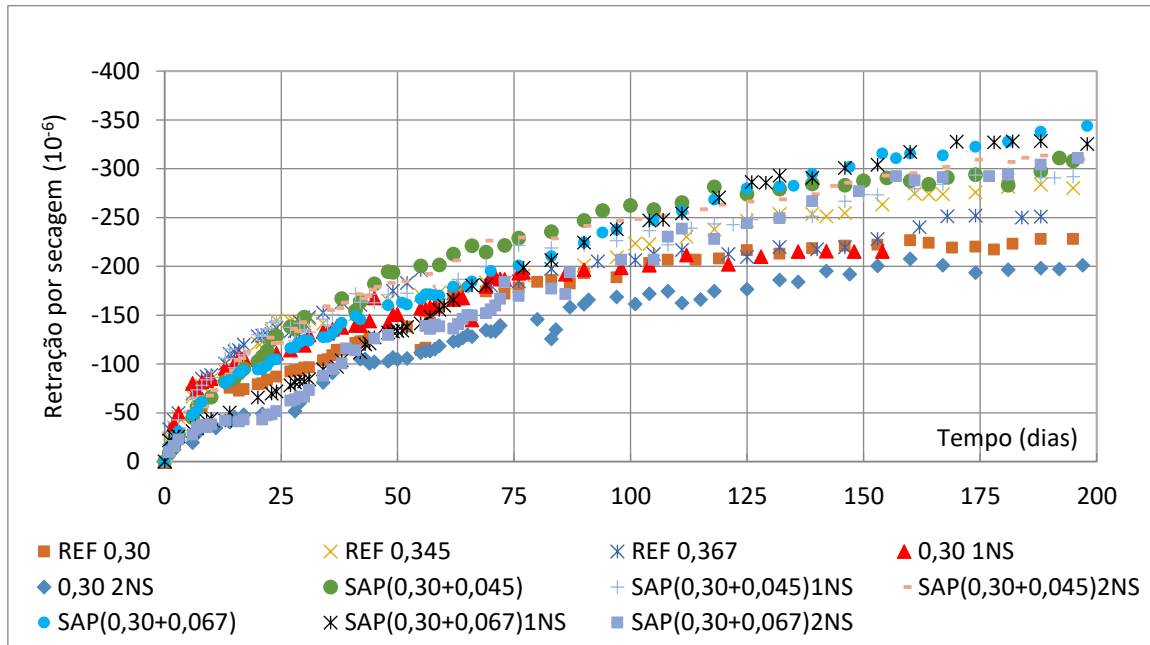


Figura 133 - Resultados médios de retração por secagem de todos os concretos estudados

Para uma melhor apresentação e discussão dos resultados de retração por secagem, apresenta-se a seguir, uma análise dividida nos seguintes itens: a) avaliação da adição de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna; b) análise da adição de nanossílica nas misturas e c) o efeito combinado da adição do SAP e de nanossílica.

#### a) Avaliação da adição de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna

Neste item são analisados os resultados de retração por secagem dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com os concretos de referência. Na Figura 134 são mostrados os comportamentos da retração por secagem dos concretos com água incorporada por meio de SAP como agente de cura interna e do concreto de referência REF 0,30. O zero no eixo do tempo corresponde à idade do concreto no início do ensaio (28 dias).

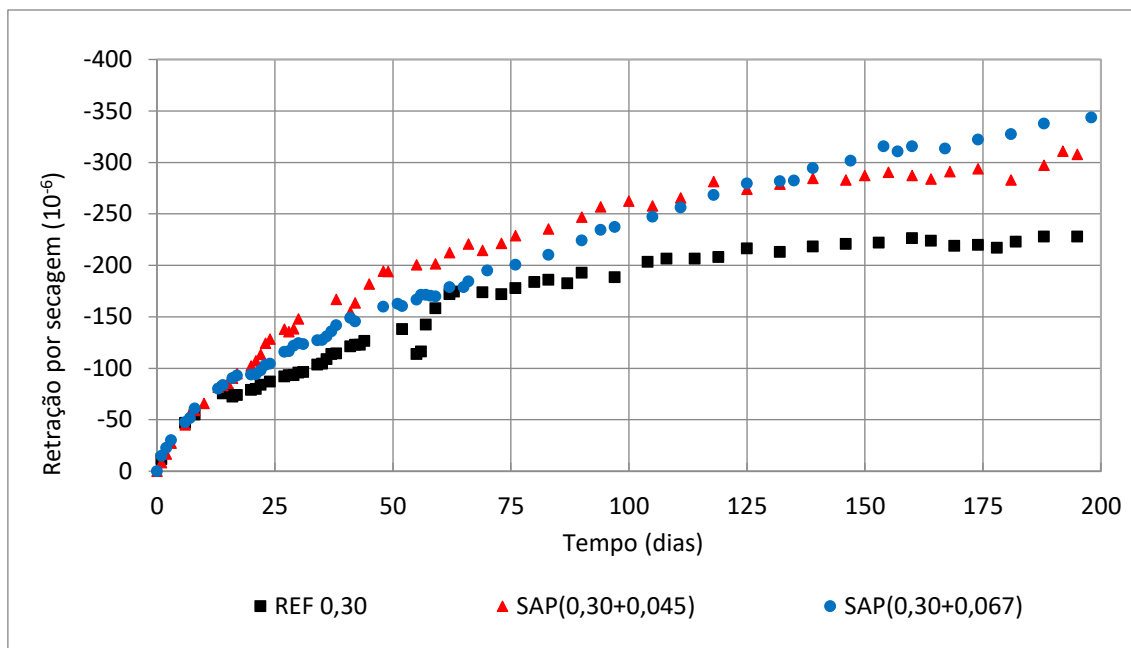


Figura 134 - Resultados de retração por secagem dos concretos com a adição de SAP em comparação com o concreto de referência REF 0,30

Observa-se na Figura 134, que os concretos contendo SAP apresentaram uma maior retração por secagem do que o concreto de referência. Enquanto o concreto REF 0,30 apresentou ao final do ensaio retração por secagem de aproximadamente  $-225\mu\text{m}/\text{m}$ , os concretos com SAP apresentaram valores de retração que variou entre  $-300$  e  $350\mu\text{m}/\text{m}$ , ou seja, para concretos com a mesma relação a/c básica, a água incorporada por meio de SAP como agente de cura interna, representou um acréscimo na retração por secagem, em média, de 44%. Nota-se ainda que não há grandes diferenças no comportamento da retração por secagem ao aumentar o teor de água incorporada de 0,045 para 0,067.

Para concretos com a mesma relação a/c total, a água incorporada, por meio de SAP como agente de cura interna, não provoca grandes diferenças na retração por secagem, como é mostrado na Figura 135.

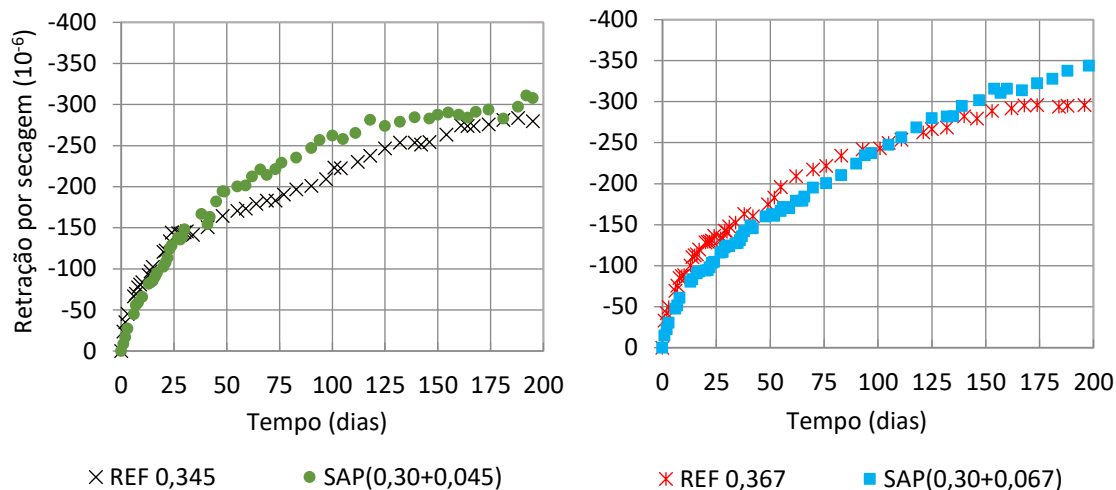


Figura 135 – Evolução da retração por secagem em concretos com SAP em comparação com concretos sem SAP, relação  $a/c_{total}$  0,345 (a esquerda) e  $a/c_{total}$  0,367 (a direita)

Vários autores (ASSMANN, 2013; KONG et al., 2014; AZARIJAFARI et al., 2016; MA et al., 2017) observaram em seus estudos que concretos com água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna, apresentam um aumento na retração por secagem em relação ao concreto de referência com a mesma relação água/cimento básica e apresentam menor retração por secagem quando comparado com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento total. No presente estudo se observou o acréscimo da retração por secagem com a incorporação do SAP para os concretos com a mesma relação  $a/c$  básica, mas não se observou a redução da retração para o caso dos concretos com a mesma relação  $a/c$  total.

#### b) Efeito da Adição de Nanossílica

Neste item faz-se a análise dos concretos contendo 1% (0,30 1NS) e 2% (0,30 2NS) de adição de nanossílica, em relação ao concreto de referência REF 0,30. Na Figura 136 são mostrados os resultados médios de retração por secagem para essas misturas.

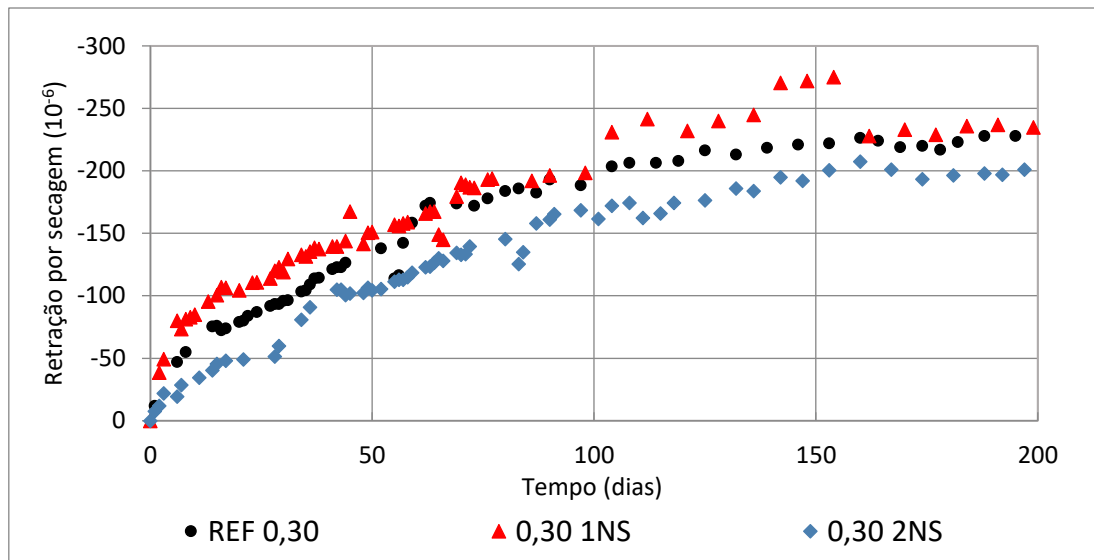


Figura 136 – Evolução da retração por secagem dos concretos 0,30 1NS, 0,30 2NS e REF 0,30

Nota-se na Figura 136 que a adição de 1% de nanossílica não representou mudanças nos valores de retração por secagem do concreto. Por outro lado, a adição de 2% de nanossílica representou uma redução da retração por secagem em torno de 15%.

Acredita-se que a redução da porosidade aberta devido ao efeito de preenchimento de vazios das nano partículas de sílica (efeito físico), associado à formação de C-S-H secundário devido a atividade pozolânica da nanossílica (efeito químico), é a principal razão para a diminuição da retração por secagem dos concretos com adição de nanossílica.

Na literatura encontram-se resultados contraditórios referentes ao efeito da adição de nanossílica sobre a retração por secagem. Alguns estudos (SADRMOMTAZI et al., 2009; SADRMOMTAZI e FASIHI, 2011; HARUEHANSAPONG et al., 2017) relatam que a adição de nanossílica provoca um incremento na retração por secagem. Por outro lado, outros trabalhos (SADRMOMTAZI e BARZEGAR, 2010; FARZADNIA et al., 2015) mostram resultados em que a adição de nanossílica nas misturas cimentícias reduz a retração por secagem. Sadrmomtazi e Barzegar (2010) trabalhando com concretos de relação a/c 0,43 e substituindo 7% da massa de cimento por nanossílica, observaram uma redução na retração por secagem, aos 42 dias, de 20% em relação ao concreto de referência. Mais recentemente, Farzadnia et al. (2015) estudando argamassas de relação a/c 0,50 e com 1% de adição de nanossílica, observaram aos 28 dias uma redução de 7,5% na retração por secagem em comparação com a argamassa de referência.

O incremento da retração por secagem tem sido atribuído ao fato das partículas de nanossílica atuarem como ativadoras para a acelerar a hidratação do cimento e, portanto, aumentando o grau de hidratação da matriz cimentícia (SADRMOMTAZI et al., 2009; HARUEHANSAPONG et al., 2017). No entanto, o argumento apresentado para explicar o aumento da retração por secagem, na verdade justifica o acréscimo da retração autógena. Assim sendo, acredita-se que nas misturas com adição de nanossílica, onde foram encontradas medidas maiores valores de retração por secagem, estão presentes também a retração autógena, levando os autores a concluir que a adição de nanossílica causa incremento na retração por secagem.

A formação de C-S-H secundário e o efeito de enchimento dos vazios pelas nano partículas, além de um menor teor de umidade livre, devido à inclusão de nanossílica, são fatores apontados para justificar a redução da retração por secagem (SADRMOMTAZI e BARZEGAR, 2010; FARZADNIA et al., 2015).

### **c) Efeito combinado da nanossílica e do polímero superabsorvente sobre a retração por secagem**

Neste item são analisados os resultados de retração por secagem das misturas híbridas contendo adição de nanossílica e água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna.

Na Figura 137 é mostrado o comportamento da retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,045 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada e com as misturas com adição de nanossílica.



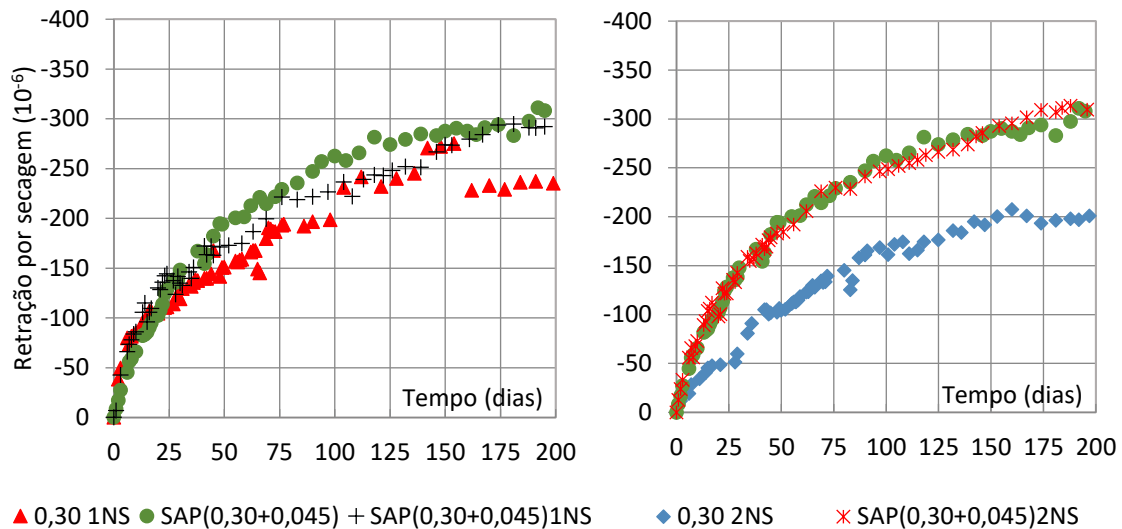


Figura 137 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,045 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com as misturas somente com adição de nanossílica

Observando a Figura 137 nota-se que as misturas de concreto com a adição combinada de nanossílica e a incorporação de água, por meio da adição de SAP como agente de cura interna, tem comportamento semelhante às misturas produzidas somente com a adição de SAP, mostrando que o SAP exerce o efeito preponderante sobre a retração por secagem no caso das misturas contendo SAP e adição de nanossílica. Essa tendência também foi observada no caso das misturas com água incorporada 0,067 com mostra a Figura 138. Apesar de que nesse caso, nota-se uma leve redução na retração por secagem no concreto SAP(0,30+0,067)2NS em relação ao concreto SAP(0,30+0,067).

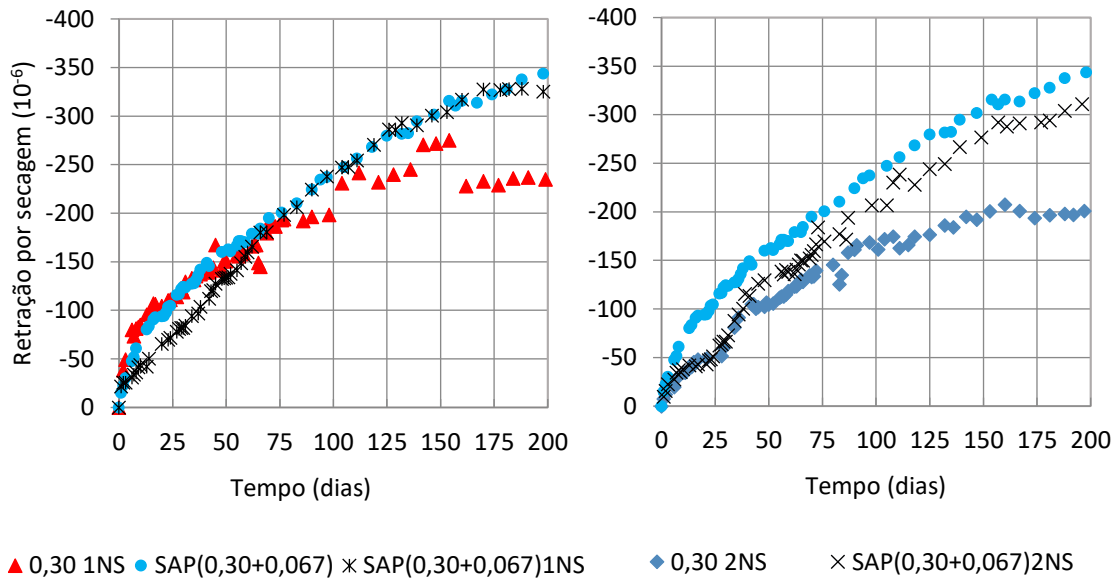


Figura 138 - Resultados de retração por secagem dos concretos com teor de água incorporada 0,067 combinados com 1% e 2% de adição de nanossílica, em comparação com a mistura de concreto com água incorporada por meio de SAP e com as misturas somente com adição de nanossílica

#### 4.2.3 – Variação de massa dos corpos de prova com extensômetro embutido

A Figura 139 mostra os resultados médios da variação da massa de água em relação à massa total dos concretos estudados. O resultado médio de cada concreto corresponde à média aritmética de pelo menos três resultados individuais. Os resultados individuais estão muito próximos e podem ser consultados no apêndice B.9.

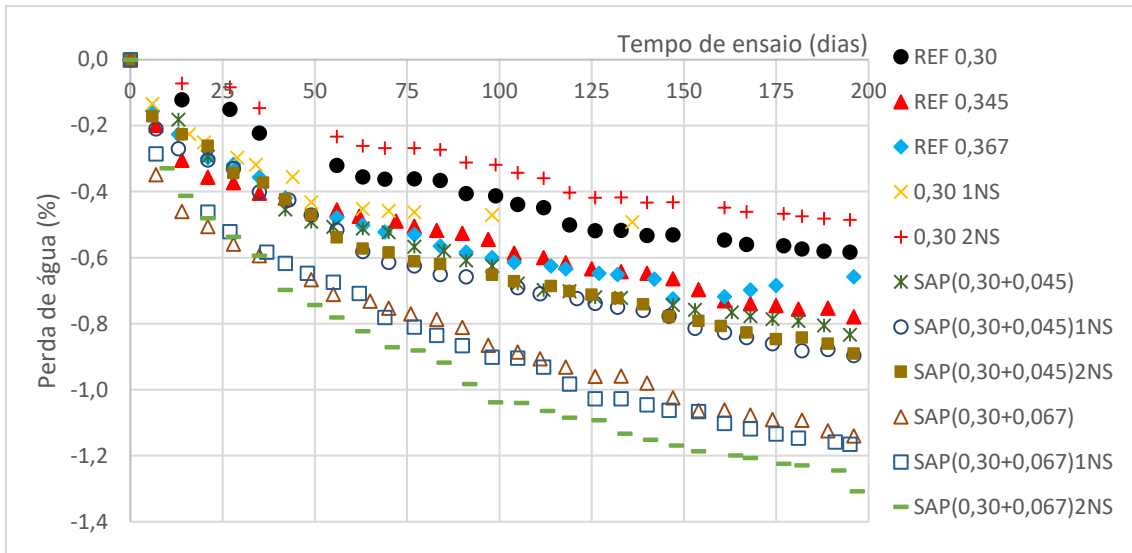


Figura 139 - Resultados médios de variação de massa de água em relação à água total dos concretos, determinados em corpos-de-prova prismáticos curados ao ar numa sala com UR 50% ± 4% e T = 21°C ± 2°C

Nota-se na Figura 139 que a de perda massa de água dos concretos ao final de 200 dias de ensaio variou entre 0,4 e 1,2%. A maior variação ocorreu para o concreto SAP(0,30+0,067)2NS, seguido pelos concretos SAP(0,30+0,067) e SAP(0,30+0,067)1NS. Os concretos que apresentaram menores de perda de massa foram os concretos REF 0,30 e 0,30 2NS. Ao relacionar os resultados de perda de massa de água com os resultados de retração por secagem discutidos anteriormente, nota-se que quanto maior foi a perda de massa, maior foi a retração por secagem, como mostrado na Figura 140.

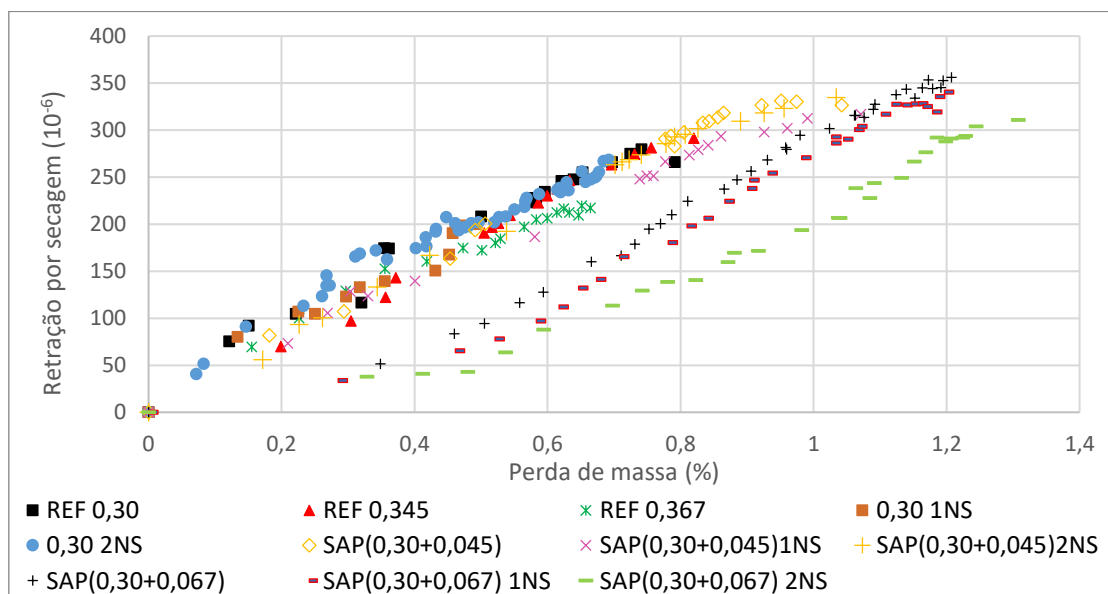


Figura 140 - Relação entre retração por secagem e perda de massa de água

Observando a Figura 140 nota-se que se pode estabelecer uma relação linear entre a perda de massa e a retração por secagem. Considerando todos os concretos estudados obtém-se uma relação linear como mostra a Figura 141 (a esquerda). Nessa situação, 70% dos resultados podem ser explicados por essa relação, pois  $R^2$  igual a 0,7018. No entanto, observando a Figura 140, nota-se que os concretos com água incorporada igual a 0,067 parecem um pouco deslocados dos demais concretos. A partir de tal observação, se fez a separação dos resultados em dois grupos, como mostra a Figura 141 a direita. Nessa condição, tem-se duas relações uma formada pelos os concretos com água incorporada igual a 0,067, onde 88% dos resultados são explicados por essa relação e outra para os demais concretos estudados, onde praticamente 95% dos resultados são explicados pela relação obtida.

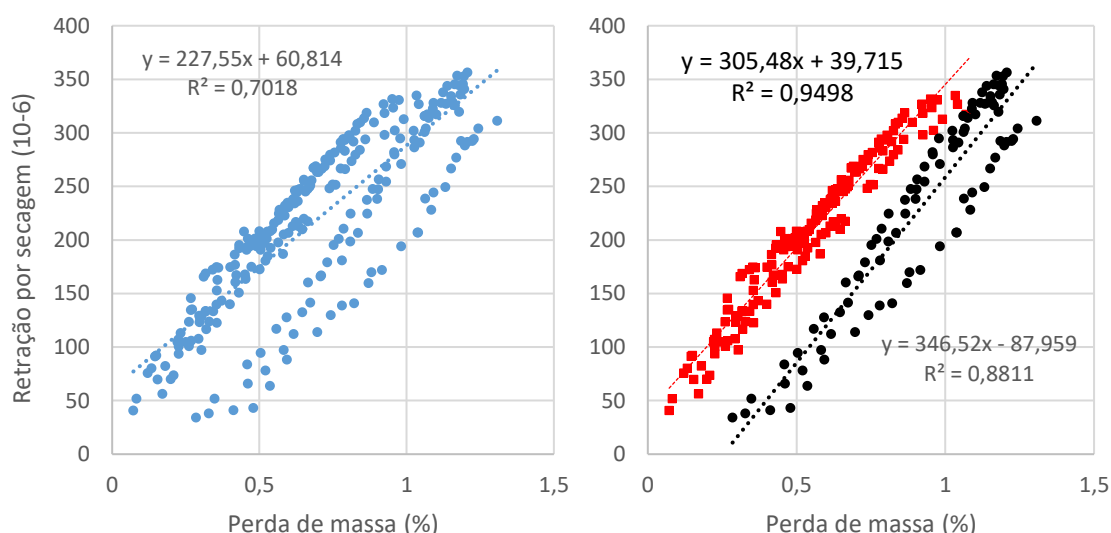


Figura 141 - Relação linear entre perda de massa e retração por secagem, a esquerda, para todos os concretos e, a direita, separando dois grupos formados pelos concretos com água incorporada igual a 0,067 (preto) e os demais concretos (vermelho)

#### 4.2.4 – Resistência à compressão

Na Tabela 33 são mostrados os resultados de resistência à compressão dos concretos estudados nas idades de 1, 3, 7, 28, 91 e 182 dias. Os resultados são a média de pelo menos dois corpos de prova e os valores de desvio padrão obtidos indicam que não houve grande dispersão dos dados individuais. Os resultados individuais encontram-se no Apêndice B.10.

Tabela 33 - Resultados médios de resistência à compressão dos concretos estudados

Concreto	Resistência à compressão (MPa)											
	1 dia		3 dias		7 dias		28 dias		91 dias		182 dias	
	$f_{c1}$	Des Pad.	$f_{c3}$	Des Pad.	$f_{c7}$	Des Pad.	$f_{c28}$	Des Pad.	$f_{c91}$	Des Pad.	$f_{c182}$	Des Pad.
REF 0,30	44,7	0,21	60,6	2,24	69,8	2,74	76,5	0,75	87,5	0,75	91,5	2,86
REF 0,345	49,3	1,21	60,6	2,62	68,0	3,98	74,8	3,02	82,6	0,64	90,5	1,84
REF 0,367	31,2	0,44	40,8	1,24	49,9	2,20	75,1	0,00	83,6	0,77	89,2	1,87
SAP(0,30+0,045)	41,2	1,49	56,2	1,22	61,9	3,45	71,1	2,54	75,2	2,28	85,7	3,52
SAP(0,30+0,067)	38,5	0,64	53,2	0,97	58,1	2,29	61,6	2,88	72,6	2,15	80,3	3,62
0,30 1NS	47,5	1,00	55,0	1,65	69,8	4,15	71,9	1,97	78,9	2,79	83,6	0,33
0,30 2NS	--	--	61,7	1,76	71,5	2,00	84,9	2,05	89,3	1,80	97,9	2,12
SAP(0,30+0,045)1NS	42,2	1,55	55,9	3,24	71,6	0,45	75,8	0,78	76,8	2,46	82,2	0,93
SAP(0,30+0,045)2NS	--	--	62,3	0,59	65,9	1,31	71,2	1,11	78,0	2,87	90,7	0,59
SAP(0,30+0,067)1NS	--	--	52,9	1,70	60,3	1,68	65,6	3,44	73,8	0,82	75,0	4,17
SAP(0,30+0,067)2NS	--	--	50,6	2,76	58,0	1,64	63,3	1,30	68,7	1,47	72,2	0,71

Para verificar se o teor de água incorporada, adição de nanossílica e a combinação dessas duas variáveis realmente exerciam influência sobre a resistência à compressão, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). Nesta análise estão as misturas REF 0,30; SAP(0,30+0,045); SAP(0,30+0,067); 0,30 1NS; 0,30 2NS; SAP(0,30+0,045)1NS; SAP(0,30+0,045)2NS; SAP(0,30+0,067)1NS e SAP(0,30+0,067)2NS e os resultados são mostrados na Tabela 34.

Tabela 34 - Análise de Variância verificando a significância do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre a resistência à compressão, para concretos com a/c básica = 0,30

$R^2_{\text{mod}} = 0,9653$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Água incorporada (A)	2	3205,7	1602,9	216,86	3,113	Sim
Teor de nanossílica (B)	2	50,1	25,1	3,39	3,113	Sim
Idade (C)	4	11678,2	2919,6	395,01	2,488	Sim
AB	4	561,4	140,4	18,99	2,488	Sim
AC	8	275,4	34,4	4,66	2,058	Sim
BC	8	225,9	28,2	3,82	2,058	Sim
ABC	16	262,2	16,4	2,22	1,792	Sim
Erro	79	583,9	7,4			
Total	123					

O uso da análise de variância na comparação de grupos está baseado na relação da variabilidade dos resultados dentro dos grupos e da variabilidade das médias entre os grupos, e na distribuição de Fischer (F), como nível de significância  $\alpha$  (GOMES, 1982; NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Os testes estatísticos foram feitos adotando um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ) e utilizando-se o programa *Statistica 10.0*<sup>®</sup>.

Observado os resultados mostrados na Tabela 34 nota-se que 96% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{\text{mod}} = 0,9653$ . A coluna dos valores de F mostra ainda que as três variáveis fixas consideradas nesta análise (água incorporada, adição de nanossílica e idade) exercem um efeito significativo sobre a resistência à compressão. A idade se apresentou como a variável mais importante, com o maior valor de F (395,01) dentre todos, seguido do teor de água incorporado ( $F=216,86$ ) e a adição de nanossílica ( $F=3,39$ ). Em relação a interação das variáveis, todas se mostraram importantes, com destaque para a interação entre a água incorporada e a adição de nanossílica com o maior valor de F (18,99) entre todas as interações.

Em resumo, as variáveis do presente estudo apresentaram-se como efeitos significativos sobre a resistência à compressão dos concretos estudados. Buscando uma melhor interpretação e discussão dos resultados, apresenta-se a seguir uma análise dividida em três etapas: a) avaliação da adição de água incorporada por meio da adição do SAP como agente de cura interna; b) análise da adição da nanossílica nas misturas; e c) o efeito combinado da adição do SAP e da nanossílica.

#### **4.2.4.1 - Efeito da água incorporada por meio da adição de Polímero Superabsorvente (SAP) como agente de cura interna**

Neste item faz-se a análise e discussão do comportamento da resistência à compressão dos dois concretos com adição de água incorporada contendo o SAP como agente de cura interna, SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067), em relação aos três concretos de referência (REF 0,30; REF 0,345 e REF 0,367).

A Figura 142 mostra os resultados médios de resistência à compressão, em diversas idades, dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento básica (REF 0,30).

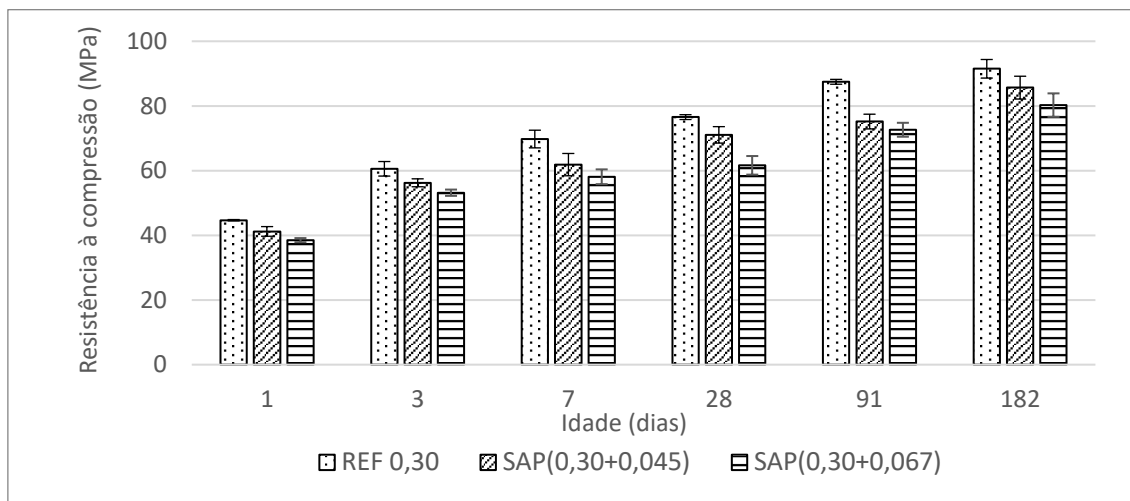


Figura 142 - Resultados de resistência à compressão para concretos com e sem água de cura interna para uma relação água/cimento básica igual a 0,30

Observando a Figura 142 nota-se que, em todas as idades, houve uma diminuição da resistência à compressão dos concretos contendo água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, em relação ao concreto de referência. Sendo que as menores resistências foram observadas para o concreto com maior teor de água incorporada. A Tabela 35 mostra, em porcentagem, o que representou a queda de resistência em cada idade.

Tabela 35 - Redução da resistência à compressão dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c básica ( $a/c_{básica} = 0,30$ )

Concreto	Resistência à compressão (MPa) (Redução de resistência em relação ao concreto REF 0,30)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,30	44,7	60,6	69,8	76,5	87,5	91,5
SAP(0,30+0,045)	41,2 (↓8%)	56,2 (↓7%)	61,8 (↓11%)	71,1 (↓7%)	75,2 (↓14%)	85,7 (↓6%)
SAP(0,30+0,067)	38,5 (↓14%)	53,2 (↓12%)	58,1 (↓17%)	61,6 (↓19%)	72,6 (↓17%)	80,3 (↓12%)

Na Tabela 35 observa-se que na idade de 1 dia os concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) tiveram uma redução da resistência à compressão de 8% e 14%, respectivamente. Aos 28 dias de idade a redução da resistência desses concretos foi de 7% e 19%, respectivamente. Manzano (2016) e Santos (2016) trabalhando com materiais semelhantes ao empregado no presente estudo avaliaram o comportamento da resistência à compressão, aos 28 dias de idade, de argamassas de alta resistência com relação água/cimento básica igual a 0,30 sem água incorporada e com água incorporada igual a 0,045, observaram uma redução na resistência de 22% e 30%, respectivamente.

No que se refere a evolução da resistência com a idade, nota-se que não há grandes diferenças quando da adição da água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna, como mostra a Figura 143.

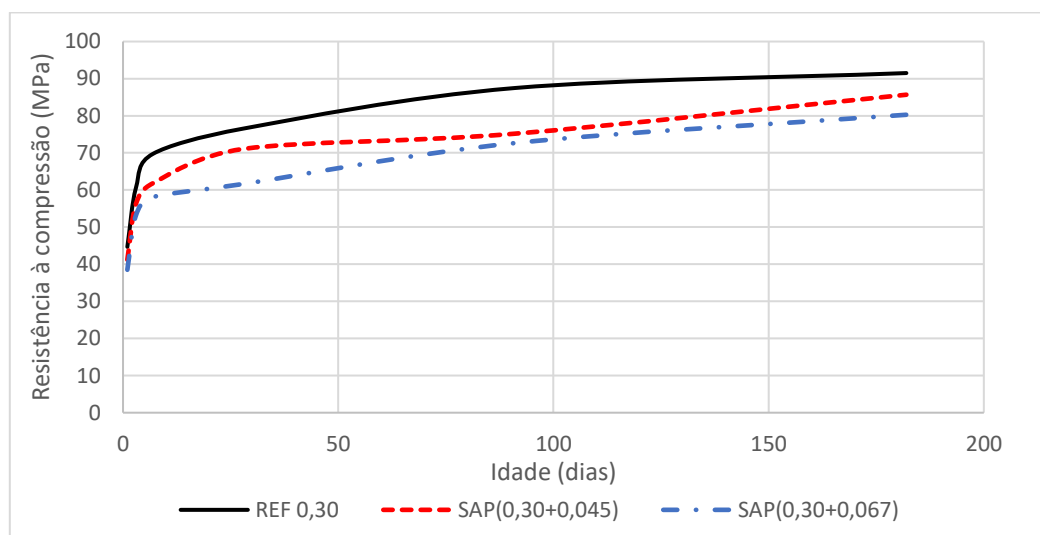


Figura 143 - Evolução da resistência à compressão com a idade dos concretos SAP(0,30+0,045), SAP(0,30+0,067) e REF 0,30

As reduções apresentadas na resistência provavelmente se devem a um incremento da porosidade da pasta devido à introdução do polímero superabsorvente. 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 et al., 2010).



Considerando que o teor de água incorporada se mostrou como uma variável significativa, como foi apresentado na Tabela 34, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores de resistência à compressão associados ao teor de água incorporada diferem entre si. A conclusão foi que os três teores de água incorporada formam três grupos que diferem significativamente entre si, como é mostrado na Figura 144.

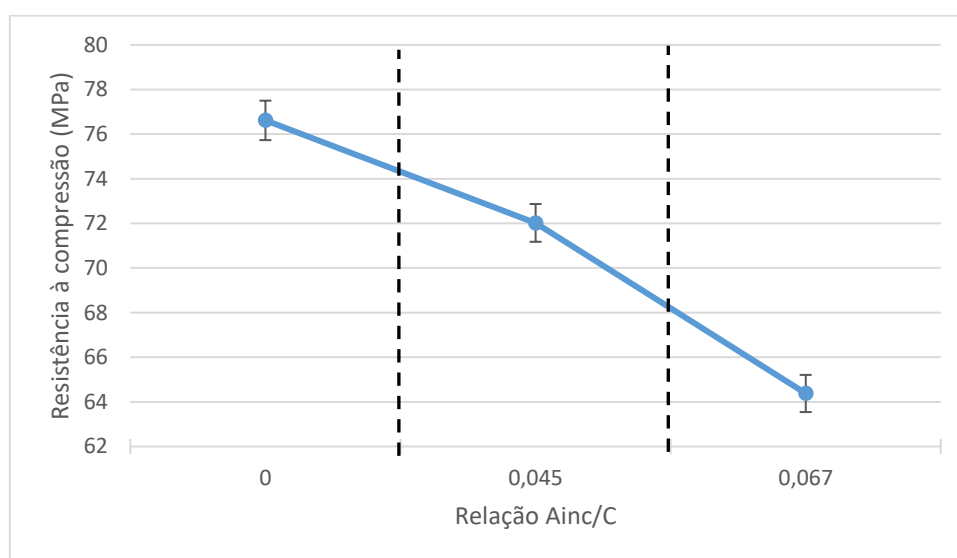


Figura 144 - Variação múltiplas de média para resistência à compressão, associada à relação  $a_{inc}/c$  para concretos com a mesma relação  $a/c_{básica}$

Como discutido anteriormente, a Figura 144 mostra a tendência de redução da resistência à compressão com a adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna e com o aumento do seu teor.

Considerando a redução da resistência à compressão em comparação com concreto com a mesma relação  $a/c_{básica}$ , foi feita a comparação das misturas contendo polímero superabsorvente com misturas de referência (sem polímero) com a mesma relação  $a/c_{total}$  da mistura com polímero, uma vez que a perda de resistência pode ser devido ao aumento da relação água/cimento causado pela adição de água extra para a cura interna.

Na Figura 145 são mostrados os resultados médios de resistência à compressão, em diversas idades, dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com os respectivos concretos de referência com a mesma relação água/cimento total (REF 0,345 e REF 0,367).

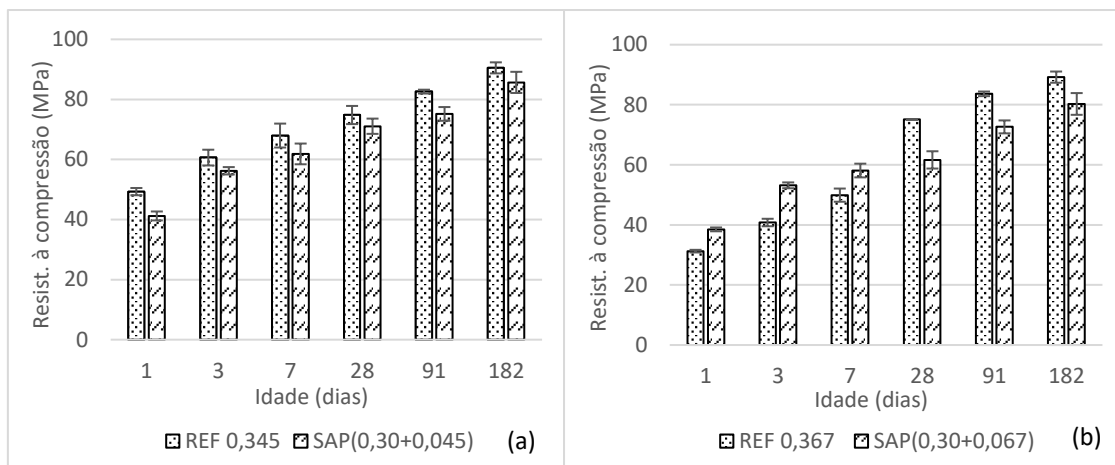


Figura 145 - Resultados de resistência à compressão para concretos com e sem água de cura interna para uma mesma relação água/cimento total

Observando a Figura 145(a) nota-se que o concreto SAP(0,30+0,045) apresentou redução da resistência à compressão em todas as idades, em comparação com o concreto REF 0,345. Por outro lado, o concreto SAP(0,30+0,067) apresentou maiores resistências do que o concreto REF 0,367 nas idades iniciais (até 7 dias de idade) e nas idades maiores (28, 91 e 182 dias) apresentou menores resistências, como pode ser observado na Figura 145(b). A Tabela 36 mostra, em porcentagem, o comportamento da resistência à compressão dos concretos com água incorporada em relação às referências com a mesma relação água/cimento total.

Tabela 36 - Comportamento da resistência à compressão dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c total

Concreto	Resistência à compressão (MPa)					
	(Comportamento da resistência em relação ao concreto referência com a mesma relação a/c total)					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,345	49,3	60,6	68,0	74,8	82,6	90,5
SAP(0,30+0,045)	41,2 (↓16%)	56,2 (↓7%)	61,8 (↓9%)	71,1 (↓5%)	75,2 (↓9%)	85,7 (↓5%)
REF 0,367	31,2	40,8	49,9	75,1	83,6	89,2
SAP(0,30+0,067)	38,5 (↑23%)	53,2 (↑30%)	58,1 (↑16%)	61,6 (↓18%)	72,6 (↓13%)	80,3 (↓10%)

Nota-se na Tabela 36 que o teor de água incorporada igual a 0,045 representou uma redução da resistência à compressão entre 5% e 16% em comparação ao concreto REF 0,345. A maior redução da resistência foi observada com 1 dia de idade (16%), enquanto

que a menor redução da resistência foi observada aos 28 e 182 dias de idade (5%). O teor de água incorporada igual a 0,067 representou um acréscimo de 16% a 30% na resistência à compressão, nas idades iniciais (até 7 dias), em comparação com o concreto REF 0,367. Por outro lado, nas idades maiores (28, 91 e 182 dias) o teor de água incorporada igual a 0,067 também resultou na redução da resistência entre 10% e 18%.

Para verificar se o teor de água incorporada realmente exercia influência sobre a resistência à compressão para o caso de concretos com a mesma relação  $a/c_{total}$ , realizou-se uma análise de variância (ANOVA).

Na Tabela 37 são mostrados os resultados da análise de variância verificando a influência do teor de água incorporada sobre a resistência à compressão de concretos com a mesma relação  $a/c_{total}$  igual a 0,345.

Tabela 37 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à compressão, para a mesma relação  $a/c$  total ( $a/c_{total} = 0,345$ )

$R^2_{mod} = 0,9377$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Relação Ainc/C (A)	1	92,5	92,5	8,30	4,41	Sim
Idade (B)	4	2916,6	729,2	65,39	2,93	Sim
AB	4	12,8	3,2	0,29	2,93	Não
Erro	18	200,7	11,2			
Total	27					

Os resultados apresentados na Tabela 37 mostram que 94% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{mod} = 0,9377$ . Observa-se na coluna dos valores de F que as duas variáveis fixas consideradas nesta análise (teor de água incorporada e idade) exercem um efeito significativo na resistência à compressão. A variável idade novamente apresentou-se como o efeito mais importante ( $F=65,39$ ), enquanto que a interação das variáveis não foi significativa.

Na Tabela 38 são mostrados os resultados da análise de variância para verificar a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à compressão, para os concretos com a relação água/cimento total igual a 0,367.

Tabela 38 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à compressão, para a mesma relação a/c total ( $a/c_{total} = 0,367$ )

$R^2_{mod} = 0,9817$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Relação Ainc/C (A)	1	30,1	30,1	4,47	4,38	Sim
Idade (B)	4	6030,5	1507,6,2	223,86	2,89	Sim
AB	4	817,4	204,3	30,34	2,89	Não
Erro	19	128,0	6,7			
Total	28					

Observa-se na Tabela 38 que 98% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{mod} = 0,9817$ . Observa-se na coluna dos valores de F que as duas variáveis fixas consideradas nesta análise (teor de água incorporada e idade), bem como a interação entre elas, exercem um efeito significativo na resistência à compressão. A variável idade mostrou-se como o efeito mais importante ( $F=223,86$ ).

Considerando que as variáveis se mostraram significativas na análise para concretos com a mesma relação água/cimento total, realizou-se a comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos diferem entre si para cada valor de relação água/cimento total. A conclusão foi que, tanto para a relação água/cimento total igual a 0,345 como para a relação 0,367 se formam dois grupos que diferem significativamente entre si, como é mostrado na Figura 146.

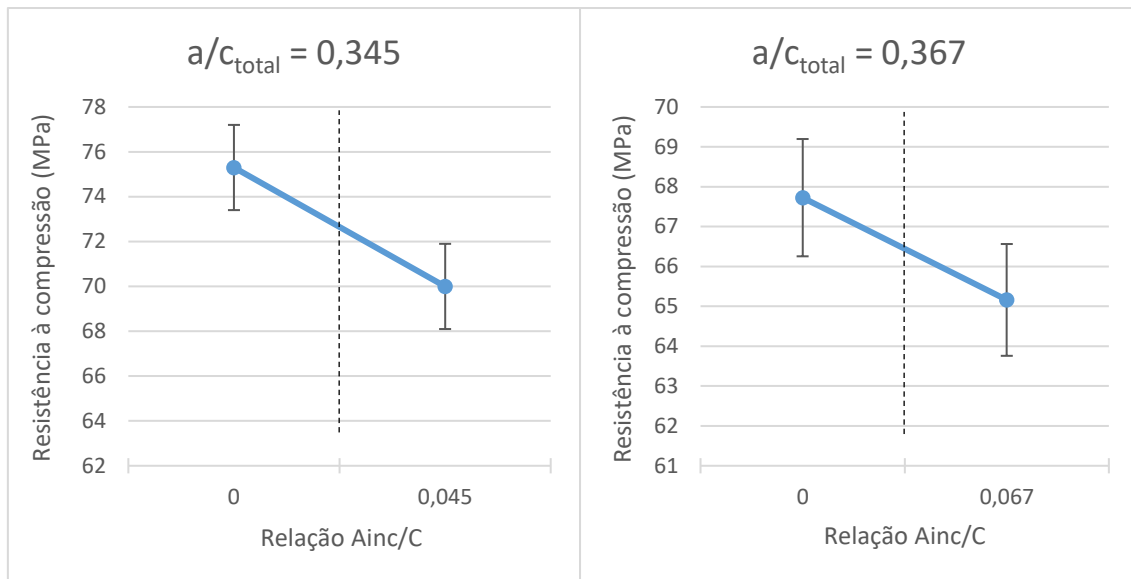


Figura 146 - Variação múltiplas de média para resistência à compressão, associada à relação  $a_{inc}/c$  para concretos com a mesma relação  $a/c_{total}$

#### 4.2.4.2 - Efeito da adição de nanossílica

Neste item faz-se a análise e discussão do comportamento da resistência à compressão dos dois concretos com adição de nanossílica, em relação ao concreto REF 0,30.

A Figura 147 mostra os resultados médios de resistência à compressão, em diversas idades, dos concretos 0,30 1NS e 0,30 2NS em comparação com o concreto de referência REF 0,30.

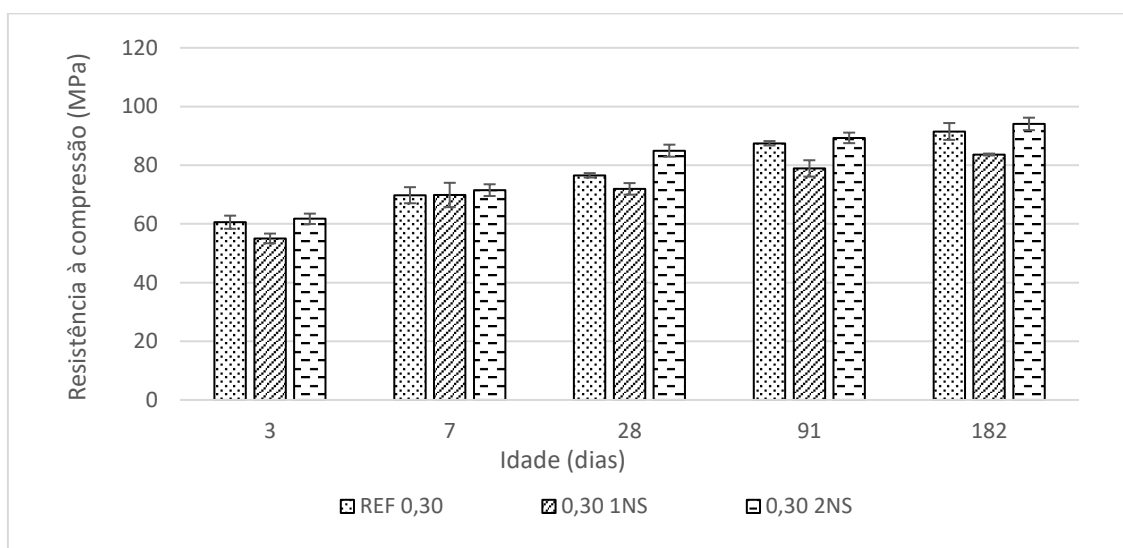


Figura 147 Resultados de resistência à compressão para concretos com adição de nanossílica em comparação com o concreto REF 0,30

Observando a Figura 147 nota-se que o concreto 0,30 1NS apresentou uma leve redução na resistência à compressão, o concreto 0,30 2NS apresentou um leve incremento nos valores da resistência, como pode melhor ser observado na Tabela 39.

Tabela 39 - Comportamento da resistência à compressão dos concretos com adição de nanossílica em relação ao concreto de referência REF 0,30

Concreto	Resistência à compressão (MPa) (Comportamento de resistência em relação ao concreto REF 0,30)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,30	60,6	69,8	76,5	87,5	91,5
0,30 1NS	55,0 (↓9%)	69,8 (0%)	71,9 (↓6%)	78,9 (↓10%)	83,6 (↓9%)
0,30 2NS	61,7 (↑2%)	71,5 (↑2%)	84,9 (↑11%)	89,3 (↑2%)	94,1 (↑3%)

Considerando que a adição de nanossílica se mostrou como uma variável significativa, como foi apresentado na Tabela 34, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores de resistência à compressão associados à adição de nanossílica diferem entre si. A conclusão foi que os três teores de adição de nanossílica não diferem significativamente entre si e, portanto, formam apenas um grupo, como é mostrado na Figura 148. Isso significa que do ponto de vista estatístico os concretos REF 0,30, 0,30 1NS e 0,30 2NS apresentaram a mesma resistência à compressão.

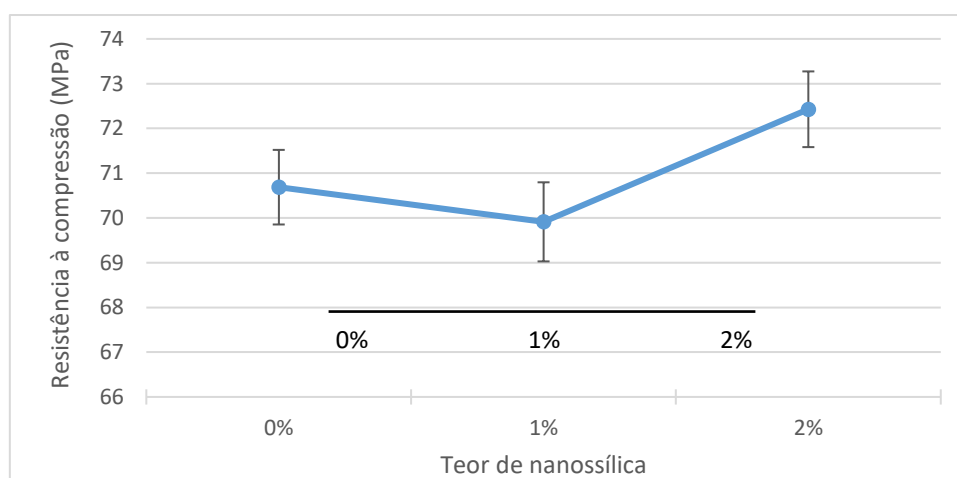


Figura 148 - Variação múltiplas de média para resistência à compressão, associada à adição de nanossílica

#### 4.2.4.3 - Efeito combinado da nanossílica e do polímero superabsorvente sobre a resistência à compressão

Neste item serão analisados os resultados de resistência à compressão das misturas híbridas contendo adição de nanossílica e água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna. Na Figura 149 são mostrados os resultados médios da resistência à compressão combinando as variáveis analisadas.

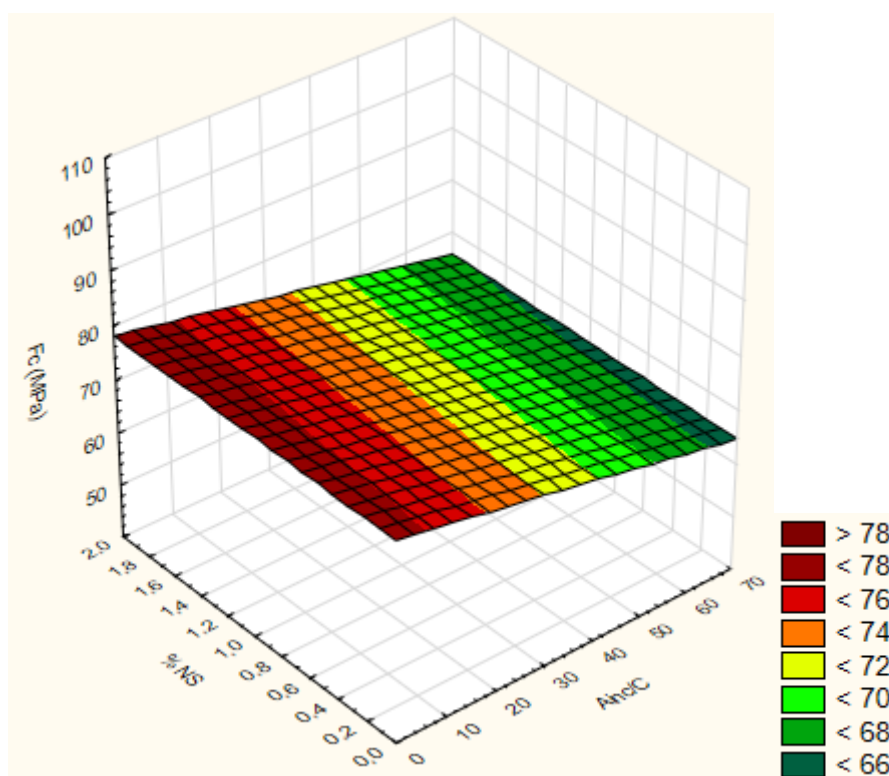


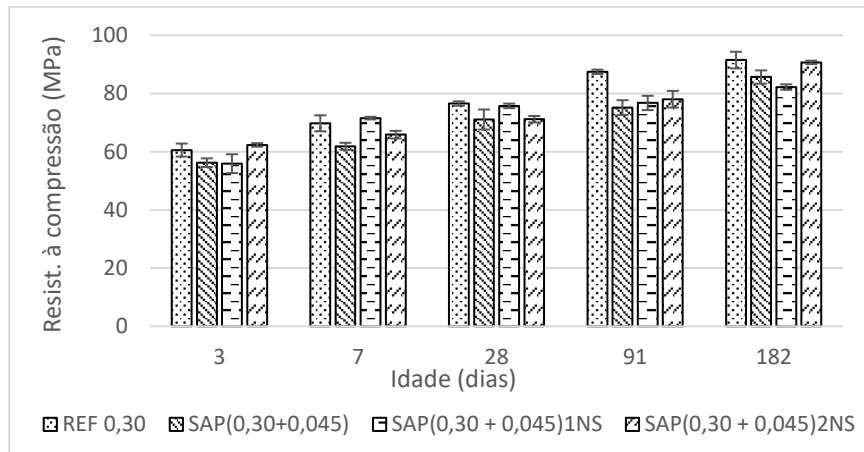
Figura 149 - Influência da ação combinada da adição de nanossílica e teor de água incorporada por meio de SAP na resistência à compressão dos concretos

Observando a Figura 149 é possível verificar, de uma maneira geral, que a resistência à compressão dos concretos cresce com a diminuição do teor de água incorporada e com o aumento do teor de nanossílica.

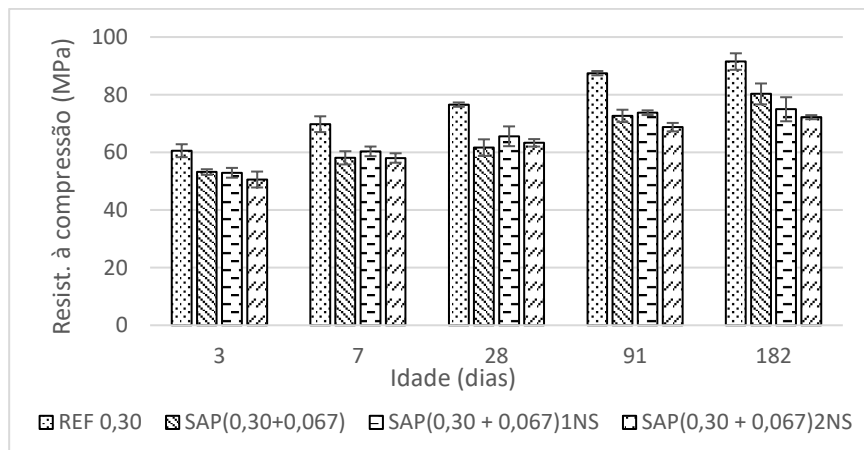
Na Figura 150 é mostrada a comparação dos resultados de resistência à compressão do concreto REF 0,30 com os resultados dos concretos com adição combinada de nanossílica e de água incorporada, por meio da adição de polímero superabsorvente.

Nota-se que para a relação  $a_{inc}/c$  igual a 0,067, as combinações com os teores de adição de nanossílica estudados não foram suficientes para compensar a perda de resistência

provocada pela adição do polímero superabsorvente. Nesse caso, a redução de resistência à compressão das misturas híbridas, independente do teor de nanossílica empregado, variou de 13% a 21%, como é mostrado na Tabela 40. Valores de redução próximos aqueles apresentados pelo concreto SAP(0,30+0,067) e que foi mostrado na Tabela 35.



(a)



(b)

Figura 150 - Resultados médios de resistência à compressão dos concretos com  $a_{inc}/c = 0,045$  (a) e  $a_{inc}/c = 0,067$  (b) em comparação com o concreto REF 0,30

No que se refere aos concretos com a relação  $a_{inc}/c$  igual a 0,045, a combinação com os teores de nanossílica estudados mostraram-se promissores para compensar a redução da resistência à compressão provocada pelo SAP. O resultado de resistência à compressão, aos 3 dias de idade, do concreto SAP(0,30+0,045)1NS foi 8% menor do que a resistência à compressão do concreto REF 0,30. No entanto, aos 7 e 28 dias as resistências desses concretos foram praticamente iguais, como pode ser observado na Tabela 40. Nas idades maiores (91 e 182 dias) a resistência à compressão do concreto SAP(0,30+0,045)1NS foi em torno de 11% menor do que a resistência do concreto de referência.



No caso do concreto SAP(0,30+0,045)2NS, observou-se que a resistência à compressão desse concreto é praticamente igual à resistência do concreto de referência nas idades de 3 dias e 182 dias. Nas idades intermediárias a resistência à compressão do concreto SAP(0,30+0,045)2NS é menor entre 6% e 11%, como é mostrado na Tabela 40.

Tabela 40 - Redução da resistência à compressão dos concretos com adição combinada de nanossílica e SAP em relação ao concreto de referência com relação  $a/c_{básica} = 0,30$ .

Concreto	Resistência à compressão (MPa) (Comportamento de resistência em relação ao concreto REF 0,30)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,30	60,6	69,8	76,5	87,5	91,5
SAP (0,30+0,045)1NS	55,9 (↓8%)	71,6 (↑2,5%)	75,8 (↓1%)	76,8 (↓12%)	82,2 (↓10%)
SAP (0,30+0,045)2NS	62,3 (↑3%)	65,9 (↓6%)	71,2 (↓7%)	78,0 (↓11%)	90,7 (↓1%)
SAP(0,30+0,067)1NS	52,9 (↓13%)	60,3 (↓14%)	65,6 (↓14%)	73,8 (↓16%)	75,0 (↓18%)
SAP(0,30+0,067)2NS	50,6 (↓16%)	58,0 (↓17%)	63,3 (↓17%)	68,7 (↓21%)	72,2 (↓21%)

Considerando que a interação entre o teor de água incorporada e a adição de nanossílica se mostrou como uma interação significativa, como foi apresentado na Tabela 34, realizou-se uma comparação múltipla de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores de resistência à compressão associados a interação entre o teor de água incorporada e a adição de nanossílica diferem entre si.

Na Figura 151 são mostrados os resultados da variação múltipla de médias para resistência à compressão, associada ao efeito combinado do teor de água incorporada e da adição de nanossílica.

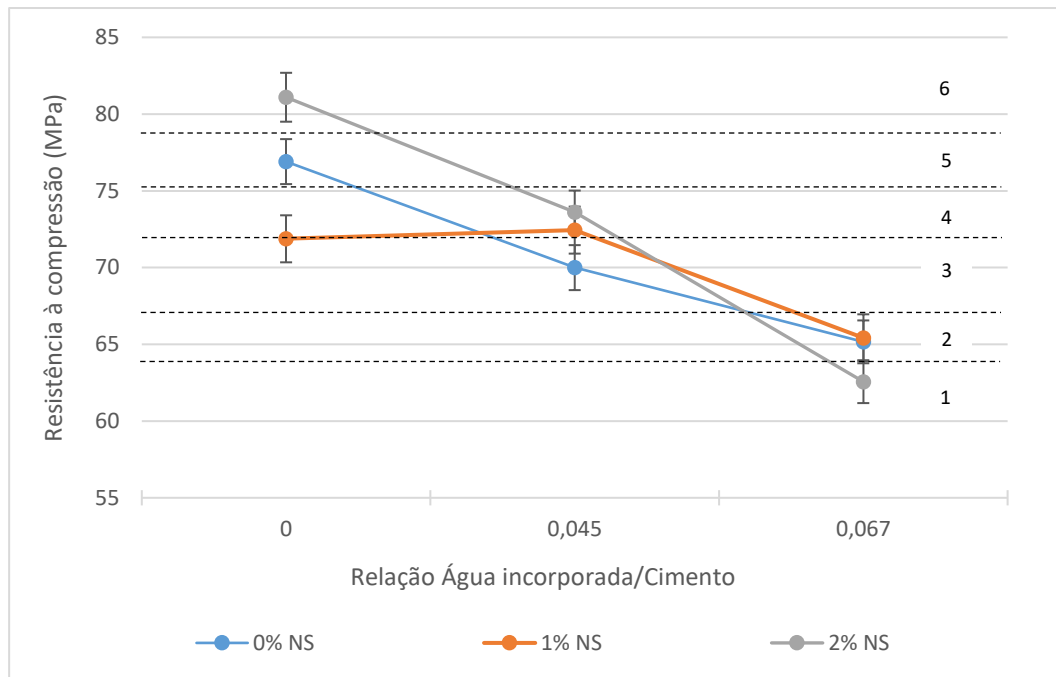


Figura 151 - Variação múltiplas de médias para resistência à compressão, associada ao efeito combinado ao teor de água incorporada e à adição de nanossílica

Nota-se que, o efeito combinado da adição de nanossílica e da incorporação de água de cura interna por meio da adição de SAP, formam seis grupos que diferem significativamente entre si. Observa-se a tendência de redução da resistência à compressão com o aumento do teor de água incorporada, independente do teor de nanossílica. Por outro lado, como discutido anteriormente, se observa que a combinação do teor de água incorporada igual a 0,045 com a nanossílica, se mostra promissora na capacidade de compensar parte da perda de resistência provocada pela adição do polímero superabsorvente.

#### 4.2.5 – Resistência à tração

Na Tabela 33 são mostrados os resultados de resistência à tração por compressão diametral ( $F_{c,sp}$ ) dos concretos estudados nas idades de 3, 7, 28, 91 e 182 dias. Os resultados são a média de pelo menos dois corpos de prova e os valores de desvio padrão obtidos indicam que não houve grande dispersão dos dados individuais. Os resultados individuais encontram-se no Apêndice B.10.

Tabela 41 - Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral

Concreto	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)									
	3 dias		7 dias		28 dias		91 dias		182 dias	
	F <sub>csp</sub>	Des Pad.	F <sub>csp</sub>	Des Pad.	F <sub>csp</sub>	Des Pad.	F <sub>csp</sub>	Des Pad.	F <sub>csp</sub>	Des Pad.
REF 0,30	4,65	0,43	5,65	0,14	6,03	0,12	6,44	0,02	6,70	0,16
REF 0,345	5,65	0,39	5,90	0,27	6,18	0,22	6,12	0,42	6,76	0,06
REF 0,367	4,57	0,30	5,37	0,07	5,98	0,48	6,23	0,49	6,68	0,23
SAP(0,30+0,045)	5,18	0,71	6,25	0,34	6,69	0,45	7,25	0,19	7,68	0,19
SAP(0,30+0,067)	5,00	0,19	6,29	0,07	6,34	0,25	7,03	0,31	7,18	0,07
0,30 INS	5,04	0,03	5,73	0,21	6,22	0,21	6,87	0,18	6,84	0,47
0,30 2NS	5,15	0,42	5,74	0,04	6,80	0,47	6,99	0,24	7,15	0,31
SAP(0,30+0,045) INS	4,53	0,42	6,23	0,08	6,00	0,45	6,50	0,15	7,22	0,43
SAP(0,30+0,045) 2NS	6,38	0,28	6,02	0,33	6,46	0,12	7,31	0,09	7,60	0,07
SAP(0,30+0,067) 1NS	4,87	0,43	5,77	0,06	6,14	0,10	6,58	0,08	7,05	0,43
SAP(0,30+0,067) 2NS	4,70	0,40	5,15	0,12	5,65	0,03	5,95	0,04	6,48	0,09

Para verificar se as variáveis estabelecidas nesse trabalho realmente exerciam influência sobre a resistência à tração por compressão diametral, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). O uso da análise de variância na comparação de grupos está baseado na relação da variabilidade dos resultados dentro dos grupos e da variabilidade das médias entre os grupos, e na distribuição de Fischer (F), como nível de significância  $\alpha$  (GOMES, 1982; NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Os testes estatísticos adotaram nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ) e utilizaram o *Statistica 10.0*<sup>®</sup>.

Na Tabela 42 são mostrados os resultados da análise de variância para verificar a influência das variáveis do estudo e suas combinações sobre a resistência à tração, para as misturas com a mesma relação água/cimento básica ( $a/c_{\text{básica}} = 0,30$ ).

Tabela 42 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade na resistência à tração, concretos com  $a/c_{\text{básica}} = 0,30$

$R^2_{\text{mod}} = 0,9007$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	F <sub>0,05</sub>	Significância
Água incorporada (A)	2	5,950	2,975	25,97	3,11	Sim
Teor de nanossílica (B)	2	0,800	0,400	3,49	3,11	Sim
Idade (C)	4	65,148	16,287	142,16	2,48	Sim
AB	4	8,431	2,108	18,40	2,48	Sim
AC	8	0,860	0,107	0,94	2,05	Não
BC	8	2,320	0,290	2,53	2,05	Sim
ABC	16	2,810	0,176	1,53	1,77	Não
Erro	83	9,509	0,115			
Total	127					

Observado os resultados mostrados na Tabela 42 nota-se que 90% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{\text{mod}} = 0,9007$ . A coluna dos valores de F mostra ainda que as três variáveis fixas consideradas nesta análise (água incorporada, adição de nanossílica e idade) exercem um efeito significativo na resistência à tração. A variável idade apresentou-se como o efeito mais importante, com o maior valor de F (142,16) dentre todos, seguido do teor de água incorporada e da adição de nanossílica. Em relação a interação das variáveis, mostraram-se importantes a interação entre o teor de água incorporada e a adição de nanossílica e a água incorporada e a idade. As demais interações não se mostraram significativas.

Em resumo, as variáveis do presente estudo (teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade) apresentaram-se como efeitos significativos sobre a resistência à tração dos concretos estudados. Buscando uma melhor interpretação e discussão dos resultados, apresenta-se a seguir, uma análise dividida em três etapas: a) avaliação da adição de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna; b) análise da adição da nanossílica nas misturas; e c) o efeito combinado da adição do SAP e da nanossílica.

#### **4.2.5.1 - Efeito da adição de água incorporada por meio do Polímero Superabsorvente (SAP) como agente de cura interna**

Neste item faz-se a análise dos três concretos de referência (REF 0,30; REF 0,345 e REF 0,367) e dos dois concretos com adição de água incorporada contendo o SAP como agente de cura interna, SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067).

A Figura 152 mostra os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral, em diversas idades, dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento básica (REF 0,30).

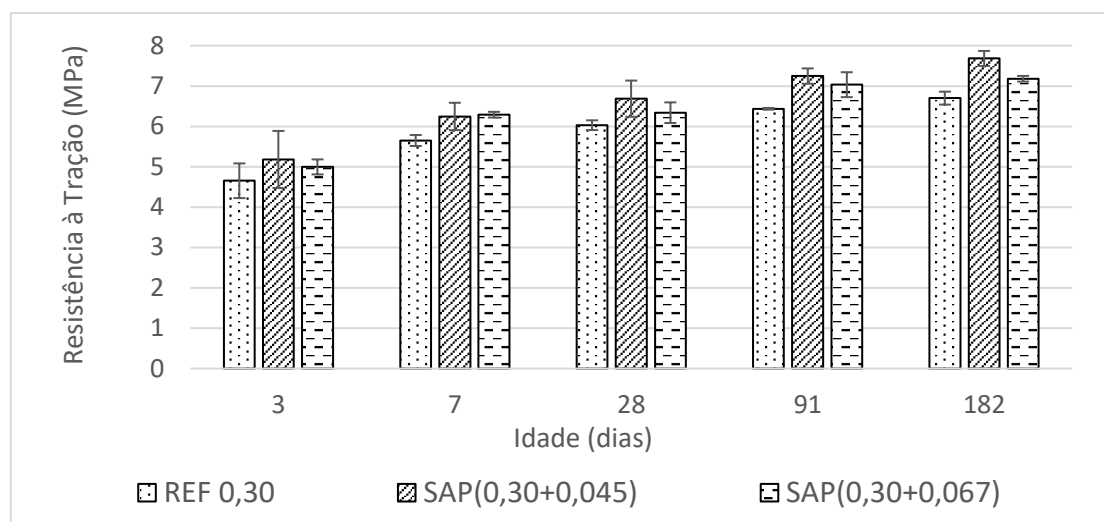


Figura 152 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral para concretos com e sem água de cura interna para uma relação água/cimento básica igual a 0,30

Observando a Figura 152 nota-se que, em todas as idades, houve um incremento da resistência à tração dos concretos contendo água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, em relação ao concreto de referência. Sendo que os maiores valores de resistências foram observados para o concreto SAP(0,30+0,045). A Tabela 43 mostra, em porcentagem, o que representou o incremento da resistência em cada idade.

Tabela 43 - Incremento da resistência à tração dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c básica ( $a/c_{básica} = 0,30$ )

Concreto	Resistência à tração (MPa) (Comportamento da resistência em relação ao concreto REF 0,30)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,30	4,65	5,65	6,03	6,44	6,70
SAP(0,30+0,045)	5,18 (↑11%)	6,25 (↑11%)	6,69 (↑11%)	7,25 (↑13%)	7,68 (↑15%)
SAP(0,30+0,067)	5,00 (↑8%)	6,29 (↑11%)	6,34 (↑5%)	7,03 (↑9%)	7,18 (↑7%)

Na Tabela 43 observa-se que o concreto SAP(0,30+0,045) teve um incremento na resistência à tração entre 11% e 15%, dependendo da idade do ensaio, enquanto o concreto SAP(0,30+0,067) apresentou um incremento que variou de 5% a 11%.

Considerando que a água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, mostrou-se uma variável significativa, como apresentado na Tabela 42, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO,

1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores associados ao teor de água incorporada, a condição de mesma relação água/cimento básica, diferem entre si. A conclusão foi que para a mesma relação água/cimento básica, a água incorporada forma dois grupos que diferem significativamente entre si, como é mostrado na Figura 153.

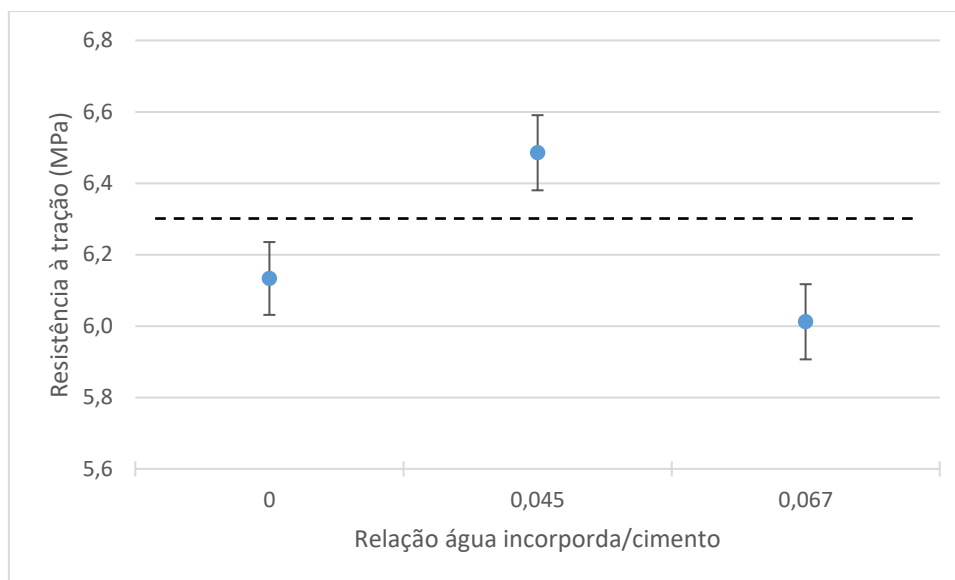


Figura 153 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à relação  $a_{inc}/c$  para concretos com a mesma relação  $a/c_{básica}$

Deve-se destacar que apesar da análise estatística apontar diferenças significativas entre os resultados, como mostrados na Figura 153, a diferença entre o maior e o menor valor médio é inferior a 0,5 MPa, não constituindo, portanto, diferenças significativas do ponto de vista tecnológico.

Na Figura 154 mostra os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral, em diversas idades, dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento total (REF 0,345 e REF 0,367).

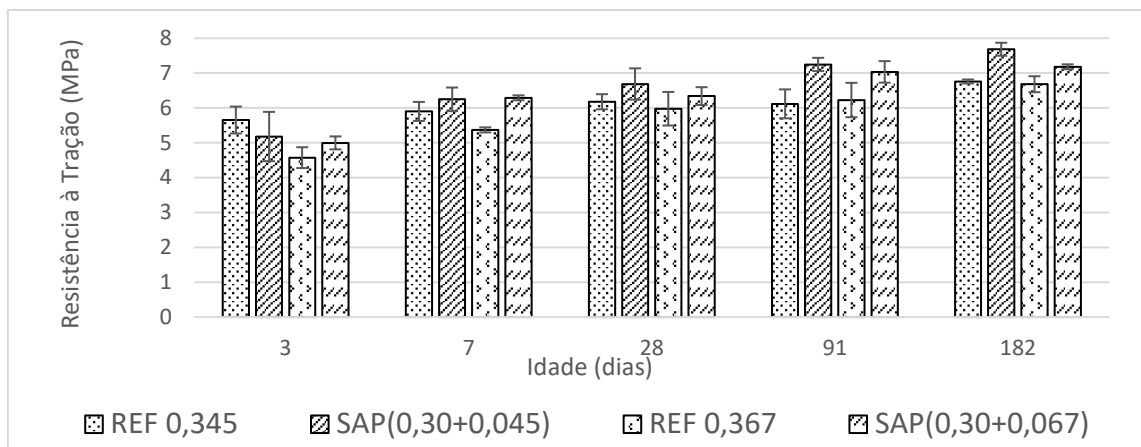


Figura 154 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral para concretos com e sem água de cura interna para a mesma relação água/cimento total

Observando a Figura 154 nota-se que, assim como no caso da comparação com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento básica, ocorre um incremento da resistência à tração dos concretos com água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna, em relação aos concretos de referência com a mesma relação água/cimento total. A exceção a essa tendência se deu aos 3 dias para o concreto SAP(0,30+0,045), que apresentou redução da resistência à tração em comparação ao concreto REF 0,345.

A Tabela 44 mostra o comportamento da resistência à tração dos concretos com água incorporada em relação às referências com a mesma relação água/cimento total.

Tabela 44 - Comportamento da resistência à tração dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c total

Concreto	Resistência à tração (MPa) (Comportamento da resistência em relação ao concreto referência com a mesma relação a/c total)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,345	5,65	5,90	6,18	6,12	6,76
SAP(0,30+0,045)	5,18 (↓8%)	6,25 (↑6%)	6,69 (↑8%)	7,25 (↑18%)	7,68 (↑14%)
REF 0,367	4,57	5,37	5,98	6,23	6,68
SAP(0,30+0,067)	5,00 (↑9%)	6,29 (↑17%)	6,34 (↑6%)	7,03 (↑13%)	7,18 (↑7%)

Nota-se na Tabela 44 que, independente do teor, a água incorporada por meio de SAP como agente de cura interna, representou um incremento na resistência à tração que variou entre 6% e 18%, em comparação ao concreto de referência com a mesma relação água/cimento total. Apenas na idade de três dias nota-se uma redução de 8% da resistência à tração do concreto SAP(0,30+0,045) em comparação com o concreto REF 0,345. Acredita-se que esta redução de resistência está dentro da variabilidade do ensaio.

Lam e Hooton (2005) já haviam observado em seus estudos um incremento de até 30% na resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, de misturas de concreto com relação água/cimento igual a 0,35 e teor de polímero de 0,6%, quando comparado com a mistura de referência com a mesma relação água/cimento básica ( $a/c_{básica} = 0,35$ ). A resistência à tração depende fortemente da existência de microfissuras, que podem provocar a formação de microfissuras sob tensão de tração. Para explicar o aumento da resistência à tração das misturas contendo polímero superabsorvente, acredita-se que o polímero, além de mitigar a retração autógena, também tem êxito na eliminação de microfissuras na estrutura interna do material (KOVLER, 2012).

Para verificar se o teor de água incorporada realmente exercia influência sobre a resistência à tração por compressão diametral, para o caso de concretos com a mesma relação  $a/c_{total}$ , realizou-se uma análise de variância (ANOVA).

Na Tabela 45 e na Tabela 46 são mostrados os resultados da análise de variância para concretos com a mesma relação água/cimento total, respectivamente para relação  $a/c_{total}$  0,345 e 0,367.

Tabela 45 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à tração, para concretos com a mesma relação  $a/c_{total} = 0,345$

$R^2_{mod} = 0,8181$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Água incorporada (A)	1	2,823	2,823	16,984	4,41	Sim
Idade (B)	4	8,652	2,163	13,014	2,93	Sim
AB	4	1,982	0,495	2,981	2,93	Sim
Erro	18	2,991	0,166			
Total	27					



Tabela 46 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada e idade sobre a resistência à tração, para concretos com a mesma relação  $a/c_{total} = 0,367$

$R^2_{mod} = 0,8816$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Água incorporada (A)	1	2,078	2,078	15,180	4,41	Sim
Idade (B)	4	15,946	3,986	29,125	2,93	Sim
AB	4	0,329	0,082	0,602	2,93	Não
Erro	18	2,464	0,137			
Total	27					

Observado os resultados apresentados na Tabela 45 e na Tabela 46, nota-se que 81% e 88%, respectivamente, da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{mod} = 0,8181$  e  $0,8816$ . Verificando a coluna dos valores de F, nota-se ainda que, para os dois valores de relação água/cimento total, as duas variáveis fixas (água incorporada e idade) exercem um efeito significativo na resistência à tração. A variável água incorporada se apresentou como o efeito mais importante no caso da relação água/cimento total 0,345. Para o caso da relação água/cimento total 0,367 a variável idade foi o efeito mais significativo ( $F=29,12$ ). A interação das variáveis foi significativa somente para a condição de relação água/cimento total 0,345.

Considerando que o teor de água incorporada, por meio da adição de SAP como agente de cura interna, mostrou-se uma variável significativa, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores de resistência à tração por compressão diametral, associados ao teor de água incorporada para concretos com a mesma relação  $a/c_{total}$  diferem entre si. A conclusão foi que para a mesma relação água/cimento total, o teor de água incorporada, em ambos teores avaliados, forma dois grupos que diferem significativamente, como mostrado na Figura 155.

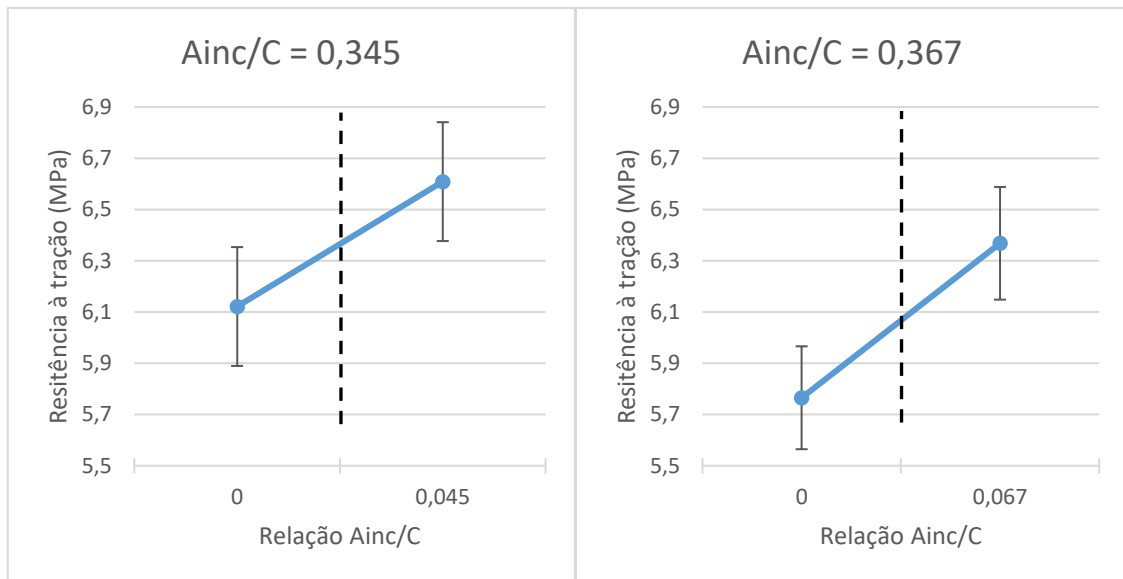


Figura 155 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à relação  $a_{inc}/c$  para concretos com a mesma relação  $a/c_{total}$

Apesar da análise estatística apontar diferenças significativas entre os resultados mostrados na Figura 155, a diferença entre o maior e o menor valor médio é 0,6 MPa, não constituindo, portanto, diferenças significativas do ponto de vista tecnológico.

#### 4.2.5.2 - Efeito da adição de nanossílica

Neste item faz-se a análise e discussão do comportamento da resistência à tração dos dois concretos com adição de nanossílica, em relação ao concreto REF 0,30.

A Figura 156 mostra os resultados médios de resistência à tração, em diversas idades, dos concretos 0,30 1NS e 0,30 2NS em comparação com o concreto de referência REF 0,30.

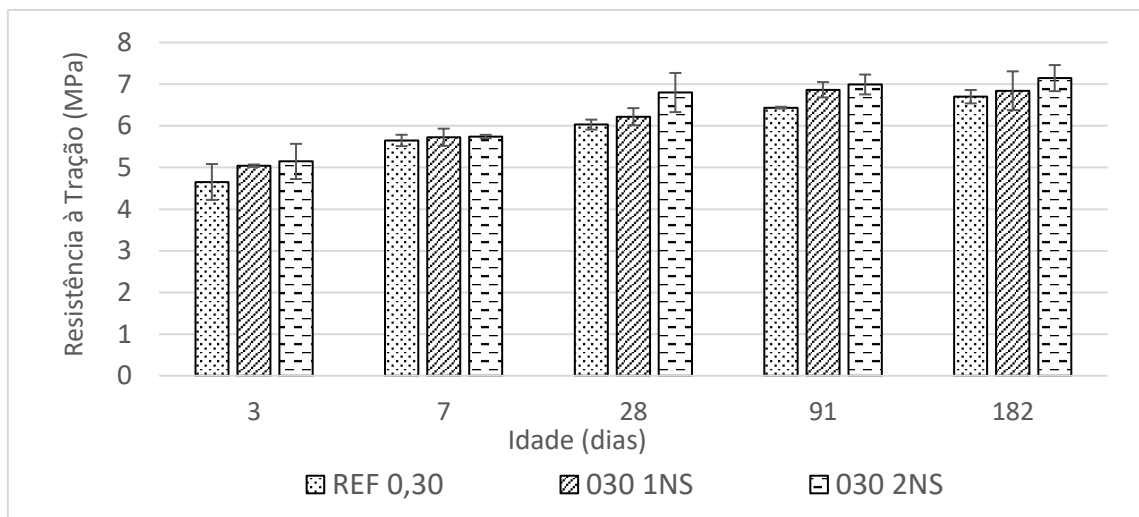


Figura 156 - Resultados de resistência à tração para concretos com adição de nanossílica em comparação com o concreto REF 0,30

Observando a Figura 156 nota-se um pequeno incremento da resistência à tração por compressão diametral com a adição de nanossílica, em relação ao concreto de referência. A Tabela 47 mostra o comportamento da resistência à tração dos concretos com adição de nanossílica, em relação ao concreto de referência.

Tabela 47 - Comportamento da resistência à tração dos concretos com adição de nanossílica em relação ao concreto de referência REF 0,30

Concreto	Resistência à tração (MPa) (Comportamento de resistência em relação ao concreto REF 0,30)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,30	4,65	5,65	6,03	6,44	6,70
0,30 1NS	5,04 (↑8%)	5,73 (↑1,5%)	6,22 (↑3%)	6,87 (↑7%)	6,84 (↑2%)
0,30 2NS	5,15 (↑11%)	5,74 (↑1,5%)	6,80 (↑13%)	6,99 (↑8%)	7,15 (↑7%)

Nota-se que a adição de 1% de nanossílica resultou em um acréscimo na resistência à tração que variou de 1% a 8%, enquanto que a adição de 2% de nanossílica representou um incremento de 1% a 13% na resistência à tração. Rao et al. (2015) e Santos (2016) também observaram um aumento na resistência à tração em argamassas de alta resistência com adição de nanossílica. No entanto, os pesquisadores citados avaliaram a resistência à tração na flexão.

As maiores resistências à tração proporcionado pela nanossílica ocorre devido à aceleração da hidratação e a formação de grandes quantidades de C-S-H. Além disso, as

nano partículas se acumulam nos poros disponíveis, formando uma estrutura mais compacta. Outra razão para este comportamento é o fato da nanossílica comportar-se não só como material de enchimento para melhorar a microestrutura, mas também como um ativador para promover as reações pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio e levando a uma maior precipitação dos produtos hidratados, tornando a microestrutura homogênea, densa e compacta.

Considerando que a adição de nanossílica se mostrou uma variável significativa, como apresentado na Tabela 42, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores associados ao teor de nanossílica diferem entre si. A conclusão foi que os três teores de adição de nanossílica estudados formam dois grupos que diferem significativamente entre si, como é mostrado na Figura 157.

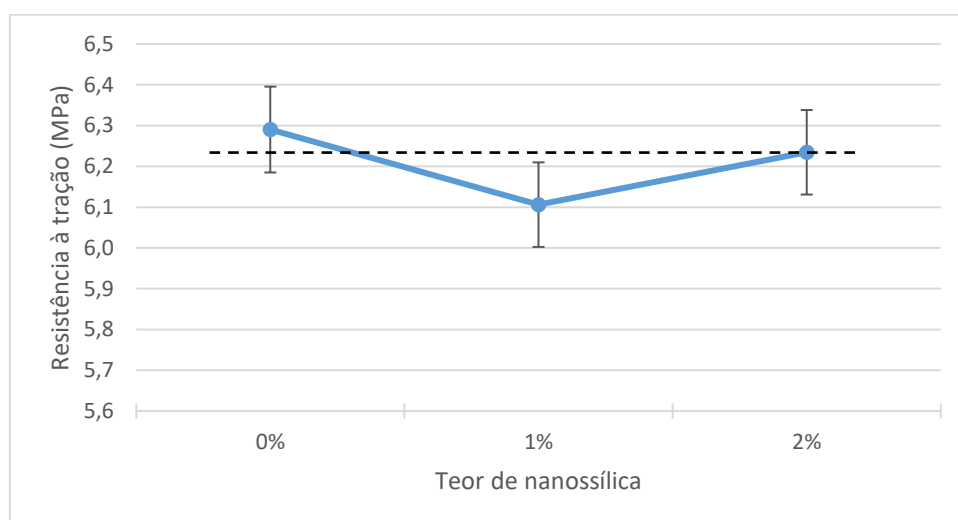


Figura 157 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à adição de nanossílica para concretos com a mesma relação a/C<sub>básica</sub>

Nota-se o teor de adição de nanossílica igual a 2% pode estar associado tanto ao concreto sem adição de nanossílica como ao concreto com adição de 1% de nanossílica.

A análise estatística aponta diferenças significativas entre os resultados, como mostrados na Figura 157. No entanto, a diferença entre o maior e o menor valor médio é inferior a 0,2 MPa, não constituindo, portanto, diferenças significativas do ponto de vista tecnológico.

### 4.2.5.3 - Efeito combinado da nanossílica e do polímero superabsorvente sobre a resistência à tração

Neste item serão analisados os resultados de resistência à tração das misturas híbridas contendo adição de nanossílica e água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna. Na Figura 158 são mostrados os resultados médios da resistência à tração combinando as variáveis analisadas.

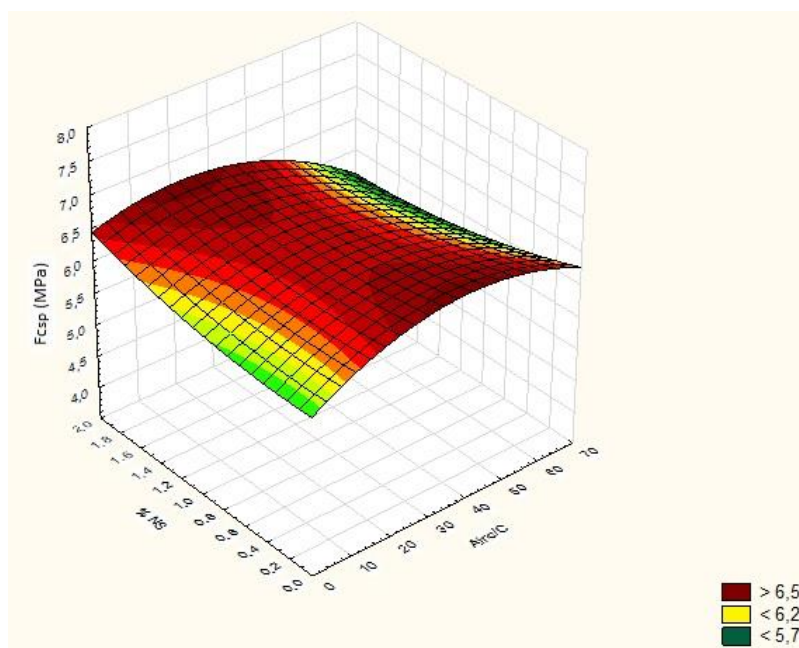


Figura 158 - Influência da ação combinada da adição de nanossílica e teor de água incorporada por meio de SAP na resistência à tração por compressão diametral dos concretos

Observando a Figura 158 é possível verificar, de uma maneira geral, que a resistência à tração por compressão diametral dos concretos cresce com o aumento do teor de nanossílica e em relação ao teor de água incorporada, apresenta maiores valores com água incorporada igual a 0,045. Nota-se que as maiores resistências foram observadas para esse valor de água incorporada sem adição de nanossílica e quando combinada com 2% de adição de nanossílica.

A Figura 159 mostra os resultados médios de resistência à tração das misturas híbridas em comparação com os concretos de mesma relação  $a/c_{total}$ .

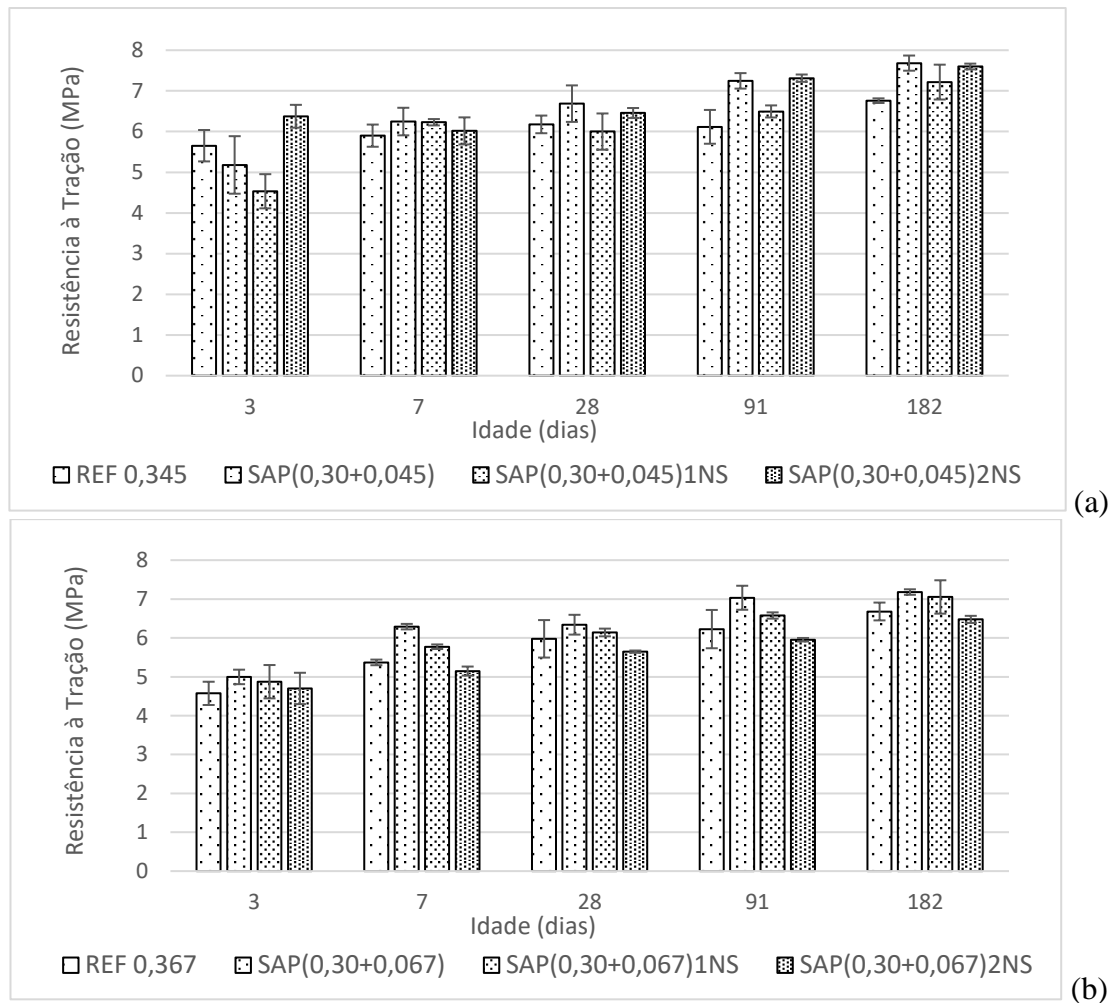


Figura 159 - Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral das misturas híbridas em comparação com os concretos de mesma relação  $a/c_{total} = 0,345$  (a) e de mesma relação  $a/c_{total} = 0,367$  (b)

Observando a Figura 159 (a) nota-se que o concreto SAP(0,30+0,045)1NS apresentou valores de resistência menores do que o concreto SAP(0,30+0,045), porém maiores do que os valores do concreto de referência (REF 0,345). Já o concreto SAP(0,30+0,045)2NS apresentou valores de resistência maiores do que o concreto de referência e semelhantes ao concreto SAP(0,30+0,045). A exceção a essas observações se dá na idade de 3 dias, quando o concreto SAP(0,30+0,045)2NS apresenta o maior valor de resistência e o concreto SAP(0,30+0,045)1NS apresentou o menor valor.

Por outro lado, ao observar a Figura 159 (b) nota-se uma tendência de redução da resistência à tração das misturas híbridas em relação à mistura apenas com água incorporada SAP(0,30+0,067). O concreto SAP(0,30+0,067)1NS apresenta valores de resistência à tração ligeiramente superiores à mistura de referência (REF 0,367), enquanto

o concreto SAP(0,30+0,067)2NS apresenta valores semelhantes à mistura de referência ou levemente menores.

A Tabela 48 mostra o comportamento da resistência à tração por compressão diametral dos concretos com adição combinada de nanossílica e SAP, em relação ao concreto contendo apenas SAP.

Tabela 48 - Comportamento da resistência à tração dos concretos com adição de de nanossílica e SAP, em relação ao concreto com SAP e mesma relação  $a/c_{total}$

Concreto	Resistência à tração (MPa) (Comportamento de resistência em relação ao concreto com água incorporada e mesma relação $a/c_{total}$ )				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
SAP (0,30+0,045)	5,18	6,25	6,69	7,25	7,68
SAP (0,30+0,045)1NS	4,53 (↓12%)	6,23 (0%)	6,00 (↓10%)	6,50 (↓10%)	7,22 (↓6%)
SAP (0,30+0,045)2NS	6,38 (↑23%)	6,02 (↓4%)	6,46 (↓3%)	7,31 (↑1%)	7,60 (↓1%)
SAP(0,30+0,067)	5,00	6,29	6,34	7,03	7,18
SAP(0,30+0,067)1NS	4,87 (↓3%)	5,77 (↓8%)	6,14 (↓3%)	6,58 (↓6%)	7,05 (↓2%)
SAP(0,30+0,067)2NS	4,70 (↓6%)	5,15 (↓18%)	5,65 (↓11%)	5,95 (↓15%)	6,48 (↓10%)

Nota-se que em praticamente todas as situações os concretos com mistura híbrida de SAP e nanossílica apresentaram queda na resistência à tração em relação aos concretos com a mesma relação  $a/c_{total}$ .

Considerando que a análise de variância mostrou que a interação entre as variáveis teor de água incorporada e adição de nanossílica apresentou-se como sendo significativa, como mostrado na Tabela 42, realizou-se a comparação múltiplas de médias por meio do método do Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de concretos diferem entre si.

Na Figura 160 é mostrado o resultado da variação múltiplas de médias dos concretos para resistência à tração, associada à interação das variáveis teor de água incorporada e adição de nanossílica.

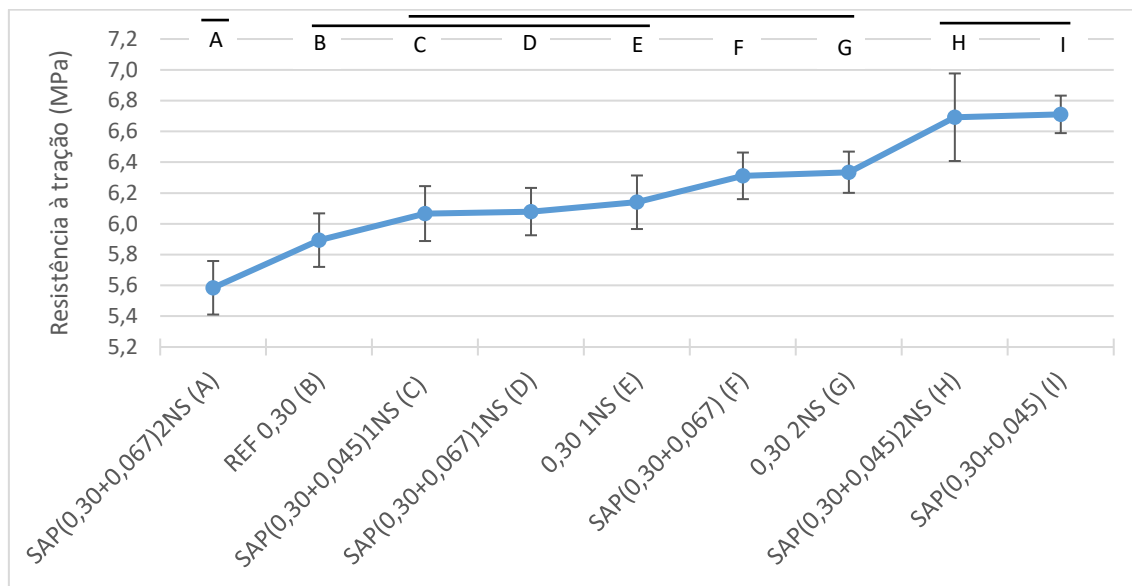


Figura 160 - Variação múltiplas de médias dos concretos para resistência à tração, associada ao teor de água incorporada e adição de nanossílica

Nota-se que a adição de 2% de nanossílica combinada com teor de água incorporada igual a 0,045 apresenta um bom desempenho relacionado com a resistência à tração por compressão diametral. No entanto, em função do número reduzido de corpos de prova ensaiado por idade e, também, em razão da dispersão dos resultados individuais, para concluir o comportamento da resistência à tração por compressão diametral das misturas com SAP e nanossílica, faz-se necessário maior amostragem de ensaios.

#### 4.2.6 – Módulo de deformação

A Tabela 49 mostra os resultados de módulo de deformação dos concretos estudados nas idades de 3, 7, 28, 91 e 182 dias. Os resultados são a média de pelo menos dois corpos de prova e os valores de desvio padrão obtidos indicam que não houve grande dispersão dos dados individuais. Os resultados individuais encontram-se no Apêndice B.10.



Tabela 49 - Resultados médios de módulo de deformação

Concreto	Módulo de deformação (GPa)									
	3 dias		7 dias		28 dias		91 dias		182 dias	
	Ec	Des Pad.	Ec	Des Pad.	Ec	Des Pad.	Ec	Des Pad.	Ec	Des Pad.
REF 0,30	33,00	0,45	36,43	0,53	36,20	0,65	38,45	0,15	37,53	0,69
REF 0,345	32,83	0,21	34,30	0,85	36,23	0,60	37,33	0,70	36,13	0,39
REF 0,367	32,00	0,42	34,93	1,28	36,70	0,41	37,40	0,16	36,73	0,97
SAP(0,30+0,045)	30,27	0,17	33,13	0,46	35,17	0,26	36,97	0,17	36,70	0,94
SAP(0,30+0,067)	28,20	0,75	31,10	0,08	32,63	1,10	33,47	0,88	34,13	0,09
0,30 1NS	34,57	0,71	36,70	1,02	38,03	0,66	38,00	0,73	38,37	0,29
0,30 2NS	35,17	0,70	36,93	0,95	37,20	0,24	39,67	1,31	38,97	0,37
SAP(0,30+0,045) 1NS	31,13	0,50	31,57	0,65	34,10	0,22	36,70	0,94	34,97	0,50
SAP(0,30+0,045) 2NS	31,07	0,49	33,40	0,51	38,62	1,40	37,17	0,87	36,90	1,10
SAP(0,30+0,067) 1NS	29,20	0,86	32,17	1,25	33,33	0,48	33,07	0,92	32,77	0,05
SAP(0,30+0,067) 2NS	29,40	0,29	29,73	0,68	31,00	0,75	32,93	0,69	32,93	0,41

Para verificar se as variáveis estabelecidas nesse trabalho realmente exerciam influência sobre o módulo de deformação dos concretos, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). O uso da análise de variância na comparação de grupos está baseado na relação da variabilidade dos resultados dentro dos grupos e da variabilidade das médias entre os grupos, e na distribuição de Fischer (F), como nível de significância  $\alpha$  (GOMES, 1982; NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Todos os testes estatísticos foram feitos adotando um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ) e utilizando-se o programa *Statistica 10.0*<sup>®</sup>.

Na Tabela 50 são mostrados os resultados da análise de variância para verificar a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre o módulo de deformação, para as misturas de concreto com a mesma relação água/cimento básica ( $a/c_{\text{básica}} = 0,30$ ).

Tabela 50 - Análise de Variância verificando a influência do teor de água incorporada, adição de nanossílica e idade sobre o módulo de deformação, para concretos com relação  $a/c_{básica} = 0,30$

$R^2_{mod} = 0,9454$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Água incorporada (A)	2	611,8	305,9	409,9	3,10	Sim
Teor de nanossílica (B)	2	3,2	1,6	2,1	3,10	Não
Idade (C)	4	437,2	109,3	146,5	2,47	Sim
AB	4	28,0	7,0	9,4	2,47	Sim
AC	8	22,4	2,8	3,8	2,04	Sim
BC	8	14,0	1,8	2,3	2,04	Sim
ABC	16	21,2	1,3	1,8	1,76	Sim
Erro	88	65,7	0,7			
Total	127					

Observado os resultados mostrados na Tabela 50 nota-se que 94% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{mod} = 0,9454$ . A coluna dos valores de F mostra ainda que das três variáveis fixas consideradas nesta análise (água incorporada, adição de nanossílica e idade) somente a adição de nanossílica não exerce um efeito significativo no módulo de deformação. A variável água incorporada apresentou-se como o efeito mais importante, com o maior valor de F (409,9) dentre todos. Em relação a interação das variáveis, todas se mostraram significativas apesar dos baixos valores de F.

A Tabela 51 e a Tabela 52 mostram resultados da análise de variância do módulo de deformação para misturas de concretos com a mesma relação água/cimento total, respectivamente para relação  $a/c_{total}$  0,345 e 0,367. Buscou-se verificar a influência da água incorporada e idade em misturas com a mesma relação água/cimento total sem a adição de nanossílica.

Tabela 51 - Análise de Variância verificando a influência da água incorporada e idade sobre o módulo de deformação, para concretos com a mesma relação  $a/c_{total} = 0,345$

$R^2_{mod} = 0,9387$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Água incorporada (A)	1	6,35	6,35	14,09	4,35	Sim
Idade (B)	4	123,75	30,94	68,65	2,87	Sim
AB	4	7,97	1,99	4,42	2,87	Sim
Erro	20	9,01	0,45			
Total	29					

Tabela 52 - Análise de Variância verificando a influência da água incorporada e idade sobre o módulo de deformação, para concretos com a mesma relação a/c total = 0,367

R <sup>2</sup> <sub>mod</sub> = 0,9310						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	F <sub>0,05</sub>	Significância
Água incorporada (A)	1	99,74	99,74	120,21	4,35	Sim
Idade (B)	4	122,19	30,55	36,82	2,87	Sim
AB	4	2,12	0,53	0,64	2,87	Não
Erro	20	16,59	0,83			
Total	29					

Observado os resultados mostrados na Tabela 51 e na Tabela 52, nota-se que 93% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{mod} = 0,9387$  e  $0,9310$ , respectivamente. Verificando a coluna dos valores de F, nota-se ainda que, para os dois valores de relação água/cimento total, as duas variáveis fixas (água incorporada e idade) exercem um efeito significativo sobre o módulo de deformação dos concretos. A variável idade se apresentou como o efeito mais importante ( $F=68,65$ ) no caso da relação água/cimento total 0,345. Para o caso da relação água/cimento total 0,367 a variável água incorporada foi o efeito mais significativo ( $F=120,21$ ). A interação entre as variáveis foi significativa somente para a condição de relação água/cimento total 0,345.

Em resumo, as variáveis teor de água incorporada e idade apresentaram-se como efeitos significativos sobre o módulo de deformação dos concretos estudados, enquanto que a adição de nanossílica não se mostrou como um efeito significativo. Buscando uma melhor interpretação e discussão dos resultados, apresenta-se a seguir uma análise dividida em duas etapas: a) avaliação da adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna e b) o efeito combinado da adição do SAP e da nanossílica.

#### **4.2.6.1 - Efeito da adição de água incorporada por meio do Polímero Superabsorvente (SAP) como agente de cura interna**

A Figura 161 mostra os resultados médios de módulo de deformação, em diversas idades, dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento básica (REF 0,30).

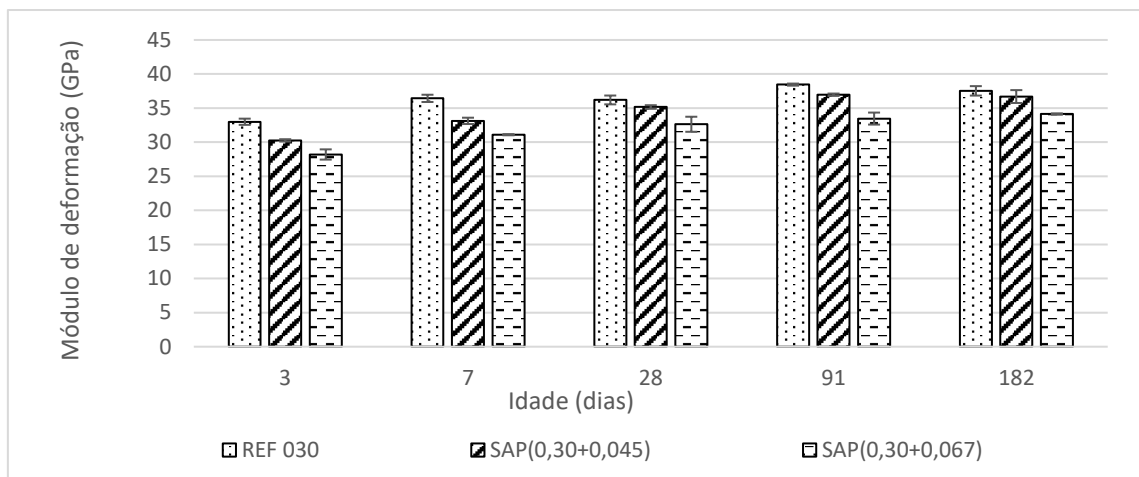


Figura 161 - Resultados de módulo de deformação para concretos com e sem água de cura interna para uma relação água/cimento básica igual a 0,30

Observando a Figura 161 nota-se uma tendência de redução do valor do módulo de deformação dos concretos com o aumento da água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna. A Tabela 53 mostra, em porcentagem, o que representou a queda do módulo de deformação em cada idade.

Tabela 53 – Redução do módulo de deformação dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c básica ( $a/c_{básica} = 0,30$ )

Concreto	Módulo de deformação (GPa) (Comportamento da resistência em relação ao concreto REF 0,30)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,30	33,00	36,43	36,20	38,45	37,53
SAP(0,30+0,045)	30,27 (↓8%)	33,13 (↓9%)	35,17 (↓3%)	36,97 (↓4%)	36,70 (↓2%)
SAP(0,30+0,067)	28,20 (↓14%)	31,10 (↓15%)	32,63 (↓10%)	33,47 (↓13%)	34,13 (↓9%)

Na Tabela 53 observa-se que o concreto SAP(0,30+0,045) teve uma redução no módulo de deformação entre 2% e 9%, dependendo da idade do ensaio, enquanto o concreto SAP(0,30+0,067) apresentou uma redução que variou de 9% a 15%.

A Figura 162 mostra os resultados médios do módulo de deformação, em diversas idades, dos concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067) em comparação com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento total (REF 0,345 e REF 0,367).

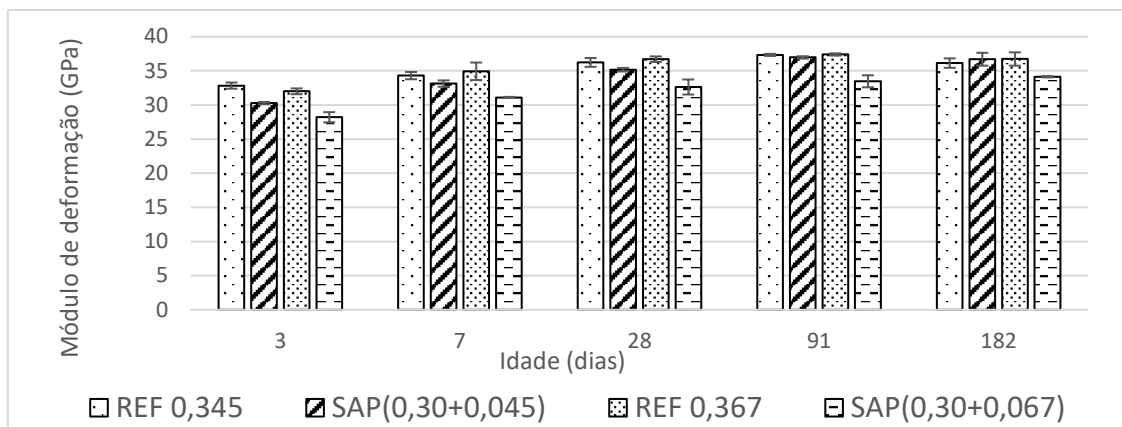


Figura 162 - Resultados de módulo de deformação para concretos com e sem água de cura interna para a mesma relação água/cimento total

Observando a Figura 162 nota-se que, assim como no caso da comparação com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento básica, ocorre uma redução do módulo de deformação dos concretos com água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna, em relação aos concretos de referência com a mesma relação água/cimento total. A exceção a essa tendência se deu aos 182 dias para o concreto SAP(0,30+0,045), que apresentou resultado semelhante de módulo de deformação em comparação ao concreto REF 0,345.

A Tabela 54 mostra, em porcentagem, o comportamento do módulo de deformação dos concretos com água incorporada em relação às referências com a mesma relação água/cimento total.

Tabela 54 - Comportamento do módulo de deformação dos concretos com SAP em relação ao concreto de referência com a mesma relação a/c total

Concreto	Módulo de deformação (GPa)				
	(Comportamento da resistência em relação ao concreto referência com a mesma relação a/c total)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,345	32,83	34,30	36,23	37,33	36,13
SAP(0,30+0,045)	30,27 (↓8%)	33,13 (↓3%)	35,17 (↓3%)	36,97 (↓2%)	36,70 (↑2%)
REF 0,367	32,00	34,93	36,70	37,40	36,73
SAP(0,30+0,067)	28,20 (↓12%)	31,10 (↓11%)	32,63 (↓11%)	33,47 (↓10%)	34,13 (↓7%)

Nota-se na Tabela 54 que para o teor de água incorporada igual a 0,045 a redução do módulo de deformação variou entre 2 e 8%, em comparação ao concreto de referência com a mesma relação água/cimento total. Para o teor de água incorporada igual a 0,067 essa variação foi de 7 a 12%. Apenas na idade de 182 dias nota-se um incremento de 2% no módulo de deformação do concreto SAP(0,30+0,045) em comparação com o concreto REF 0,345. Acredita-se que este pequeno aumento no módulo de deformação está dentro da variabilidade do próprio ensaio.

Vários pesquisadores (DUDZIAK e MECHTECHERINE, 2008; SHEN et al., 2016; MANZANO, 2016) também notaram a redução do módulo de deformação com a adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna. Acredita-se que a redução no módulo de deformação desses concretos é causada pelos aumentos da porosidade da matriz cimentícia, provocado pelos vazios deixados pelo SAP e, também, pelo acréscimo do teor de ar aprisionado.

Considerando que a água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, mostrou-se uma variável significativa, tanto para concretos com a mesma relação água/cimento básica, como apresentado na Tabela 50, quanto para concretos com mesma relação água/cimento total, como mostrado na Tabela 51 e na Tabela 52, realizou-se uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores associados ao teor de água incorporada, tanto para a condição de mesma relação água/cimento básica como para mesma relação água/cimento total, diferem entre si. A conclusão foi que para a mesma relação água/cimento básica, a água incorporada forma três grupos que diferem significativamente entre si, como mostra a Figura 163, e que, para a mesma relação água/cimento total, a água incorporada, em ambos teores avaliados, forma dois grupos que diferem significativamente, como mostra a Figura 164.

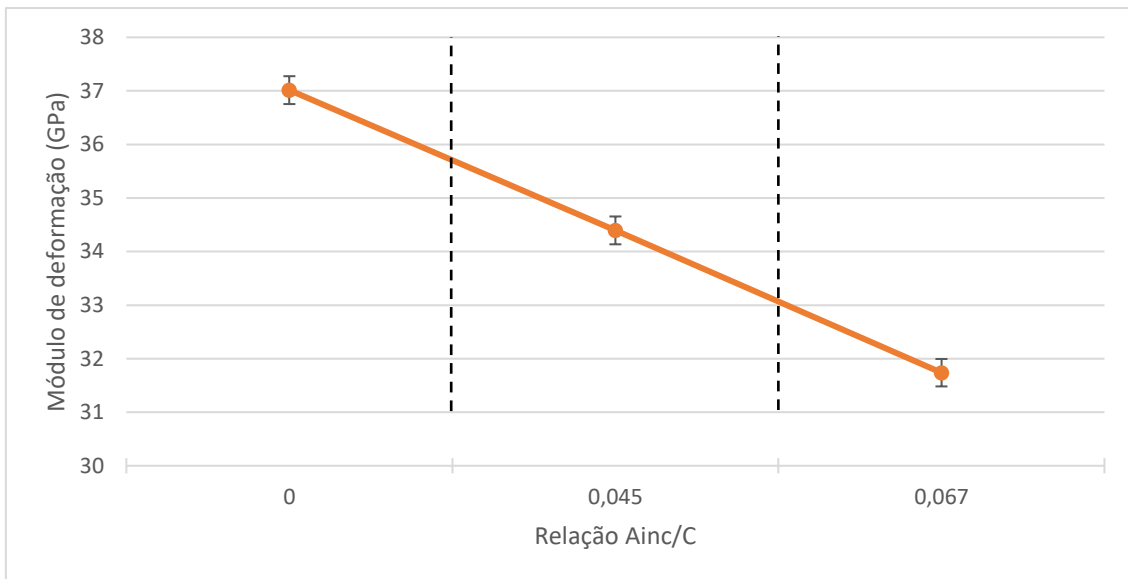


Figura 163 - Variação múltiplas de média para módulo de deformação, associada à relação Ainc/C para concretos com a mesma relação a/c básica

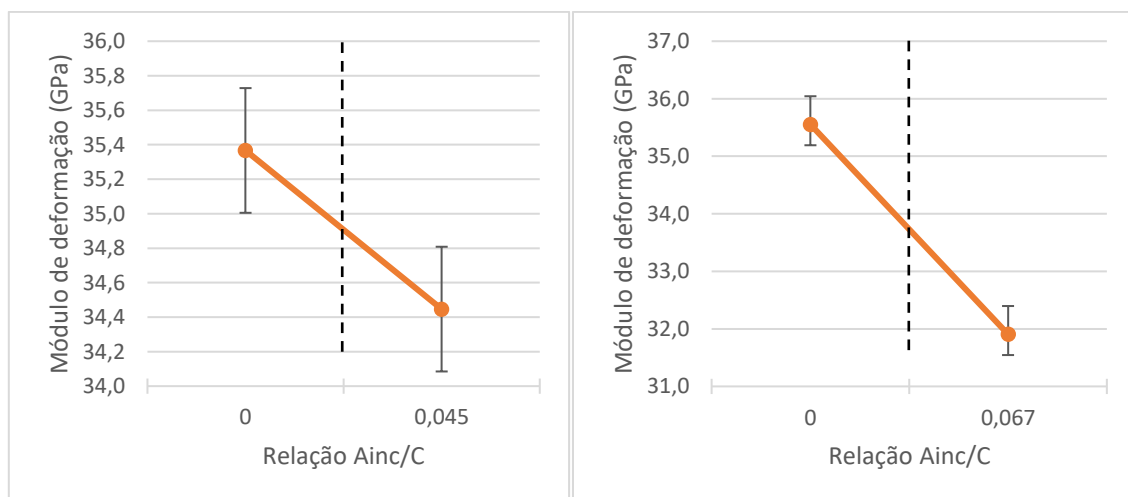


Figura 164 - Variação múltiplas de média para módulo de deformação, associada à relação Ainc/C para concretos com a mesma relação a/c total

#### 4.2.6.2 - Efeito da adição de nanossílica

Neste item faz-se a análise e discussão do comportamento do módulo de deformação dos dois concretos com adição de nanossílica, em relação ao concreto REF 0,30.

A Figura 165 mostra os resultados médios de módulo de deformação, em diversas idades, dos concretos 0,30 1NS e 0,30 2NS em comparação com o concreto de referência REF 0,30.

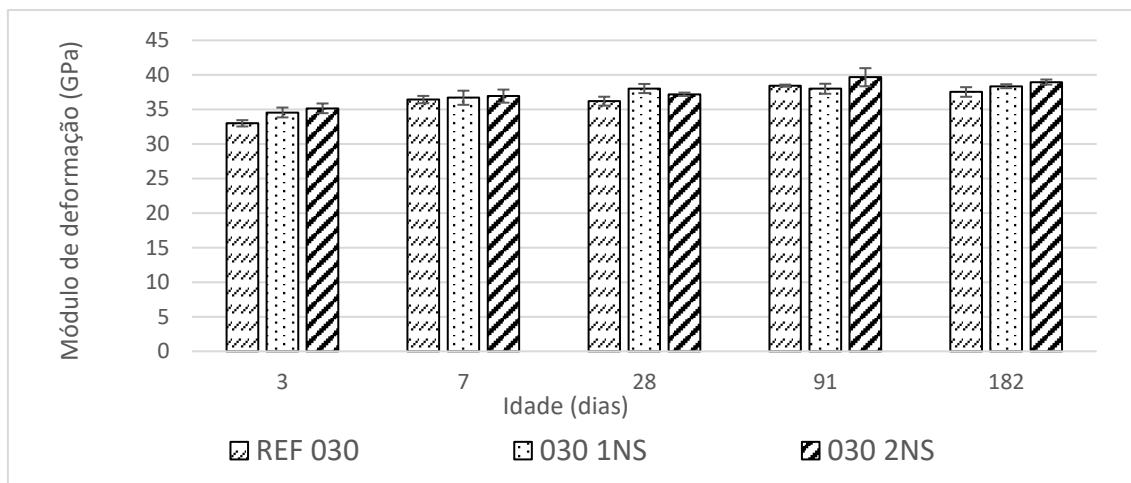


Figura 165 - Resultados de módulo de deformação para concretos com adição de nanossílica em comparação com o concreto REF 0,30

Observando a Figura 165 nota-se um pequeno incremento (1% a 7%) do módulo de deformação com a adição de nanossílica, em relação ao concreto de referência. A Tabela 55 mostra o comportamento do módulo de deformação dos concretos com adição de nanossílica, em relação ao concreto de referência.

Tabela 55 - Comportamento do módulo de deformação dos concretos com adição de nanossílica em relação ao concreto de referência REF 0,30

Concreto	Módulo de deformação (GPa) (Comportamento de resistência em relação ao concreto REF 0,30)				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
REF 0,30	33,00	36,43	36,20	38,45	37,53
0,30 1NS	34,57 (↑5%)	36,70 (↑1%)	38,03 (↑5%)	38,00 (↓1%)	38,37 (↑2%)
0,30 2NS	35,17 (↑7%)	36,93 (↑1%)	37,20 (↑3%)	39,67 (↑3%)	38,97 (↑4%)

Observando a Tabela 55 nota-se que, aos 28 dias de idade, o incremento no módulo de deformação variou de 3 a 5% quando da adição de nanossílica. Santos (2016) observou aumento da ordem de 12% no módulo de deformação de argamassas contendo nanossílica, enquanto Abreu et al. (2014) observaram aumento da ordem de 14% no módulo de deformação de concretos com adição de nanossílica em comparação ao concreto de referência. Acredita-se que a razão para este comportamento é o fato da nanossílica comportar-se não só como material de enchimento para melhorar a microestrutura, mas também como um ativador para promover as reações pozolânicas,



reagindo com o hidróxido de cálcio e levando a uma maior precipitação dos produtos hidratados, tornando a microestrutura homogênea, densa e compacta.

A adição de nanossílica mostrou-se uma variável não significativa como apresentado na Tabela 50. No entanto, ao fazer a análise de variância considerando apenas os concretos REF 0,30; 0,30 1NS e 0,30 2NS, a adição de nanossílica se mostrou uma variável significativa, como é mostrado na Tabela 56.

Tabela 56 - Análise de Variância verificando a influência da adição de nanossílica e idade sobre o módulo de deformação, concretos com e sem adição de nanossílica e relação  $a/c_{básica} = 0,30$

$R^2_{mod} = 0,8545$						
Efeito	GDL	SQ	MQ	F	$F_{0,05}$	Significância
Teor de nanossílica (A)	2	15,03	7,51	9,93	3,33	Sim
Idade (B)	4	105,90	26,47	34,99	2,70	Sim
AB	8	8,00	1,00	1,32	2,28	Não
Erro	29	21,95	0,76			
Total	43					

Observado os resultados mostrados na Tabela 56 nota-se que 85% da variação total dos dados é explicada pelo critério adotado, pois  $R^2_{mod} = 0,8545$ . A coluna dos valores de F mostra ainda que tanto a adição de nanossílica quanto a idade exercem um efeito significativo sobre o módulo de deformação na condição analisada. A variável idade apresentou-se como o efeito mais importante, com o maior valor de F (34,99). A interação entre as variáveis não se mostrou significativa.

Realizou-se então uma comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de valores de módulo de deformação, associados à adição de nanossílica, diferem entre si. A conclusão foi que para a adição de nanossílica forma dois grupos que diferem significativamente entre si, como mostra a Figura 166.

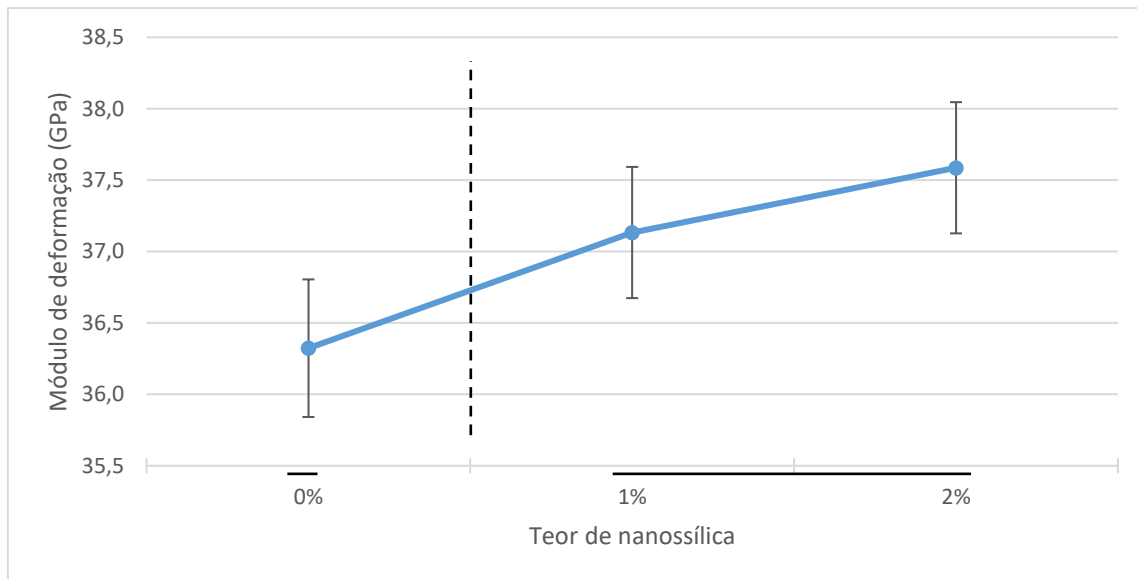


Figura 166 - Variação múltiplas de média para resistência à tração, associada à adição de nanossílica para concretos com a mesma relação a/c

Nota-se a tendência do incremento do módulo de deformação com o aumento do teor de adição de nanossílica. No entanto, os teores de 1% e 2% de adição de nanossílica não diferem significativamente entre si e se associam em um grupo, cujos os valores de módulo de deformação diferem significativamente do concreto sem adição de nanossílica.

#### 4.2.6.3 - Efeito combinado da nanossílica e do polímero superabsorvente sobre o módulo de deformação

Neste item são analisados os resultados de módulo de deformação das misturas híbridas contendo adição de nanossílica e água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna. Na Figura 167 são mostrados os resultados médios de módulo de deformação combinando as variáveis analisadas.

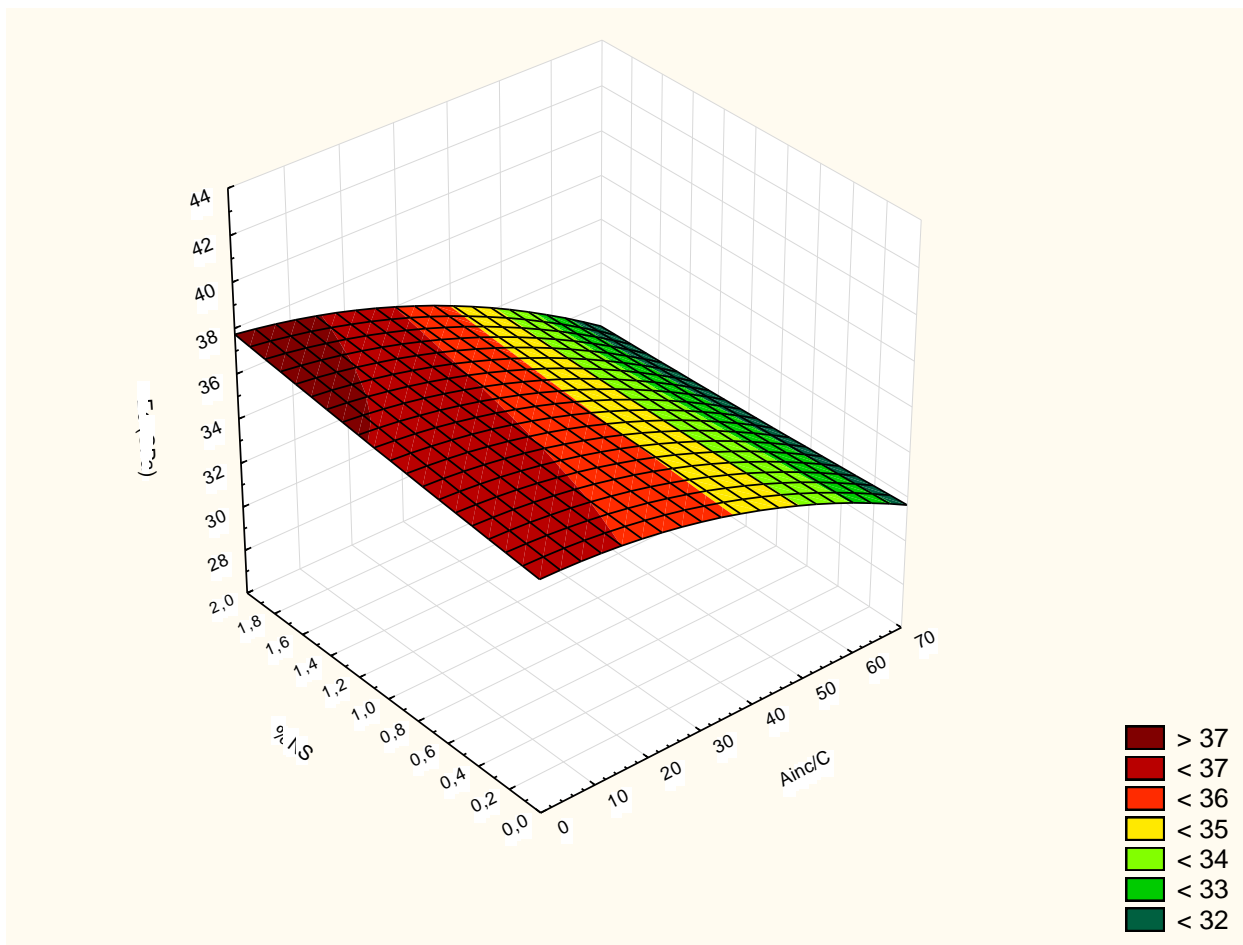


Figura 167 - Influência da ação combinada da adição de nanossílica e teor de água incorporada por meio de SAP no módulo de deformação dos concretos

Observando a Figura 167 é possível verificar, de uma maneira geral, que o módulo de deformação dos concretos cresce com o aumento do teor de nanossílica e diminui com o acréscimo de água incorporada, por meio de SAP como agente de cura interna. Nota-se que os maiores valores de módulo foram observados para a situação com 2% de adição de nanossílica e sem água incorporada, enquanto que os menores valores são observados nos mais altos teores de água incorporada.

A Figura 168 mostra os resultados médios de módulo de deformação das misturas híbridas em comparação com os concretos de mesma relação  $a/c_{total}$ .

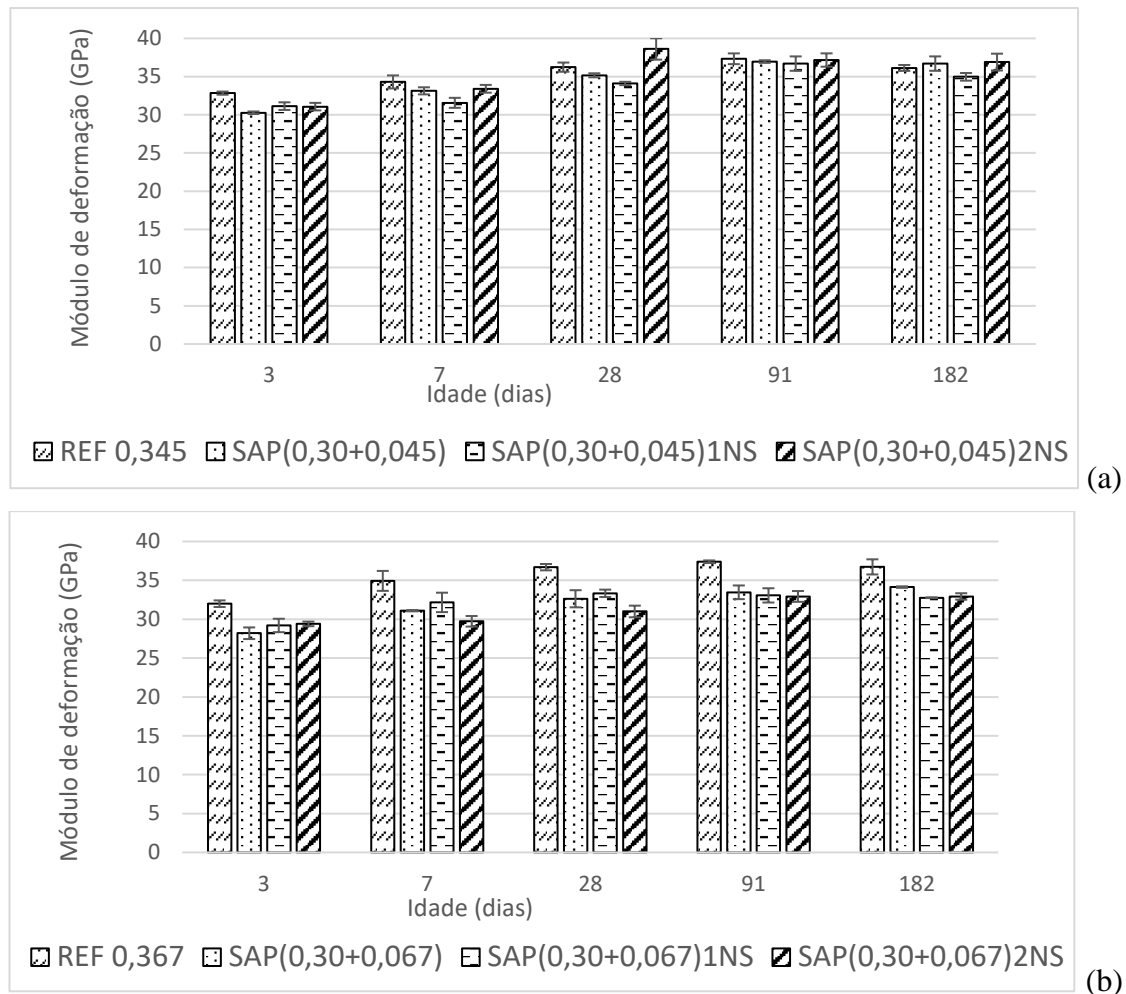


Figura 168 - Resultados médios de módulo de deformação das misturas híbridas em comparação com os concretos de mesma relação  $a/c_{total} = 0,345$  (a) e de mesma relação  $a/c_{total} = 0,367$  (b)

Observando a Figura 168 (a) nota-se que os resultados do módulo de deformação das misturas contendo SAP e nanossílica estão muito próximos das misturas de referência (REF 0,345) e da que contém apenas polímero (SAP(0,30+0,045)). Mostrando que a adição de nanossílica não foi capaz de compensar as reduções no valor do módulo causado pela água incorporada. Essa constatação é evidenciada na Figura 168 (b), onde observa-se os valores do módulo de deformação das misturas contendo SAP e nanossílica estão próximos daquela contendo apenas SAP (mistura SAP(0,30+0,067)), mas nitidamente abaixo da mistura de referência (REF 0,367).

A Tabela 57 mostra o comportamento do módulo de deformação dos concretos com adição combinada de nanossílica e SAP, em relação ao concreto contendo apenas SAP.

Tabela 57 - Comportamento do módulo de deformação dos concretos com adição de nanossílica e SAP, em relação ao concreto com SAP e mesma relação  $a/c_{total}$

Concreto	Módulo de deformação (GPa) (Comportamento do módulo de deformação em relação ao concreto com água incorporada e mesma relação $a/c_{total}$ )				
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
SAP (0,30+0,045)	30,27	33,13	35,17	36,97	36,70
SAP (0,30+0,045)1NS	31,13 (↑3%)	31,57 (↓5%)	34,10 (↓3%)	36,70 (↓1%)	34,97 (↓5%)
SAP (0,30+0,045)2NS	31,07 (↑3%)	33,40 (↑1%)	38,62 (↑10%)	37,17 (↑1%)	36,90 (1%)
SAP(0,30+0,067)	28,20	31,10	32,63	33,47	34,13
SAP(0,30+0,067)1NS	29,20 (↑4%)	32,17 (↑3%)	33,33 (↑2%)	33,07 (↓1%)	32,77 (↓4%)
SAP(0,30+0,067)2NS	29,40 (↑4%)	29,73 (↓4%)	31,00 (↓5%)	32,93 (↓2%)	32,93 (↓4%)

Considerando que a análise de variância mostrou que a interação entre as variáveis água incorporada e adição de nanossílica apresentou-se significativa, como mostrado na Tabela 50, realizou-se a comparação múltiplas de médias por meio do método de Duncan (NANNI e RIBEIRO, 1987; MONTGOMERY e RUNGER, 2003), para se determinar se e quais grupos de concretos diferem entre si.

Na Figura 169 é mostrado o resultado da variação múltiplas de médias dos concretos para módulo de deformação, associada à interação das variáveis teor de água incorporada e adição de nanossílica.

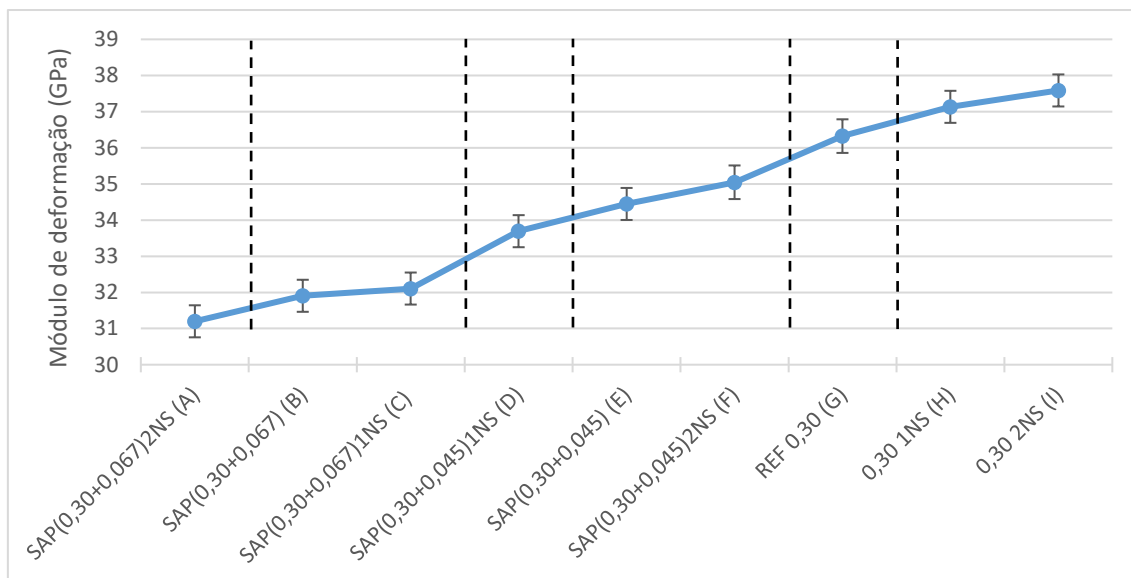


Figura 169 - Variação múltiplas de médias dos concretos para módulo de deformação, associada ao teor de água incorporada e adição de nanossílica

A variação múltipla de médias mostrada na Figura 169 confirma a tendência da adição de nanossílica aumentar o módulo de deformação e da adição do teor de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna, em reduzir o módulo de deformação. Duas adições de efeitos contrários que, quando combinadas, apresentam um comportamento que depende do teor de água incorporada.

Paras misturas com maior teor de água incorporada (0,067) os teores de nanossílica estudados não apresentaram poder para compensar a redução no módulo de deformação. Por outro lado, para o teor de água incorporada igual a 0,045 combinado com 2% de nanossílica, o valor do módulo de deformação está relativamente próximo do concreto de referência (REF 0,30) mostrando que para esse teor de água incorporada, a adição de nanossílica tem potencial para compensar a redução provocada pela adição do SAP.

#### 4.2.7 – Fluência Básica

A fluência básica foi retratada por meio do coeficiente de fluência, que é a relação entre a deformação por fluência e a deformação elástica inicial. O coeficiente de fluência, por sua vez, foi obtido a partir do ajuste dos resultados dos ensaios, em cada idade de aplicação de carga, ao modelo proposto pelo ACI 209.2R (ACI, 2008) como mostra a equação (22).

$$J_{(t,t_0)} = J_0(1 + \phi_{(t,t_0)}) \quad (22)$$

Onde,  $J_{(t,t_0)}$  é a função de fluência que representa a deformação total por fluência na idade  $t$ , devido ao carregamento na idade  $t_0$ ;  $J_0$  é a deformação elástica inicial na idade do carregamento e  $\phi_{(t,t_0)}$  é o coeficiente de fluência.

O ACI 209.2R (ACI, 2008) propõe o modelo apresentado na equação (23) para calcular o coeficiente de fluência.

$$\phi_{(t,t_0)} = \phi_u \left( \frac{(t-t_0)^\psi}{d+(t-t_0)^\psi} \right) \quad (23)$$

Onde,  $\phi_{(t,t_0)}$  é o coeficiente de fluência na idade  $t$ , devido ao carregamento na idade  $t_0$ ;  $d$  (em dias) e  $\psi$  são constantes;  $(t-t_0)$  é o tempo desde a aplicação da carga, e  $\phi_u$  é o coeficiente de fluência último.

Na Figura 170 são mostrados, para o concreto REF 0,30, os resultados de ensaio e as curvas de ajuste da fluência obtidas segundo o modelo proposto pelo ACI 209.2R (ACI, 2008), nas três idades de carregamento estudadas. Observa-se um bom ajuste do modelo do ACI 209.2R aos resultados dos ensaios e, como esperado, nota-se a diminuição da fluência com a aplicação da carga acontecendo em idades maiores. Esse comportamento foi semelhante nos demais concretos. Os resultados e as curvas de ajuste de todos os concretos são mostrados no Apêndice B.11.

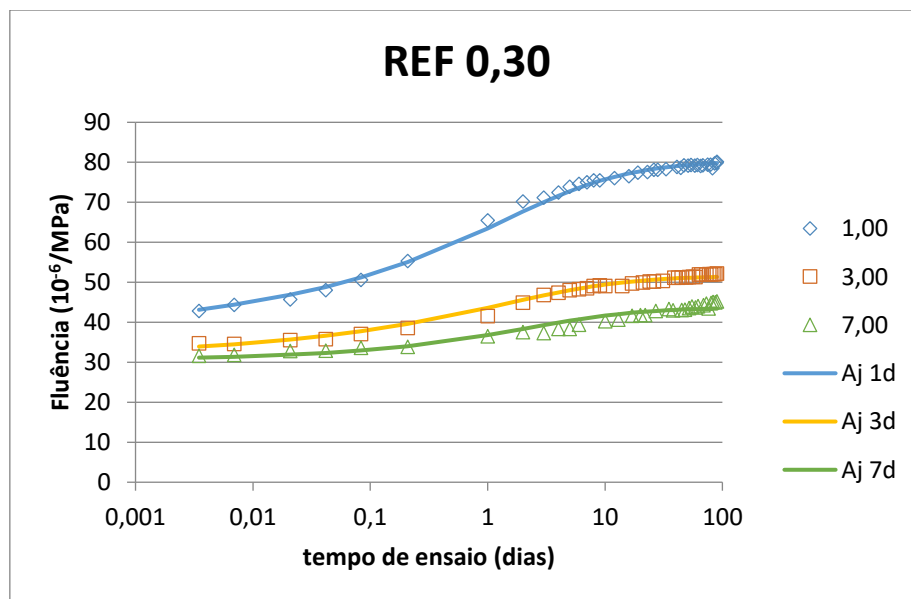


Figura 170 - Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes, segundo o modelo proposto pelo ACI 209.2R (ACI, 2008), para o concreto REF 0,30 nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

A Tabela 58 mostra os resultados de coeficiente de fluência de cada concreto estudado, obtidos após os ajustes das curvas.

Tabela 58 –Fluência dos concretos nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

Concreto	Coeficiente de fluência		
	1 dia	3 dias	7 dias
REF 0,30	1,15	0,65	0,43
REF 0,345	0,81	0,82	0,50
REF 0,367	0,53	0,53	0,52
SAP(0,30+0,045)	1,03	0,79	0,65
SAP(0,30+0,067)	0,89	0,72	0,47
0,30 INS	0,85	0,73	0,46
SAP(0,30+0,045)INS	1,04	0,91	0,55

De uma maneira geral, nota-se que o coeficiente de fluência diminui com o aumento da idade de carregamento, exceção se deu nos concretos REF 0,367 e REF 0,345. No primeiro o coeficiente de fluência foi praticamente constante em todas as idades de carregamento e, no segundo, o coeficiente de fluência foi constante da idade de carregamento de 1 e 3 dias, mas reduziu na idade de carregamento de 7 dias.

Esperava-se ainda que o coeficiente de fluência aumentasse com o aumento da relação água/cimento, o que só foi observado na idade de carregamento de 7 dias, como é mostrado na Figura 171.

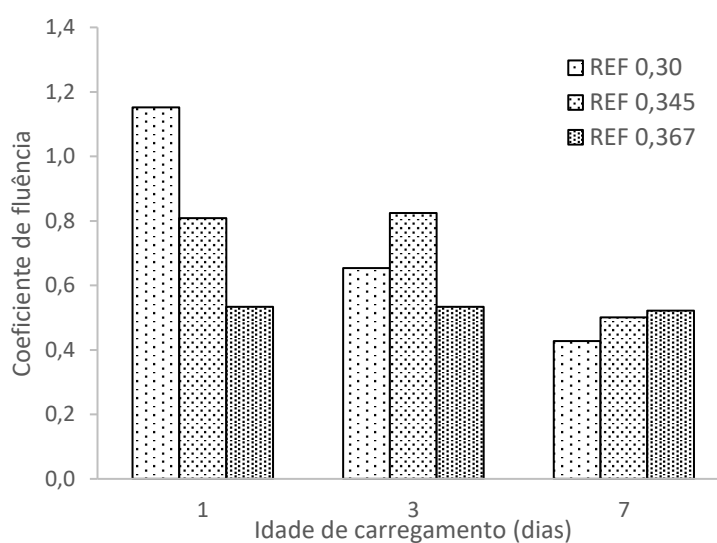


Figura 171 - Coeficiente de fluência dos concretos de referência



Buscando uma melhor interpretação e discussão dos resultados, apresenta-se a seguir uma análise dividida em três etapas: a) avaliação da adição de água incorporada por meio do SAP como agente de cura interna; b) avaliação da adição de nanossílica e c) o efeito combinado da adição do SAP e da nanossílica.

#### 4.2.7.1 - Avaliação da adição de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna

Na Figura 172 é mostrado o comportamento do coeficiente de fluência dos concretos com adição de SAP e do concreto de referência com a mesma relação água/cimento básica (REF 0,30).

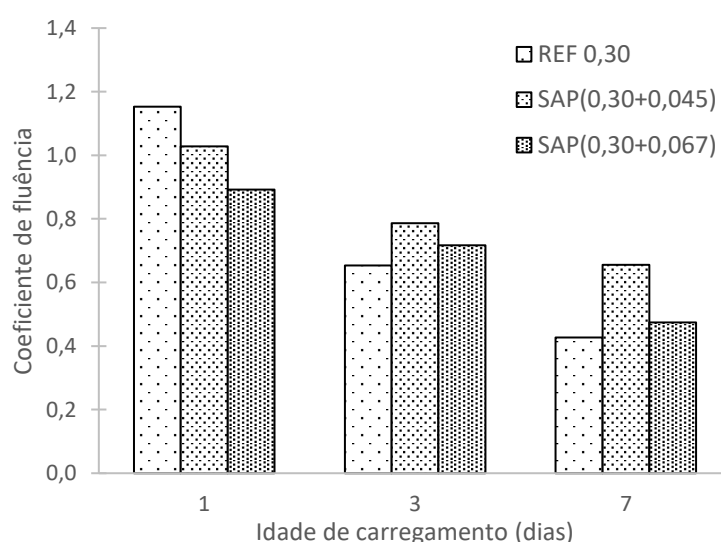


Figura 172 - Comportamento do coeficiente de fluência dos concretos com adição de polímero superabsorvente em comparação com o concreto REF 0,30

Nota-se que na idade de carregamento de 1 dia o coeficiente de fluência foi reduzido em 11% e 23% para os concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067), respectivamente, em relação ao concreto de referência. Para as idades maiores de carregamento, os coeficientes de fluência dos concretos com SAP foram maiores do que o concreto de referência. Aos 3 dias os coeficientes de fluência foram aumentados em 20% e 9% para os concretos SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,067), respectivamente. Na idade de carregamento de 7 dias o coeficiente de fluência do concreto SAP(0,30+0,045) apresentou um acréscimo de 51%, em relação ao concreto de referência, enquanto para o concreto SAP(0,30+0,067) esse aumento se manteve em 9%.

Ao comparar os dois concretos com adição de polímero, nota-se que o coeficiente de fluência do concreto SAP(0,30+0,045) é maior do que o do concreto SAP(0,30+0,067) em 16%, 10% e 38% nas idades de carregamento de 1 dia, 3 dias e 7 dias, respectivamente, ou seja houve uma redução da fluência com o aumento do teor de polímero.

Na Figura 173 é mostrado o comportamento do coeficiente de fluência dos concretos com polímero superabsorvente em comparação com os concretos de referência com a mesma relação água/cimento total.

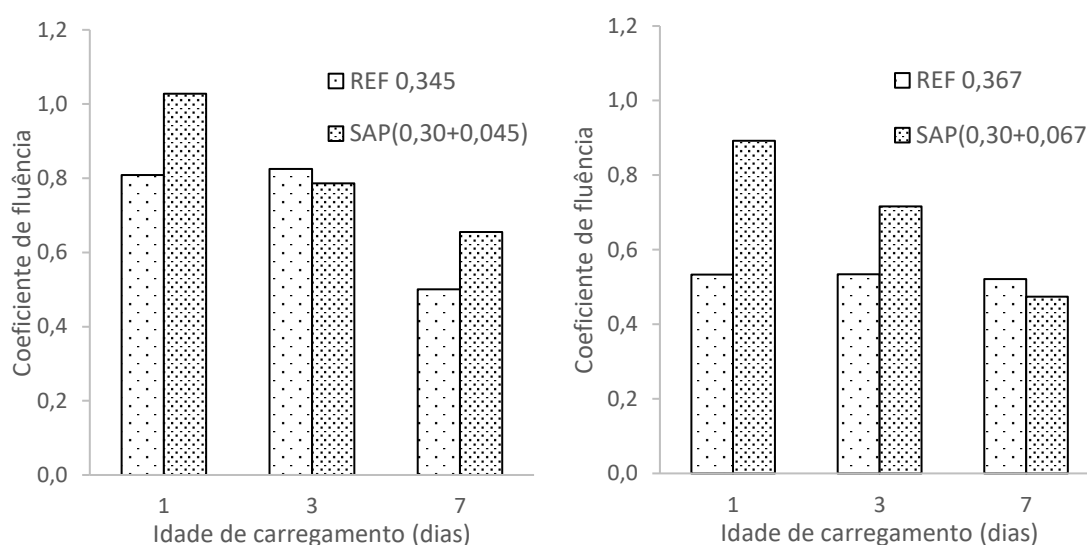


Figura 173 - Coeficiente de fluência dos concretos com SAP em comparação com os concretos de referência com a mesma relação água/cimento total

Nota-se que, em relação ao concreto de referência REF 0,345, o concreto SAP(0,30+0,045) apresenta um coeficiente de fluência maior em 27% e 30% nas idades de carregamento de 1 dia e 7 dias, respectivamente. Na idade de carregamento de 3 dias, o coeficiente fluência é praticamente o mesmo para os dois concretos (4% de diferença). Em relação ao concreto REF 0,367, nota-se que o concreto SAP(0,30+0,067) apresenta um coeficiente de fluência 68% e 34% maior nas idades de carregamento de 1 dia e 3 dias, respectivamente. No carregamento aos 7 dias de idade o coeficiente de fluência do concreto com SAP é 10% menor do que o concreto de referência.

Assamann e Reinhardt (2014) estudaram os efeitos da adição de polímero superabsorvente na fluência à tração. Os resultados mostraram que, o concreto com água

incorporada por meio da adição de polímero superabsorvente, apresentou uma significativa redução na fluência à tração quando comparado com o concreto de referência com a mesma relação água/cimento total. Os autores mostram também que o coeficiente de fluência do concreto contendo polímero superabsorvente foi comparável à fluência do concreto com mesma relação água/cimento básica. Os resultados obtidos no presente estudo não confirmam essa tendência uma vez que nas idades maiores, os coeficientes de fluência dos concretos com SAP superam o coeficiente do concreto com a mesma relação água/cimento básica entre 9% e 51%, indicando um aumento da fluência dos concretos com a adição de SAP.

#### 4.2.7.2 - Avaliação da adição de nanossílica

Na Figura 174 é mostrado o comportamento do coeficiente de fluência do concreto com adição de nanossílica (0,30 1NS) e do concreto de referência (REF 0,30).

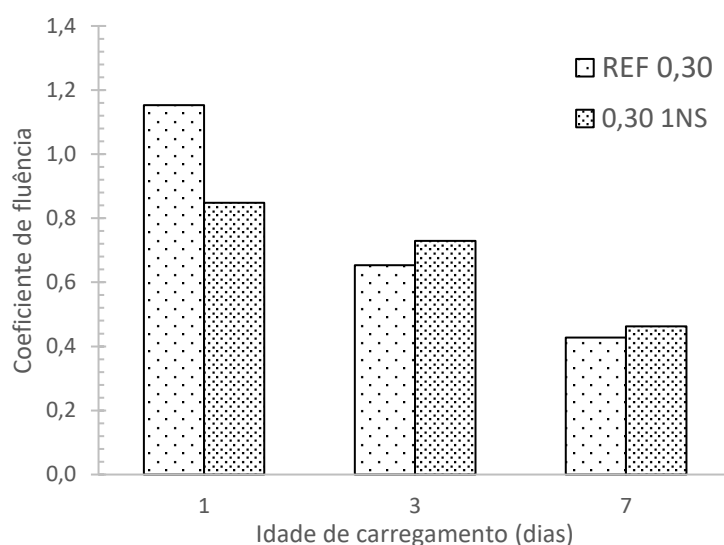


Figura 174 - Coeficiente de fluência do concreto com adição de nanossílica em comparação com o concreto de referência

É possível observar que o concreto 0,30 1NS apresentou um coeficiente de fluência maior em 12% e 7% do que o concreto de referência nas idades de carregamento de 3 dias e 7 dias, respectivamente. Por outro lado, na idade de 1 dia de carregamento, o coeficiente de fluência do concreto com nanossílica foi 26% menor do que a referência. Nota-se, portanto, um comportamento muito similar nas maiores idades de carregamento e uma redução da fluência na idade mais jovem. O comportamento observado no carregamento

a 1 dia de idade, pode estar associado ao maior e mais rápido enrijecimento do concreto com nanossílica nessa idade devido ao efeito acelerador das reações provocado pela nanossílica, enquanto que nas idades maiores o mecanismo da água adsorvida passa a ser preponderante, resultando em comportamentos semelhantes.

#### 4.2.7.3 - Efeito combinado da adição do SAP e de nanossílica

Na Figura 175 é mostrado o comportamento do coeficiente de fluência do concreto com adição de nanossílica (0,30 1NS) e do concreto de referência (REF 0,30).

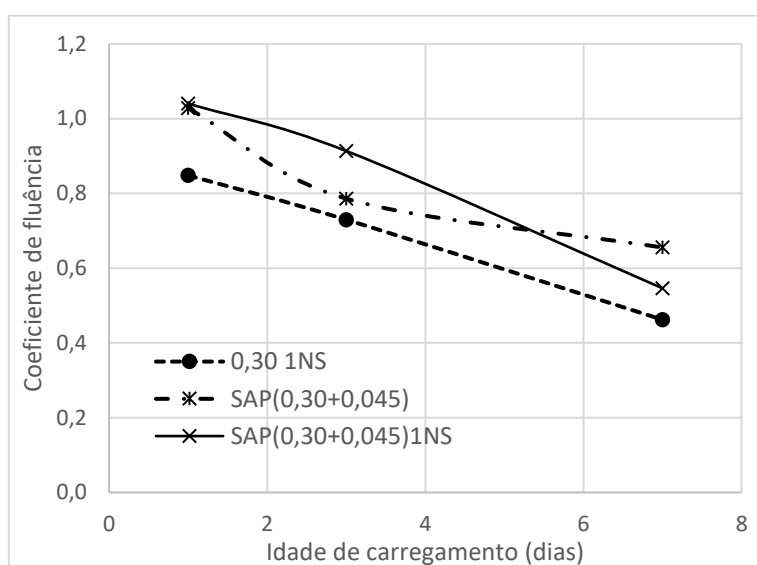


Figura 175 - Efeito da adição combinada de SAP e nanossílica no coeficiente de fluência

Nota-se que o coeficiente de fluência do concreto com adição de SAP é maior do que o concreto com adição de nanossílica em todas as idades de carregamento e, aparentemente, o coeficiente de fluência do concreto com a adição combinada de SAP e de nanossílica se aproxima mais do comportamento do concreto apenas com adição de polímero.

Se observa na idade de carregamento de 1 dia que o coeficiente de fluência do concreto SAP(0,30+0,045)1NS é igual ao do concreto SAP(0,30+0,045) e nas demais idades há uma diferença de 15%, apenas invertendo a ordem, na idade de carregamento de 3 dias o coeficiente de fluência do concreto SAP(0,30+0,045)1NS é maior e na idade de carregamento de 7 dias é menor.

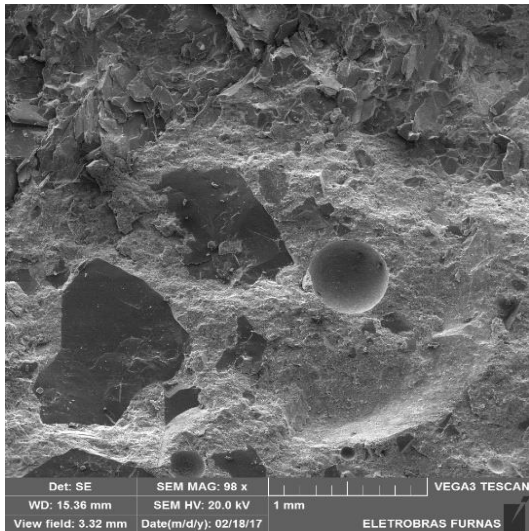
Em relação ao concreto somente com adição de nanossílica (0,30 1NS), observa-se que o coeficiente de fluência do concreto SAP(0,30+0,045)1NS é maior em 23%, 25% e 20% nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias, respectivamente.

Mais uma vez destaca-se que o comportamento observado do coeficiente de fluência do concreto SAP(0,30+0,045)1NS está de acordo com aqueles observados na retração por secagem, quando as misturas de concreto com a adição combinada de nanossílica e a incorporação de água, por meio de SAP como agente de cura interna, mostraram comportamento semelhante às misturas produzidas somente com a adição de SAP, mostrando que o SAP exerceu o efeito preponderante tanto na fluência quanto na retração por secagem no caso das misturas contendo a adição combinada de SAP e de nanossílica.

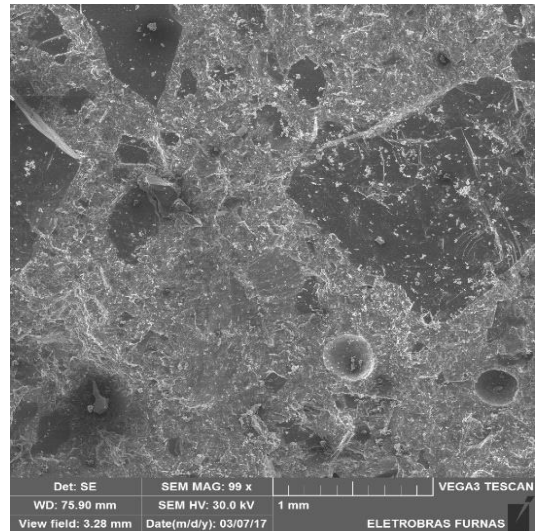
#### **4.2.8 - Microestrutura**

##### **4.2.8.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura**

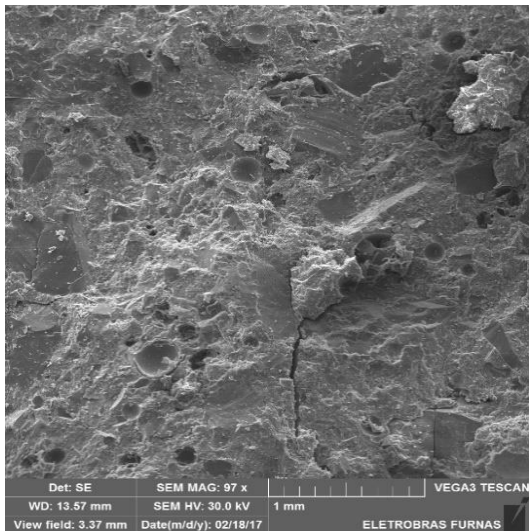
A análise microscópica foi efetuada em cinco amostras de concreto (REF 0,30; REF 0,345, 0,30 1NS; SAP(0,30+0,045) e SAP(0,30+0,045)1NS), nas idades de 1 dia e 28 dias. A seguir, são descritas as principais observações realizadas na análise microscópica e química dos concretos por meio do MEV. Os aspectos observados e comentados valem para as duas idades analisadas, pois não foram observadas diferenças marcantes entre as amostras nas diferentes idades. É válido salientar que, as características registradas são de amostras selecionadas aleatoriamente durante a preparação e, provavelmente, as observações descritas não sejam válidas para as amostras como um todo. Na Figura 176 é apresentada uma comparação do aspecto geral de cada uma das amostras dos concretos com a idade de 1 dia.



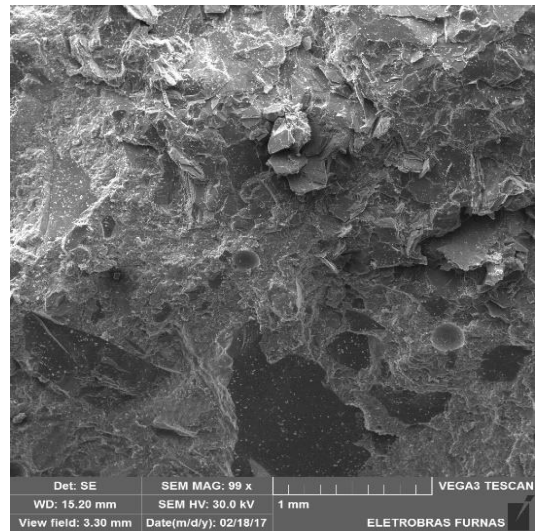
REF 0,30



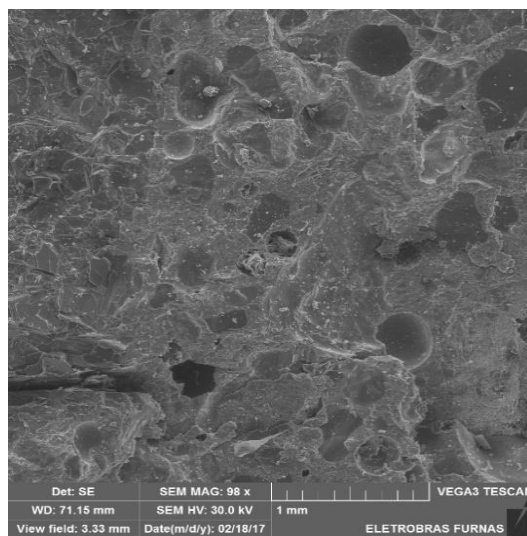
REF 0,345



SAP(0,30+0,045)



0,30 1NS



SAP(0,30+0,045)1NS

Figura 176 – Aspecto geral da microestrutura dos concretos com 1 dia de idade

De uma maneira geral, se observa que todas as amostras possuem uma microestrutura densa e refinada, com a presença de poros devido ao ar aprisionado. Nos concretos com o polímero superabsorvente também se identifica um outro de tipo de poro, como resultado da liberação da água de cura interna por parte do polímero.

Os vazios oriundos da presença do SAP estão distribuídos de modo uniforme na matriz cimentícia, o que leva a concluir que o processo de mistura do SAP com os demais materiais secos constituintes dos concretos foi satisfatório, garantindo uma distribuição homogênea do SAP na matriz cimentícia. Essa homogeneidade é fundamental para o desempenho da mitigação da retração autógena, pois garante uma uniformidade da cura interna.

Mesmo apresentando uma estrutura densa, as misturas contendo SAP apresentam uma quantidade maior de poros se comparadas com as três misturas sem a presença do polímero, como pode ser observado na Figura 177.

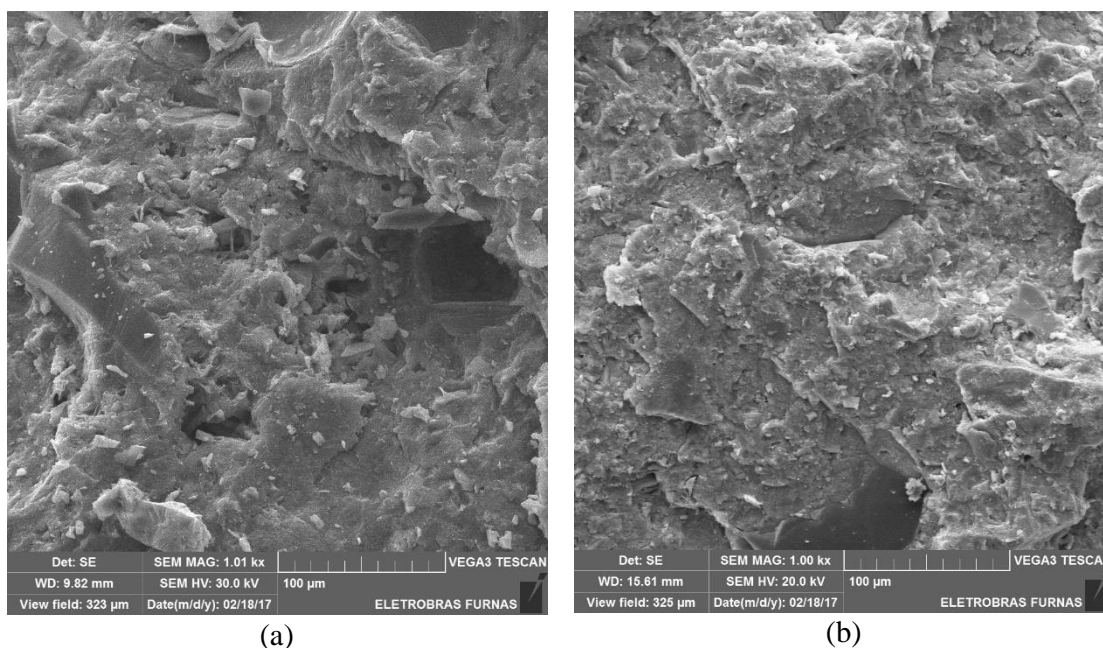


Figura 177 – Detalhe da estrutura mais porosa do concreto SAP(0,30+0,045) (a) em comparação com o concreto REF 0,30 (b)

Acredita-se que essa estrutura mais porosa da estrutura interna apresentada pelas misturas com a adição do polímero superabsorvente seja responsável pela redução da resistência à compressão e do módulo de deformação dos concretos com adição de SAP em relação aos concretos de referência.

Os poros oriundos do ar aprisionado nas amostras se caracterizam pela quase completa ausência de compostos no seu interior, enquanto que os poros deixados pelos polímeros, se caracterizam pela presença de alguns compostos, como mostra a Figura 178.

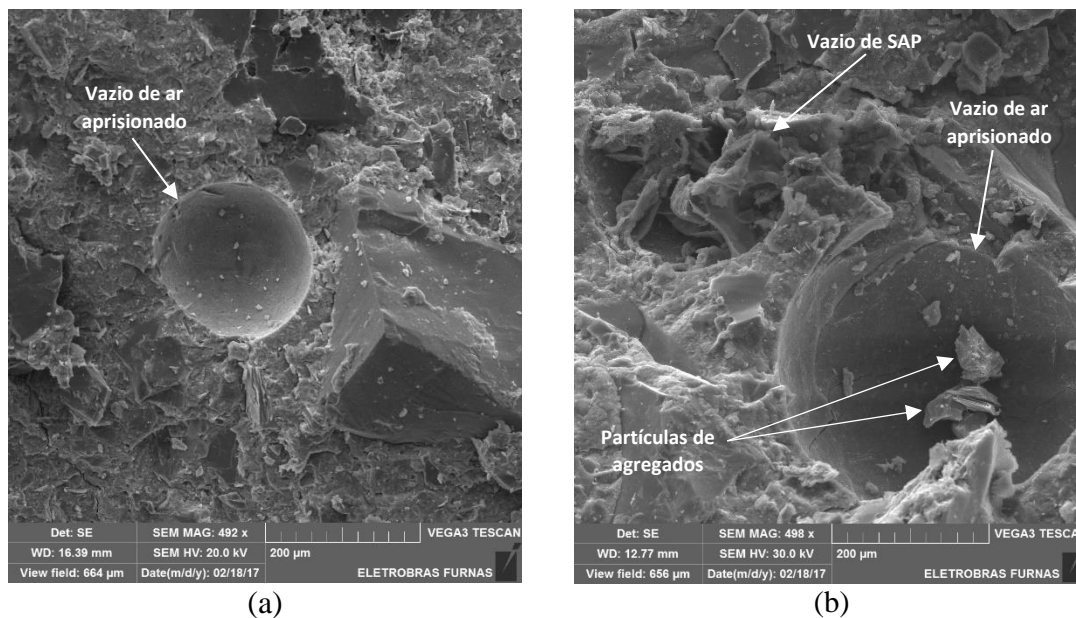


Figura 178 - (a) Aspecto geral de poros vazios (característicos de ar aprisionado) em amostra do concreto REF 0,30, com 28 dias de idade. (b) Presença de poros vazio e outro parcialmente preenchido (típico de poros deixados pelo SAP) em amostra do concreto SAP(0,30+0,045), com 1 dia de idade

Buscando identificar os produtos observados no interior dos poros deixados pelo SAP, na amostra da Figura 178 (b) foi realizada uma análise semiquantitativa, por meio da Espectrofotometria por Energia Dispersiva – EDS, cujos resultados são mostrados na Figura 179.

A morfologia dos produtos observados no interior dos poros deixados pelo SAP possui aparência de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), identificados pelas letras “a” e “c”, e de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), identificados pela letra “b”. A presença do C-S-H foi confirmada pela análise semiquantitativa, no entanto, nota-se que o produtos “a” e “c” que, apresentam morfologia parecida com hidróxido de cálcio, parecem estar em processo de transformação, mudando sua morfologia característica de placas hexagonais para outra disforme, provavelmente devido à reação pozolânica da sílica ativa e, no caso do concreto SAP(0,30+0,045)1NS, também da nanossílica.



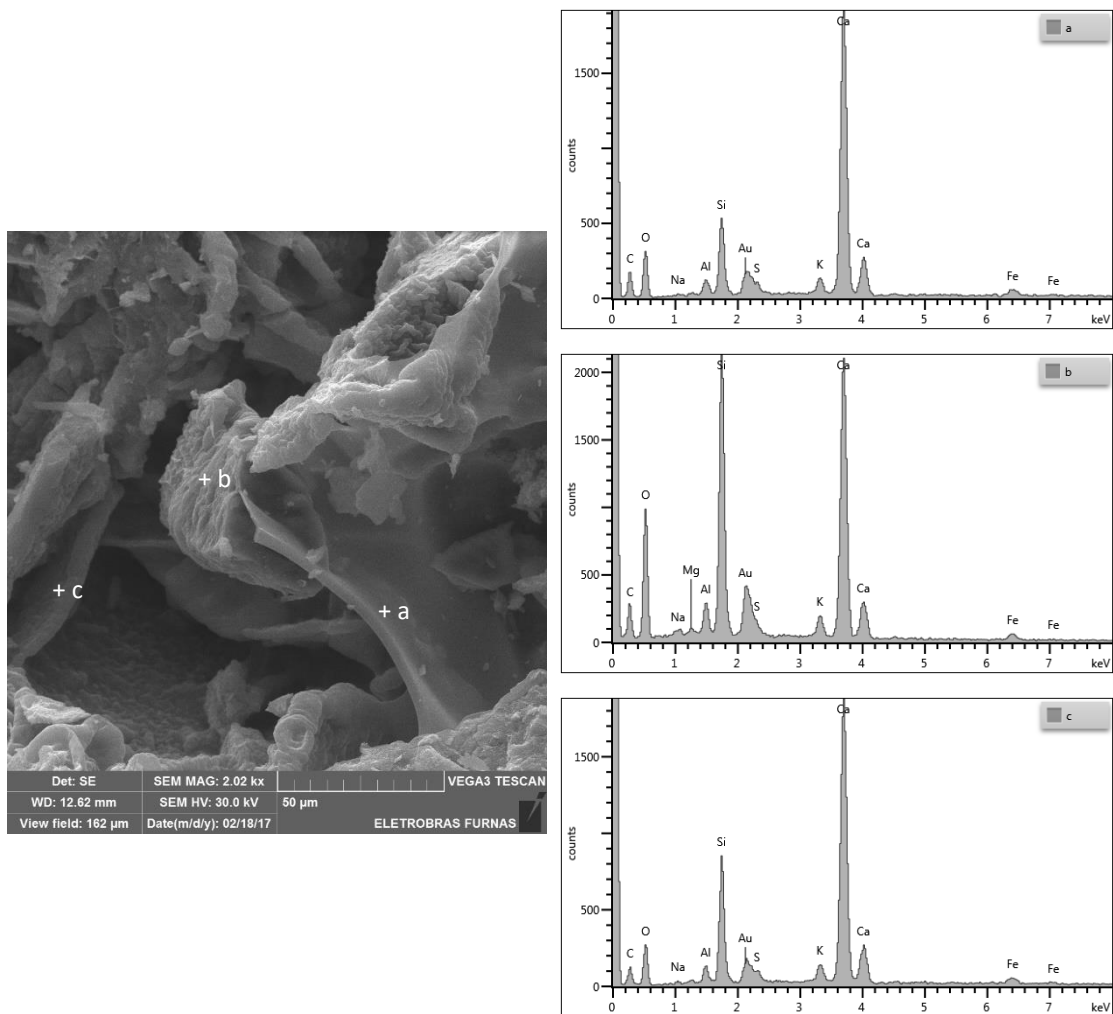


Figura 179 – Concreto SAP(0,30+0,045) com presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em processo de transformação (“a” e “c”) e de C-S-H (“b”), identificados por meio de EDS, no interior de poro deixado pelo SAP, amostra com 1 dia de idade.

Os compostos encontrados nos poros parcialmente preenchidos da amostra de concreto com adição combinada de nanossílica e SAP (SAP(0,30+0,045)1NS) são semelhantes à amostra de concreto somente com adição de SAP, como mostra a Figura 180. Nota-se a parede do poro revestida com uma espécie de casca formada por um produto com composição química elementar semelhante ao C-S-H, conforme indicado pelo EDS. Ao fundo do poro se tem a presença de hidróxido de cálcio.

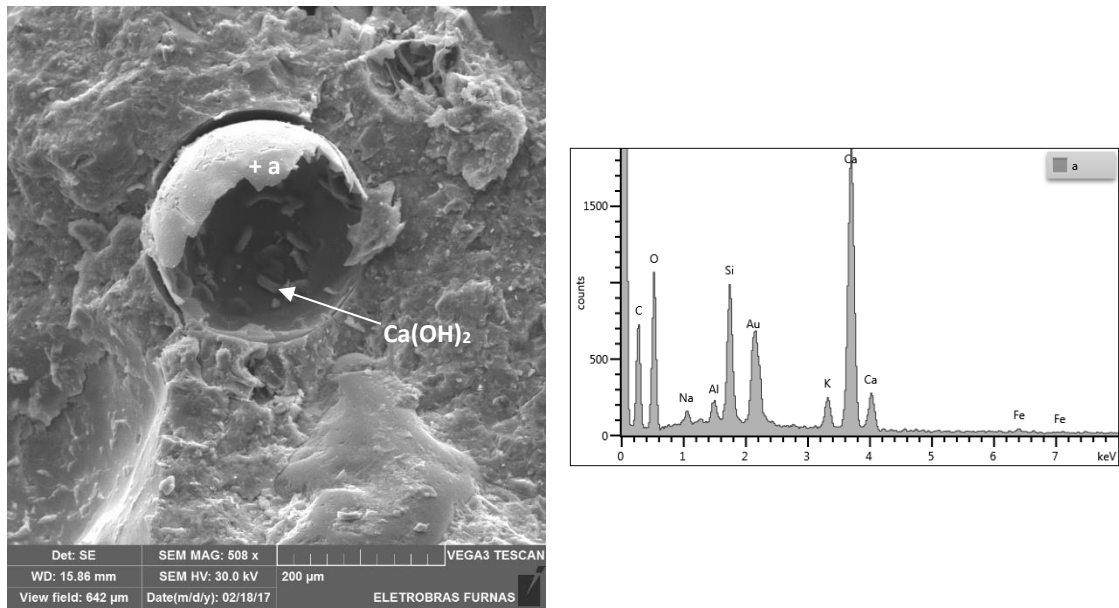


Figura 180 – Poro característico da presença do SAP em amostra do concreto SAP(0,30+0,045)1NS, aos 28 dias de idade, com uma espécie de casca e ao fundo produtos semelhantes a hidróxido de cálcio.

A partir da análise das micrografias dos concretos com adição do polímero, pode-se concluir que os poros deixados pelo SAP são locais onde inicialmente ocorrem a formação e deposição de cristais de hidróxido de cálcio e posteriormente, por meio da reação pozolânica com a sílica ativa e nanossílica, dão lugar a um produto semelhante ao C-S-H. Acredita-se que a maior disponibilidade de água nesses poros, devido a água de cura interna, possa inclusive tornar os vazios deixados pelo SAP em locais preferenciais para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

Nas amostras dos concretos de referências (REF 0,30 e REF 0,345) foram observados a presença de grãos de cimento anidro como mostra a Figura 181.

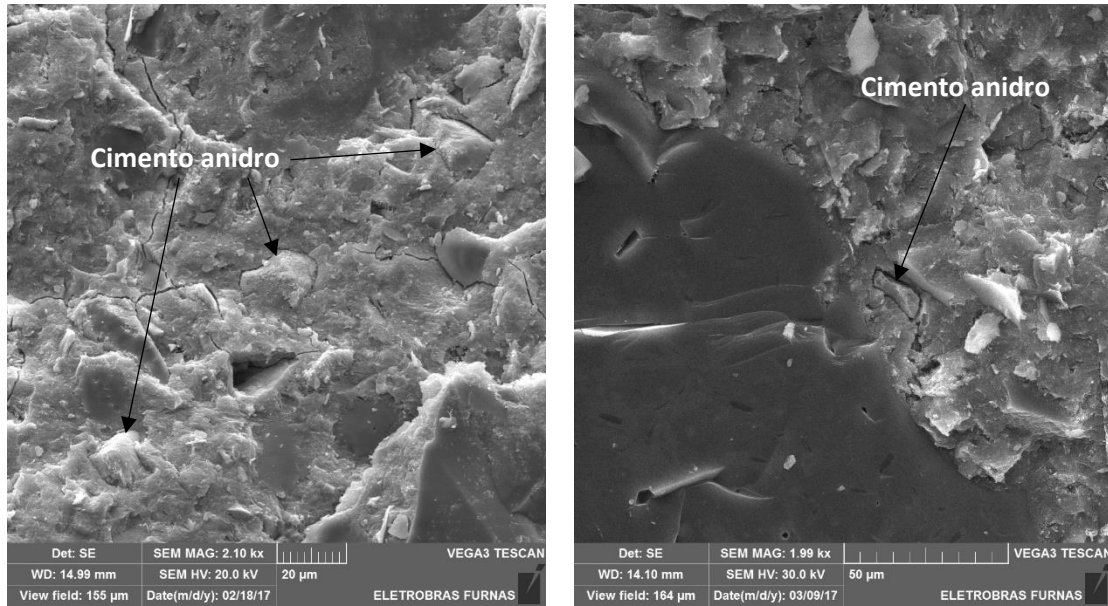


Figura 181 - Presença de grãos de cimento anidro nas amostras dos concretos de referência REF 0,30 (esquerda) e REF 0,345 (direita), aos 28 dias de idade.

Na amostra de concreto com adição de nanossílica (0,30 1NS), além de grãos de cimento anidro, nota-se a presença de aglomeração de sílica, como mostra a Figura 182. Atribui-se essa aglomeração a má dispersão das partículas de sílica durante a mistura do concreto.

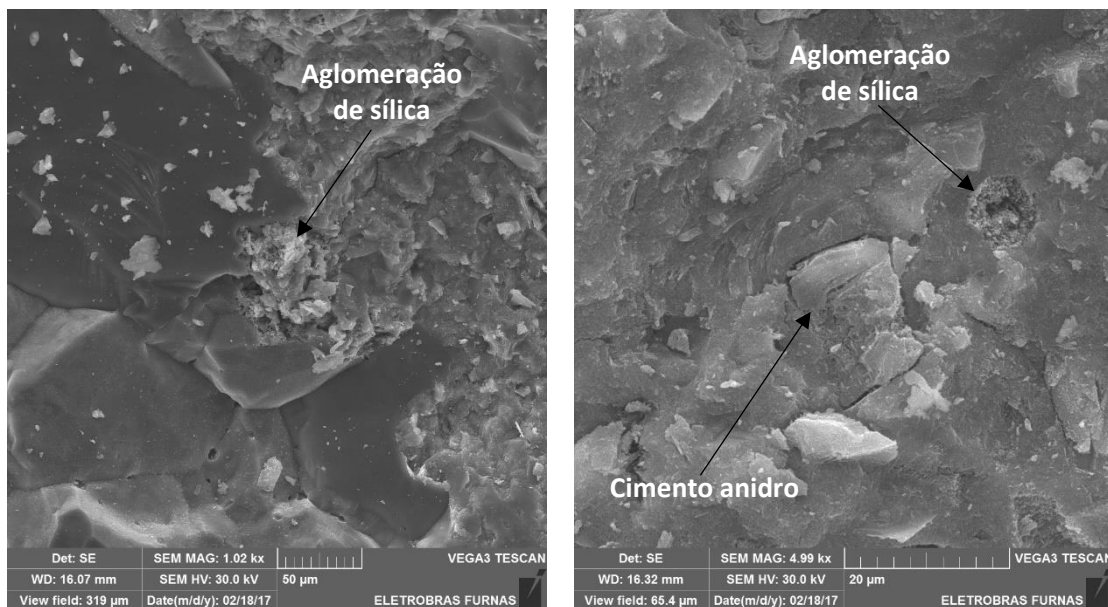
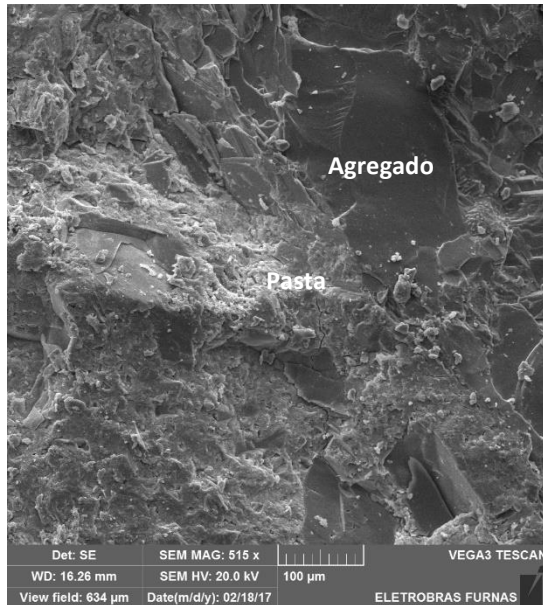


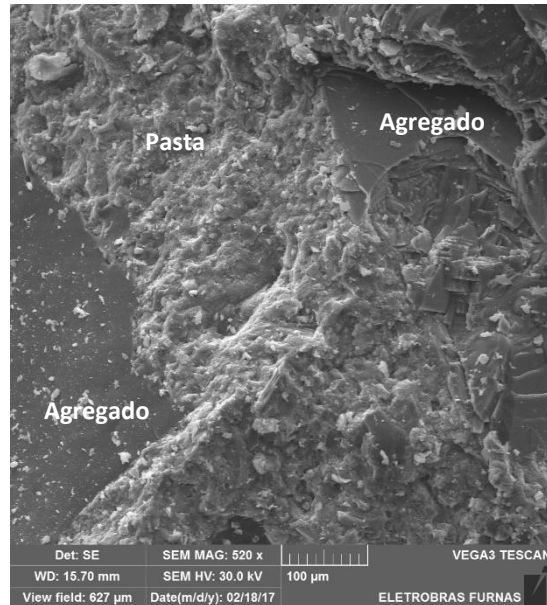
Figura 182 - Presença de aglomeração de sílica e de grãos de cimento anidro em concreto com adição de nanossílica (0,30 1NS)

Nas misturas sem a adição de nanossílica, a aglomeração de sílica não foi observada, o que não significa dizer que não tenha ocorrido. No entanto, essa observação reforça que

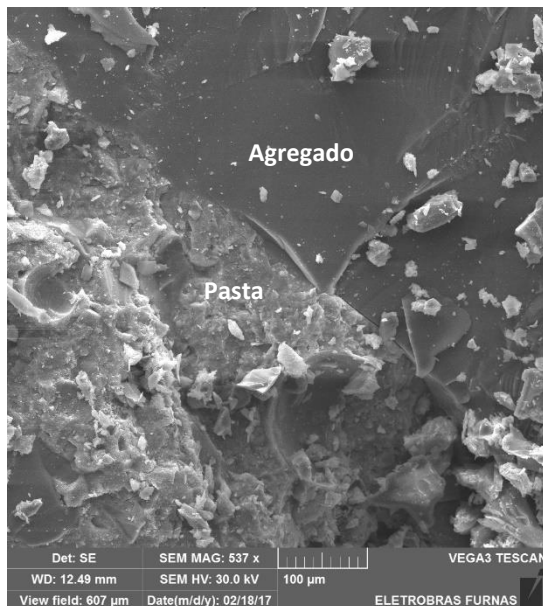
a aglomeração de sílica pode ser favorecida pela presença das partículas de nanossílica. Nas amostras de concreto com adição de SAP não foram identificados nem grãos de cimento anidro e nem aglomerações de sílica. A interface da matriz cimentícia com os agregados em todas as amostras mostrou-se densa e sem imperfeições, como mostra a Figura 183.



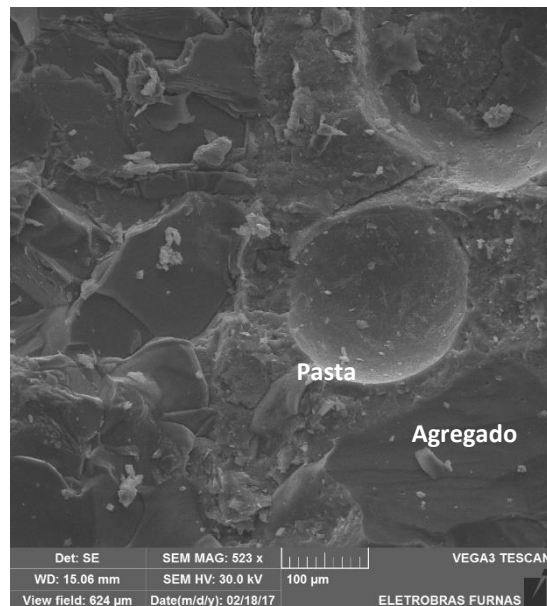
REF 0,30 – 28 dias



0,30 INS – 1 dia



SAP(0,30\_0,045) – 1 dia



SAP(0,30\_0,045)INS – 1 dia

Figura 183 - Aspecto denso e sem imperfeições da interface agregado graúdo-pasta das amostras de concreto analisadas

### 4.3 – Resumo dos resultados

Na sequência apresenta-se um breve resumo dos resultados apresentados e discutidos nesse capítulo:

#### a) Estado fresco

- A adição de polímero superabsorvente, assim como a adição de nanossílica, alteram as propriedades reológicas do concreto, aumentando a necessidade de aditivo superplastificante para manter o abatimento desejado para os concretos. A adição de nanossílica tem maior efeito do que o polímero superabsorvente, exigindo maiores dosagens de superplastificante.
- Os concretos com adição de polímero superabsorvente apresentaram menores tempo zero (transição suspensão-sólido) em relação ao concreto de referência. No entanto, esse comportamento foi atribuído a variação do teor de aditivo superplastificante, que usado em teores acima do recomendado pelo fabricante, atuou como retardador das reações de hidratação, aumentando o tempo zero de algumas misturas. Os resultados das misturas de argamassas, que não possuíam o teor de aditivo como variável, mostraram que a adição do polímero superabsorvente não causou efeito sobre o tempo zero. Por outro lado, a adição de nanossílica reduziu o tempo zero, provavelmente devido à aceleração das reações de hidratação.
- A adição combinada de polímero superabsorvente e de nanossílica permitiu observar, por um lado, que para misturas com o mesmo teor de polímero superabsorvente a adição de nanossílica reduz o tempo zero, confirmando o efeito acelerador da nanossílica. Por outro lado, para misturas com o mesmo teor de nanossílica, a adição do polímero superabsorvente tende a incrementar o tempo zero.
- O polímero superabsorvente empregado no presente estudo provocou um incremento no teor de ar aprisionado do concreto. Esse incremento parece ser

resultado de uma contaminação da superfície das partículas do polímero por um agente tensoativo.

- A adição de nanossílica causou aumento no teor de ar aprisionado. Foi observado que a adição de 1% de nanossílica resultou num acréscimo do teor de ar aprisionado igual a 61% em relação a mistura de referência, enquanto que a adição de 2% de nanossílica dobrou o teor de ar aprisionado.
- O comportamento do teor de ar aprisionada nos concretos com a adição combinada de polímero e nanossílica, depende da quantidade de polímero superabsorvente empregada. Para os concretos com menos SAP a adição de nanossílica não representou grandes alterações no teor de ar aprisionado, para os concretos com mais polímero a adição de nanossílica colaborou para incrementar o teor de ar aprisionado.

#### b) Retração autógena

- A incorporação de água de cura interna por meio de SAP mostrou-se como uma estratégia eficiente na mitigação e, até mesmo eliminação, da retração autógena dos concretos de alta resistência. No presente estudo a menor eficiência na mitigação da retração autógena por meio da adição de SAP como agente de cura interna foi de 97% aos 28 dias de idade.
- A adição de nanossílica gerou aumento na retração autógena do concreto, podendo atingir valores de até 15%, em média, superiores à retração autógena do concreto de referência.
- Nas misturas com a adição combinada de polímero superabsorvente e nanossílica, a ação do polímero superabsorvente, como agente de cura interna, tem efeito preponderante sobre a retração autógena em relação a adição de nanossílica. Mesmo com a presença de nanossílica a água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, eliminou completamente a retração autógena ou apresentou uma eficiência mínima de 86% para mitigar a retração autógena.

#### c) Retração por secagem pelo método do extensômetro embutido

- Os concretos contendo SAP apresentaram maior retração por secagem do que o concreto de referência com a mesma relação  $a/c_{básica}$ . Para concretos com a mesma relação  $a/c_{básica}$ , a água incorporada por meio de SAP como agente de cura interna, representou um acréscimo na retração por secagem, em média, de 44%. Os concretos com teor de água incorporada 0,045 e 0,067 apresentaram resultados de retração por secagem similares;
- Os concretos contendo SAP apresentaram resultados de retração por secagem similares aos concretos de referência com a mesma relação  $a/c_{total}$ ;
- A adição de 1% de nanossílica não representou mudanças nos valores de retração por secagem do concreto. Por outro lado, a adição de 2% de nanossílica representou uma redução da retração por secagem em torno de 15%;
- As misturas de concreto com a adição combinada de nanossílica e de água incorporada, por meio de SAP como agente de cura interna, têm comportamento semelhante às misturas produzidas somente com a adição de SAP;

#### d) Resistência à compressão

- O polímero superabsorvente reduz a resistência à compressão em comparação com o concreto sem polímero. Os concretos com água incorporada igual a 0,045 e 0,067 apresentaram redução na resistência à compressão, aos 28 dias idade, de 7% e 19%, respectivamente;
- As diferenças dos resultados dos concretos com nanossílica não foram significativas em comparação ao concreto sem nanossílica;
- Os resultados de resistência à compressão das misturas com adição combinada de nanossílica e de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna, mostraram que para o teor de água incorporada 0,067 os teores de adição de nanossílica estudados não foram eficientes para compensar as perdas de

resistência à compressão. Por outro lado, a resistência à compressão dos concretos com o teor de água incorporada 0,045 e adição de nanossílica foram similares aos resultados de resistência do concreto de referência.

#### e) Resistência à tração

- Houve um incremento de 5 a 15% na resistência à tração dos concretos contendo água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, em relação ao concreto de referência;
- Em relação a adição de nanossílica, foi observado um incremento na resistência à tração por compressão diametral, em relação ao concreto de referência, entre 2 e 8%, quando da adição de 1% de nanossílica, e entre 7 e 13%, quando da adição de 2% de nanossílica;
- Os concretos com adição combinada de SAP e nanossílica, em geral, apresentaram queda na resistência à tração entre 3 e 12%, em comparação com os concretos contendo apenas polímero superabsorvente como adição, mostrando que a adição de nanossílica combinada com o SAP provocou um prejuízo no desempenho na resistência à tração por compressão diametral dos concretos.

#### f) Módulo de deformação

- De um modo geral, o módulo de deformação dos concretos cresce com o aumento do teor de nanossílica e diminui com o acréscimo de água incorporada, por meio de SAP como agente de cura interna. Os maiores valores de módulo foram observados para a situação com 2% de adição de nanossílica e sem água incorporada, enquanto que os menores valores foram observados nos mais altos teores de água incorporada;
- Foi observada a redução valor do módulo de deformação dos concretos com o aumento da água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna. A redução no módulo de deformação variou entre 2 e 15%, em relação aos resultados dos concretos de referência;



- A adição de nanossílica significou um incremento entre 1% e 7% no módulo de deformação dos concretos com nanossílica, em relação ao concreto de referência;
- Os resultados de módulo de deformação das misturas contendo a adição combinada de polímero superabsorvente e nanossílica estão muito próximos das misturas que contém apenas a adição de polímero, mostrando que a adição de nanossílica não foi capaz de compensar as reduções no valor do módulo causado pela água incorporada.

#### g) Deformação lenta (Fluência)

- Os resultados obtidos no presente estudo indicam um aumento do coeficiente de fluência dos concretos com adição de polímero superabsorvente em relação ao coeficiente de fluência dos concretos de referência. Nas idades maiores os coeficientes de fluência dos concretos com SAP superam o coeficiente do concreto com a mesma relação água/cimento básica entre 9% e 51%;
- O concreto com adição de nanossílica apresentou um coeficiente de fluência maior em 12% e 7% do que o concreto de referência nas idades de carregamento de 3 dias e 7 dias, respectivamente. Por outro lado, na idade de 1 dia de carregamento, o coeficiente de fluência do concreto com nanossílica foi 26% menor do que a referência;
- O coeficiente de fluência do concreto com adição de SAP é maior do que o concreto com adição de nanossílica em todas as idades de carregamento e, aparentemente, o coeficiente de fluência do concreto com a adição combinada de SAP e de nanossílica se aproxima mais do comportamento do concreto apenas com adição de polímero.

#### h) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

- Nos concretos com o polímero superabsorvente também se identifica, além de poros devido ao ar aprisionado, a presença de um outro tipo de poro, como resultado da liberação da água de cura interna por parte do polímero;

- Os poros deixados pelo SAP são locais onde inicialmente ocorrem a formação e deposição de cristais de hidróxido de cálcio e posteriormente, por meio da reação pozolânica com a sílica ativa e nanossílica, dão lugar a um produto semelhante ao C-S-H. Acredita-se que a maior disponibilidade de água nesses poros, devido a água de cura interna, possa inclusive tornar os vazios deixados pelo SAP em locais preferenciais para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

## 5.0 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Em concretos de alta resistência a retração autógena torna-se preocupante, pois pode atingir níveis que conduzam os concretos à fissuração nas primeiras idades, comprometendo o desempenho do material. O emprego de polímeros superabsorventes, como agente de cura interna, é hoje reconhecido como a mais eficaz estratégia de mitigação ou de eliminação da retração autógena nos concretos de alta resistência. No entanto, tem sido relatado que a incorporação do polímero superabsorvente na mistura traz prejuízos às propriedades mecânicas dos concretos, particularmente na resistência à compressão.

Assim sendo, o presente estudo foi realizado para avaliar se era possível controlar a retração autógena de concretos de alta resistência em níveis aceitáveis, sem prejudicar a resistência à compressão, incorporando água de cura interna por meio da adição de polímero superabsorvente, combinada com a adição de nano partículas de sílica. Para tanto, foi desenvolvido programa experimental com diferentes teores de água incorporada (0; 0,045 e 0,067) e de adição de nanossílica (0%; 1% e 2%).

Os resultados confirmaram a eficácia do polímero superabsorvente em mitigar ou até mesmo eliminar toda a retração autógena. No presente estudo o teor de água incorporada 0,067 eliminou completamente a retração autógena, confirmando a releitura do trabalho de Powers realizada por Jensen e Hansen (2001), enquanto que as misturas de concreto com o teor de água incorporada 0,045 somente apresentou retração autógena a partir dos 22 dias de idade e, aos 28 dias de idade, mostrou uma eficiência de 97% na mitigação da retração autógena. A redução da retração autógena nos concretos com cura interna se dá devido a liberação gradativa de água de por parte do SAP, a medida que água capilar vai sendo consumida pelas reações de hidratação, mitigando ou até mesmo eliminando o fenômeno da autodessecação.

Por outro lado, os resultados também mostraram que o polímero superabsorvente reduz a resistência à compressão em comparação com o concreto sem polímero e com a mesma relação água/cimento básica. Os concretos com água incorporada igual a 0,045 e 0,067 apresentaram redução na resistência à compressão, aos 28 dias idade, de 7% e 19%, respectivamente. As reduções apresentadas na resistência à compressão, provavelmente se devem a um incremento da porosidade da pasta do concreto devido à introdução do

polímero superabsorvente. 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.

No que se refere à adição de nanossílica, o teor de 1% não provocou mudança significativa no comportamento da retração autógena dos concretos. No entanto, a adição de 2% de nanossílica resultou em incremento da retração autógena dos concretos.

Em relação aos efeitos da adição de nanossílica na resistência à compressão dos concretos, apesar dos concretos com 2% de nanossílica apresentarem resultados levemente superiores (2% a 11%) ao concreto de referência, as diferenças dos resultados dos concretos com nanossílica não foram significativas em comparação ao concreto sem nanossílica.

Nas misturas com a adição combinada de polímero superabsorvente e nanossílica, a ação do polímero superabsorvente, como agente de cura interna, teve efeito preponderante sobre o comportamento da retração autógena. Mesmo com a tendência da nanossílica em incrementar a retração autógena, a água incorporada, por meio do SAP como agente de cura interna, eliminou completamente a retração autógena ou apresentou uma eficiência mínima de 86% para mitigar a retração autógena das misturas híbridas.

Os resultados de resistência à compressão das misturas com adição combinada de nanossílica e de água incorporada por meio da adição de SAP como agente de cura interna, mostraram que para o teor de água incorporada 0,067 os teores de adição de nanossílica estudados não foram eficientes para compensar as perdas de resistência à compressão.

Para os concretos com a relação  $a_{inc}/c$  igual a 0,045, a combinação com os teores de nanossílica estudados mostraram-se promissores para compensar a redução da resistência à compressão provocada pela adição do polímero. O resultado de resistência à compressão, aos 7 dias e 28 dias de idade, do concreto com relação  $a_{inc}/c$  igual a 0,045 e

1% de nanossílica foi igual a resistência do concreto de referência com relação  $a/c_{básica}$  0,30. No caso do concreto com relação  $a_{inc}/c$  igual a 0,045 e adição de 2% de nanossílica, observou-se que a resistência à compressão é praticamente igual a resistência do concreto de referência, aos 3 dias e 182 dias de idade.

Desse modo, no caso dos concretos do presente estudo, se pode concluir que é possível mitigar a retração autógena do concreto de alta resistência, sem prejudicar sua resistência à compressão. Para tanto, se pode apresentar as recomendações abaixo para a produção de concretos empregando os materiais utilizados no presente estudo:

- Para  $50 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$ , recomenda-se apenas a incorporação do teor de 0,045 de água de cura interna, por meio de polímero superabsorvente como agente de cura interna;
- Para  $60 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 70 \text{ MPa}$ , além da incorporação do teor de 0,045 de água de cura interna, recomenda-se também a adição de 1% de nanossílica;
- Para  $f_{ck} > 70 \text{ MPa}$ , recomenda-se o emprego do teor de 0,045 de água de cura interna, combinado com um teor de adição de nanossílica a ser determinado experimentalmente por meio de estudo de dosagem do concreto.

Destaca-se, porém, que apesar do uso combinado de polímero superabsorvente com a adição de nanopartículas de sílica, se mostrar promissor para o controle da retração autógena em níveis aceitáveis sem causar prejuízos para a resistência à compressão, os resultados mostram que a redução na resistência à compressão ao adicionar o polímero no concreto, foi muito pequena (7%) ao se comparar com a eficiência na mitigação da retração autógena (97%). Desse modo, acredita-se que se pode mitigar a retração autógena e produzir concretos de alta resistência somente adequando o teor de polímero superabsorvente, por meio de um estudo experimental de dosagem do concreto com adição de polímero superabsorvente, sem a presença de nanossílica.

## **5.1 – SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS**

Apesar do esforço da comunidade científica em estudar e compreender o fenômeno da retração autógena nos materiais cimentícios e os mecanismos de atuação do polímero

superabsorvente e da nanossílica, ainda são muitas as questões que permanecem em aberto. Assim sendo, apresenta-se a seguir sugestões para a a continuidade dessa linha de estudo:

- Desenvolver ou a adaptação de um método experimental de dosagem de concreto com polímero superabsorvente;
- Avaliação dos efeitos de cada composto do clínquer de cimento Portland e do seu grau de hidratação na retração autógena dos materiais cimentícios;
- Avaliação do efeito da adição de polímeros superabsorventes em propriedades do concreto associadas à durabilidade;
- Avaliação da combinação de polímeros superabsorvente com outros nano materiais;
- Estudo da análise do risco de fissuração a partir dos resultados experimentais de retração autógena, fluência e resistência mecânica;
- Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com SAP, por meio da avaliação do desenvolvimento de fissuração em amostras retringidas;
- Buscar a partir de resultados experimentais o desenvolvimento de modelos matemáticos que possam ser empregados para a estimativa da retração autógena;
- Investigar a mitigação da retração autógena por meio do uso de biopolímeros ou similares.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI. **ACI 209.1R-05 - Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete**, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 13 pp., 2005.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 8 p., 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 47: Concreto - determinação do teor de ar em concreto fresco - método pressométrico**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 23 p, 2002.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - requisitos**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 19 p., 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8224: Concreto endurecido — Determinação da fluência — Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 8 p., 2013.

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

ABREU, G. B.; GUMIERI, A. G.; CALIXTO, J. M. F.; FRANÇA, F. C.; SILVA, C. **Estudo das propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho contendo nanosílica estabilizada**, 2014. Disponível em [www.portaldetecnologia.com.br/pavimentacao-obras/estudo-das-propriedades-mecânicas-do-concreto-de-alto-desempenho-contendo-nanosilica-estabilizada/](http://www.portaldetecnologia.com.br/pavimentacao-obras/estudo-das-propriedades-mecânicas-do-concreto-de-alto-desempenho-contendo-nanosilica-estabilizada/) acesso em 12/10/2016.

AGOSTINHO, L. B. **Estudo Reológico de Pastas de Cimento Contendo Polímero Superabsorvente e Nano Partículas de Sílica**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p., 2017.

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

AKZONOBEL. **Cembinder® for the construction industry: Colloidal silica dispersions – uses and benefits**. Netherlands: AkzoNobel and Eka Chemicals S.A., 2013.

ALMEIDA, F. C. R.; KLEM, A. J. **Effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on Fresh State Mortars with Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS)**. 5th International Conference on Durability of Concrete Structures, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong Province, P.R. China, pp. 223-229, 2016

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, **ACI 234 R: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete**. Farmington Hills, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1698: Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar**. Philadelphia – USA, 8p. 2014.

AMN. **NM 58: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO, 1996.

ARTHANARI, S.; YU, C. W. **Creep of concrete under uniaxial and biaxial stress and elevated temperatures**. Magazine of Concrete Research, v. 19, n. 60, 1967.

ASSMANN, A. **Physical Properties of Concrete Modified with superabsorbent polymers**. Tese doutorado, Universidade de Stuttgart, Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental. Stuttgart - Alemanha, 213p. 2013

ASSMANN, A.; REINHARDT, H. W. **Tensile creep and shrinkage of SAP modified concrete**. Cement and Concrete Research, v. 58, p. 179-185, 2014.

AZARIJAFARI, H.; KAZEMIAN, A.; MOTAHAREH, R.; YAHIA, A. **Effects of pre-soaked super absorbent polymers on fresh and hardened properties of self-consolidating lightweight concrete**. Construction and Building Materials. v. 113, pp. 215-220, 2016.

BAROGHEL-BOUNY, V., 1994, **Characterization des pâtes de ciment et des bétons: methodes, analyse, interpretations**. Thèse de doctorat de L.C.P.C., Paris, France.



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

BAZANT, Z. P. (ed.) **Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete**, John Wiley and Sons, New York, 459 pp. 1988

BAZANT, Z. P.; PRASANNAN, S. **Solidification Theory for Concrete Creep I: Formulation**. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115, N° 8, 1691-1703 pp., 1989

BAZANT, Z. P.; CAROL, I. (ed.) **Creep and Shrinkage of Concrete**. Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium, E&FN Spon, London, 934 pp. 1993.

BAZANT, Z. P. **Criteria for Rational Prediction of Creep and Shrinkage of Concrete**. Revue française de génie civil, V. 3, No. 3- 4, pp. 61-89, 1999.

BAZANT Z.P., HAUGAARD A.B., BAWEJA S., ULM F. J., **Micro-prestress solidification theory for concrete creep. I. Aging and drying effects**. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 123(11), 1188-1194, 1997

BENTZ, D. P.; GEIKER, M. R.; HANSEN, K. K. **Shrinkage-reducing admixtures and early age desiccation in cement pastes and mortars**. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 7, pp. 1075-1085, 2001.

BENTZ, D. P.; WEISS, W. J. **Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review - NISTIR 7765**. U.S. Department of Commerce and National Institute of Standards and Technology, 2011.

BETTENCOURT, A.; GONÇALVES, A. **Autogenous shrinkage measurements on cement pastes: influence of w/c, cement fineness, C<sub>3</sub>A content, and superplasticizer dosage**. Relatório 431/2010 – NB, LNEC, Lisboa, 2010

BJORNSTROM, J.; MARTINELLI, A.; MATIC, A.; BORJESSON, L.; PANAS, I. **Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement**. Chemical Physics Letters, Chicago, vol. 392, pp. 242-248, 2004.

BOIVIN, S. G. **Retrait au jeune âge du béton. Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène**. Thèse de doctoral, LCPC, Paris, 2001

BOIVIN, S.; ACKER P.; RIGAUD, S. **Experimental assessment of chemical shrinkage of hydrating cement pastes**. In: Autogenous Shrinkage of Concrete - Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute, Edited by Ei-ichi Tazawa, E & FN Spon, London, 1999.

BOTASSI, S.S.; CALMON, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P.; LIDUÁRIO, A. S.; GAMBALE, E. A. **Fluência do concreto massa: análise dos modelos de previsão por meio de ensaios**. 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza-CE, IBRACON, 2010.

BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; ALBERTI, E.; MARINO, C. E. B. **Desempenho mecânico e físico-químico de concreto com adição de 1% nano-SiO<sub>2</sub>**.

In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia das Construções – CONPAT 2015. Lisboa, Portugal, 2015

BREGNA, H. E.; ROBERTS, W. O. **Colloidal Silica: Fundamentals and Applications**. Taylor & Francis Group, LLC, 2006

BROOKS, J. J.; CABRERA, J. G.; MEGAT JOHARI, M. A. **Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete**. In: Autogenous Shrinkage of Concrete - Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute, Ed. by Ei-ichi Tazawa, E & FN Spon, London — pp. 195-202, 1999.

BYUNG-WAN J., KIM, C. H., TAE, G., PARK, J. B., **Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles**. Construction and Building materials, v. 21, p. 1351-1355, 2007.

COLLEPARDI, M.; BORSOI, A.; COLLEPARDI, S. **Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions**. Cement & Concrete Composites, v. 27, pp.27 704-708, 2005.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP - Model Code 1990 Design Code**. (Bulletin d'Information N.203). [s.L.], 1991.

COSTA, E. C. **Física aplicada à construção: Conforto térmico**. 3<sup>a</sup> ed. São Paulo, Blücher, 1974

COUCH, J., LURA, P., JENSEN, O. M., AND WEISS, J. **Use of Acoustic Emission to detect Cavitation and Solidification (Time-Zero) in Cement Pastes**. Proc. RILEM Int. Conf. of Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Lyngby, Denmark, pp. 19-23, 2006.

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 de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

CUNHA, T. A., FRANCINETE, P.; MANZANO, M. A.; AIDAR, L. A.; BORGES, J. G.; SILVA, E. F. **Determination of time zero in high strength concrete containing superabsorbent polymer and nano-silica**. J Build Rehabil (2016) 1: 18. doi:10.1007/s41024-016-0020-7

CUSSON, D.; HOOGEVEN, T.: **Internally-cured high-performance concrete under restraint shrinkage and creep**. In: Pijaudier-Gabot, G.; Gerard, B. & Acker, P. (Eds.): *Concreep7 Workshop on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, Nantes, France, 12-14 September 2005*. Nantes: Ecole Centrale de Nantes, pp. 579-584, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Ed. G. C. Isaia, IBRACON, Cap. 12, pp.345-379, São Paulo, 2005

DANTAS, M. H. O. **Avaliação dos efeitos da adição nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia civil e ambiental, 101f, 2013.

DARQUENNES, A.; STAQUET, S.; DELPLANCKE-OGLETREE, M., ESPION B. **Effect of autogenous deformation on the cracking risk of slag cement concretes**. *Cement & Concrete Composites* 33, pp. 368–379, 2011

DINTEN, C. A. M. **Contribuição da Adição de Sílicas nas Propriedades do Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 133 p., 2000.

DUDZIAK, L.; MECHTCHERINE, V. **Mitigation of volume changes of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) by using Super Absorbent Polymers**. In: Proc of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Fehling E et al (eds) Kassel University Press GmbH, Germany, 425–432, 2008.

EN 196-1 - **Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength**. European Committee for Standardization (CEN), 2016

EN 197-1 – **Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements**. European Committee for Standardization (CEN), 2011

ENGLAND, G. L.; ROSS, A. D. **Reinforced concrete under thermal gradients**. *Magazine of Concrete Research*, v. 14, n. 40, 1962.

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

ESTEVEVES, L. P. **On the absorption kinetics of Superabsorbent Polymers**. Int. RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2010.

ESTEVEVES, L. P. **Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid**. *Cement & Concrete Composites*, 33, 717–724, 2011.

ESTEVEVES, L. P.; CACHIM, P. B., FERREIRA, V.M. **Effect of fine aggregate on the rheology properties of high performance cement-silica systems**. *Construction and Building Materials* 24, pp. 640-649, 2010.

ESTEVEVES, L.P. **Internal curing in cement-based materials**. Aveiro, Universidade de Aveiro, Ph.D. Thesis, 2009.

ESTEVEVES, L.P.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. **Mechanical properties of cement mortars with superabsorbent polymers**. *Adv Constr Mater*. pp. 451–462, 2007.

ESTEVEVES, L.P.; LUKOŠIŪTÈ I.; ČÈSNIENÈ, J. **Hydration of cement with superabsorbent polymers**. *J. Therm. Anal. Calorim*. 118, pp. 1385–1393, 2014

FARZADNIA, N.; NOORVAND H.; YASIN, A. M.; AZIZ, F. N. A. **The effect of nano silica on short term drying shrinkage of POFA cement mortars**. Construction and Building Materials, 95, 636-646, 2015.

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. J. **A new model for hidrated Portland cement and its practical implications**. Engineering Journal, vol. 53, n. 8/9, Ottawa, Canadá, p; 53-59, 1970

FRIEDRICH, S. V. **Superabsorbent Polymers (SAP)**. In: RILEM TC 225-SAP. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. London: Ed. Springer, Cap. 3, 2012.

FURNAS. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico, Editor Walton Pacelli de Andrade, Editora PINI, São Paulo, 1997.

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, Aparecida de Goiânia, 2015.

GAITERO, J.J.; CAMPILLO, I.; GUERRERO, A. **Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles**. Cement and Concrete Research 38, pp. 1112-1118. 2008.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2a. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, Cap. 50, p. 1712, 2007.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. USP, ed. 10, Piracicaba-SP, 1982.

GONZALEZ, M. L. S.; SILVA, E. F. e LOPES, A. N. M. **Polímeros Superabsorventes para Mitigar Retração Autógena de Concretos de Alta Resistência – Estado da Arte**. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2014 – 56CBC. 2014.

GREEN, B.H. **Development of a high-density cementitious rock-matching grout using nano-particles**. Proceedings of ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, 7 November, Denver, USA, pp. 119-130, 2006.

GRIESSER, A. **Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures: Rheology, Phase Composition, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems**. Dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology for the degree of Doctor of Technical Sciences, Zurich, 2002, 147p.

GUÉNOT-DELAHAIE, I. **Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton**. Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1996.

HAMMER, T.A.; BJØNTEGAARD, Ø. e SELLEVOLD, E.J. **Measurement methods for testing of early age autogenous strain**. In: Bentur A. (ed) Early age cracking in

cementitious systems. RILEM TC 181-EAS Committee, RILEM, Cachan, pp 234–245, 2002.

HANEHARA, S., HIRAO, H.; UCHIKAWA, H. **Relationships between autogenous shrinkage, the microstructure and humidity changes at inner part of hardened cement paste at early ages.** In: Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceedings Int. Workshop 1998, Ei-ichi Tazawa, editor, E & FN Spon, London, p. 89-100, 1999.

HARUEHANSAPONG, S.; PULNGERN, T.; CHUCHEEPSAKUL, S. **Effect of Nanosilica Particle Size on the Water Permeability, Abrasion Resistance, Drying Shrinkage, and Repair Work Properties of Cement Mortar Containing Nano-SiO<sub>2</sub>.** Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 4213690, 11 p., <https://doi.org/10.1155/2017/4213690>, 2017

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

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. **Deformações por retração e fluência.** In: ISAIA, G. C. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2005. Cap. 22, p. 655-685.

HOLT, E. **Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages.** Cement and Concrete Research, 35, 464–472, 2005

HOU, P.; KAWASHIMNA, S.; KONG, D.; CORR, D. J.; QIAN, J.; SHAH, S. P. **Modification effects of colloidal nanoSiO<sub>2</sub> on cement hydration and its gel property.** Composites Part B: Engineering, v. 45, n. 1, p. 440-448, 2013.

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

HUANG, H.; GUANG, Y. **Examining the “time-zero” of autogenous shrinkage in high/ultra-high performance cement pastes.** Cement and Concrete Research, 97, pp. 107–114, 2017

HUO, C.; AL-OMAISHI, N.; TADROS, M. K. **Creep, shrinkage and modulus of elasticity of high performance concrete.** ACI Materials Journal. Michigan – USA, v. 98, n. 6, p. 440-449, 2001

IDEKER, J. H.; DEBOODT, T.; Fu, T. **Internal curing of high-performance concrete for bridge decks: Final Report SPR 711.** Oregon Department of Transportation Research Section and Federal Highway Administration. March, 2013

IGARASHI S. I.; WATANABE, A. **Experimental study on prevention of autogenous deformation by internal curing using super-absorbent polymer particles.** In: RILEM Proc. PRO 52 Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Jensen OM, Lura P, Kovler K (eds) RILEM Publications S.A.R.L., Bagnaux, France, 77–86, 2006.

JENSEN, O. M. **Influence of cement composition on autogenous deformation and change of the relative humidity.** In: Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000, Paris, 16-17 October 2000, RILEM Proceedings, PRO 17, Cachan 143-153, 2000

JENSEN, O. M. **Thermodynamic limitation of self-desiccation.** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 1, pp. 157-164, 1995.

JENSEN, O.M. e HANSEN, P.F. **A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste.** In: Materials and Structures, Vol. 28, pp. 406-409, 1995.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background.** Cement and Concrete Research, v. 31, n. 6, p. 647-654, 2001

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

Jl, T. **Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>.** Cement and Concrete Research 35, pp. 1943-1947. 2005

JO, B.W., KIM, C.H., TAE, G., PARK, J.B. **Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles.** Cement and Concrete Composites, v.21, n.6, pp. 1351-1355, 2007

KAMALI, M.; GHAREMANINEZHAD, A. **An investigation into the influence of superabsorbent polymers on the properties of glass powder modified cement pastes.** Construction and Building Materials, 149, pp. 236–247, 2017

KATAOKA, L. T. **Análise da deformabilidade por fluência e retração e sua utilização na monitoração de pilares de concreto.** Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, São Paulo, 228p., 2010.

KHALOO A.; MOBINI, M. H.; HOSSEINI, P. **Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete,** Construction and Building Materials, 113, pp. 188–201, 2016

KLEMM, A.; SIKORA K. **Superabsorbent polymers in cementitious composites.** Construction Materials and Structures, 57 – 67, 2012.

KOJIMA, T.; TAKAGI, N.; HORIKAWA, S. **Study on Shrinkage Characteristics of High-Strength Silica Fume Concrete.** In: V. M. Malhotra (ed) Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, pp. 719-735, Chennai, India, 2001

KONG, X. M.; ZHANG, Z. L.; LU, Z. C. **Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete.** Materials and Structures, v. 48, n. 9, p. 2741-2758, 2014.

KONTOLEONTOS, F.; TSAKIRIDIS, P. E.; MARINOS, A.; KALOIDAS, V.; KATSIOTI, M. **Influence of colloidal nanosilica on ultrafine cement hydration:**

**Physicochemical and microstructural characterization.** Construction and Building Materials, v. 35, n. 0, p. 347-360, 2012.

KOVLER, K. **Effect of Superabsorbent Polymers on the Mechanical Properties of Concrete.** In: RILEM TC 225-SAP. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. London: Ed. Springer, Cap. 8, 2012

KUMAR, M. M.; MARUTHACHALAM, D. **Experimental Investigation on Self-curing Concrete.** International Journal of Advanced Scientific and Technical Research Issue 3, volume 2, March-April, 2013

KUMM, T.C. **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 159p. 2009.

LAM, H.; HOOTON R. D. **Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability.** In: Proc. 4 th Int. Sem. on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology, Persson B, Bentz D, Nilsson LO (eds) Lund University, Lund, Sweden, 210–228, 2005.

LAUSTSEN, S.; HASHOLT, M.T. e JENSEN, O.M. **Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete.** In: Materials and Structures. Vol. 48 (1-2), p. 357-368. 2015.

LAZARO, A., BROUWERS, H.J.H., QUERCIA, G., GEUS, J.W. **The properties of amorphous nano-silica synthesized by the dissolution of olivine.** Chemical Engineering Journal 211-212, pp. 112-121, 2012

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável.** 2007. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

LEÓN, N.; BERNAL, J.; MORAGUES, A.; SANCHEZ-ESPINOSA, E. **Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nanosílice y microsílice.** In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia das Construções – CONPAT 2015. Lisboa, Portugal, 2015b.

LEÓN, N.; MASSANA, J.; MORAGUES, A.; SANCHEZ-ESPINOSA, E. **Influencia de la adición de nanosílice, microsílice y mezcla de ambas en un hormigón autocompactante sometido a ciclos de hielo-deshielo y carbonatación.** In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia das Construções – CONPAT 2015. Lisboa, Portugal, 2015a.

LI, G. **Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>.** Cement and Concrete Research 34, pp. 1043-1049. 2004.

LI, H.; WEE, T. H.; WONG, S. F. **Early age creep and shrinkage of blended cement concrete.** ACI Materials Journal. Michigan – USA, v. 99, n. 1, p. 3-10, 2002.

LI, H., XIAO, H. G., OU, J. P. **A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials.** Cement and Concrete Research 34, pp. 435-438, 2004.

LI, H., ZHANG, M., OU, J., **Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement,** Wear, v. 260, n. 11-12, pp. 1262-1266, 2006.

LIN, K.L.; CHANG, W.C.; LIN, D.F.; LUO, H.L.; TSAI, M.C. **Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar.** Journal of Environmental Management 88, pp. 708-714. 2008

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

LOPES, A.N. M.; SILVA, E. F.; TOLEDO FILHO, R. D. e DAL MOLIN, D. S. C. **Propriedades Mecânicas, Retração Autógena e por Secagem de Concretos de Alta Resistência contendo Aditivo Redutor de Retração.** In: XXXV – Jornadas Sul Americanas da Engenharia Estrutural. Rio de Janeiro, 2012.

LOPES, A. N. M.; SILVA, E. F.; DAL MOLIN, D. C. C. e TOLEDO FILHO, R. D. **Shrinkage-Reducing Admixture: Effects on Durability of High-Strength Concrete.** ACI Materials Journal; Vol. 110 Issue 4, p365, 2013.

LOPEZ, M.; KAHN, L.F.; KURTIS, K.E.: **High-strength self-curing low-shrinkage concrete for pavement applications.** In: *International Journal of Pavement Engineering* 11, No. 5, pp. 333-342, 2010.

LOUKILI, A.; CHOPIN, D.; KHELIDJ, A.; TOUZO, J. **A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history.** Cement and Concrete Research, 30, 915-922, 2000.

LURA, P., **Autogenous deformation and internal curing of concrete.** Doctoral thesis, Delft, Netherlands, april., 2003.

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

LURA, P.; DURAND, F.; JENSEN, O.M. **Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers.** in International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, O.M. Jensen, P. Lura, and K. Kovler, Editors. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2006a.

LURA P., MAZZOTTA G.B., RAJABIPOUR F., WEISS J.: **Evaporation, settlement, temperature evolution, and development of plastic shrinkage cracks in mortars with shrinkage-reducing admixtures,** International RILEM-JCI Seminar ConcreteLife'06, Pro 46, pp. 203-214, 2006b.

LURA P; DURAND, F; LOUKILI, A; KOVLER, K. JENSEN, O.M. **Compressive strength of cement pastes and mortars with superabsorbent polymers.** In: Jensen O.



M, Lura P, Kovler K, editors. RILEM proc. PRO 52, volume changes of hardening concrete: testing and mitigation. Bagnex (France): RILEM Publications SARL, p. 117–226, 2006c.

LURA, P.; JENSEN, O. M.; IGARASHI, S. I. **Experimental observation of internal water curing of concrete**. *Materials and Structure* 40: 211–220, 2007a.

LURA, P. e JENSEN, O.M. **Measuring Techniques for Autogenous Strain of Cement Paste**, *Materials and Structures*. Vol. 40 (4) 431-440, 2007b.

LURA, P.; FRIEDEMANN, K.; STALLMACH, F.; MÖNNIG S; WYRZYKOWSKI, M. e ESTEVES; L. P. **Kinetics of Water Migration in Cement-based Systems containing Superabsorbent Polymers**. In: RILEM TC 225-SAP. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. London: Ed. Springer, Cap. 4, 2012.

MA, X.; LIU, J.; WU, Z.; SHI, C. **Effects of SAP on the properties and pore structure of high performance cement-based materials**. *Construction and Building Materials*, v. 131, pp. 476-484, 2017

MAGLIANO, M. V. M. **Sílica Coloidal como Agente Ligante e Fonte Multizadora em Concretos Refratários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 163 p., 2009.

MANZANO, M. A. R.; TRALDI, C. L.; SILVA, E. F. e LOPES, A. N. M. **Mecanismo de Atuação dos Polímeros Superabsorventes na Hidratação de Materiais Cimentícios**. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2014 – 56CBC. 2014.

MANZANO, M. A. R.; NETO, W. N. A.; SILVA, E. F. e LOPES, A. N. M. **Análise da Caracterização de um Polímero Superabsorvente Utilizado em Materiais Cimentícios**. In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção. Lisboa, Portugal, 2015.

MANZANO, M. A. R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência modificados com Polímeros Superabsorventes (PSAs) como Agentes de Cura Interna**. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2016, 324p.

MECHTCHERINE, V.; DUDZIAK, L.; HEMPEL, S. **Mitigating early age shrinkage of ultrahigh performance concrete by using super absorbent polymers (SAP)**. In: Tanabe T, et al., editors. Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete structures – CONCREEP-8. London, UK: Taylor & Francis Group. p. 847–53, 2009.

MECHTCHERINE, V.; DUDZIAK, L.; SCHULZE, J. **Internal curing by superabsorbent polymers (SAP) - Effects on material properties of self-compacting fibre-reinforced high performance concrete**. in International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, O.M. Jensen, P. Lura, and K. Kovler, Editors. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2006.

MECHTCHERINE, V.; SCHROEFL, C.; GEORGES, M. **Effectiveness of various superabsorbent polymers (SAP) in mitigating autogenous shrinkage of cement-**

**based materials.** Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9). [S.l.]: American Society of Civil Engineers. 2013.

MECHTCHERINE, V.; GORGES, M.; SCHROEFL, C.; BRAMASHUBER, W.; RIBEIRO, A.B.; CUSSON, D.; SILVA, E. F.; ICHIMIYA, K.; IGARASHI, S.; KOVLER, K.; LOPES, A. N. M.; LURA, P.; REINHARDT, H. W.; FILHO, R. D. T.; WEISS, J.; YE, G. **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.** In: Materials and Structures. 47, 541–562, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 3a. ed. São Paulo: IBRACON, 674 p, 2014.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 2008.

MÖNNIG, S. **Superabsorbing additions in concrete – applications, modelling and comparison of different internal water sources.** Tese doutorado, Universidade de Stuttgart, Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental. Stuttgart - Alemanha, 164pp, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers.** 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc, United States of America, 2003

MORAES, M. Q. **Contribuição aos estudos da influência da nanossílica nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade de concretos para produção em centrais e para fabricação de pré-moldados.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 144f., 2012.

MORAES, M. Q.; LOPES, R. R. **Análise da contribuição de adições de microssílica e nanossílica na resistência à compressão de concretos convencionais.** 2010. 81p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MOUNANGA, P.; LOUKILI, A.; KHELIDJ, A. **Influence of Superplasticizer on Activatin Energy and Autogenous Shrinkage of Cement Paste at Early Age.** ACI Special Publication, vol. 217, pp. 513-528, 2003

NANNI, L. F. e RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos.** CPGE/UFRGS, Caderno Técnico 17, Porto Alegre-RS, pp. 193, 1987

NANOFORUM REPORT. European Nanotechnology Getaway. **Nanotechnology and Construction**, November, pp. 8-12, 2006.

NEVILLE, A. M. **Creep of concrete: plain, reinforced and prestressed.** 1<sup>st</sup> Edition. Amsterdam-Holland: North-Holland Publishing Company, 1970.

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

ORDÓÑEZ, S. T. L. **Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de**

**Retração.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p. 2013.

ORDOÑEZ, S. T. L.; SILVA, E. F.; BAUER, E. e LOPES, A. N. M. **Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com adição de Polímeros Superabsorventes.** In: 4º Congresso Nacional da Construção. Coimbra – Portugal, 2012.

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

PIÉRARD, J., POLLET, V.; CAUBERG, N. **Mitigating autogenous shrinkage in HPC by internal curing using superabsorbent polymers.** In: International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, O.M. Jensen, P. Lura, and K. Kovler, Editors. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2006.

PLANK, J.; DAI, Z.; ZOUAOUI, N.; VLAD, D. **Intercalation of Polycarboxylate Superplasticizers into C<sub>3</sub>A Hydrate Phases.** ACI Special Publication, VOL. 239, pp. 201-214, 2006

POURJAVADI, A.; FAKOORPOOR, S. M.; KHALOO, A.; HOSSEINI, P. **Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO<sub>2</sub> particles.** Materials and Design 42, pp. 94–101, 2012.

POWERS, T. C. **Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste.** In: **International symposium of the structure of concrete and its behaviour under load.** Proceedings., Cement and Concrete Association, London, p. 319-344, 1965.

POWERS, T. C. **The thermodynamics of volume change and creep.** Matériaux et Constructions, v. 1, n. 6, p. 487-506, 1968.

POWERS, T.C., **Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process.** Industrial and Engineering Chemistry 27(7) 790-794, 1935

POWERS, T. C.; BROWNYARD, T. L. **Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste.** In: Research Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin 22, pp. 101-132, 1948.

QIAN, C.; ZHANG, Y.; HUANG, H.; QU, J.; GUO, J. **Influences of superplasticizers on the basic and drying creep of concrete.** Structural Concrete, 17, No. 5, pp. 729-735, 2016

QING, Y.; ZENAN, Z.; DEYU, K.; RONGSHEN, C. **Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume.** Construction and Building Materials 21, pp. 539-545, 2007.

QUERCIA, G. **Application of nano-silica in concrete.** PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, 2014

RAO, S. V.; BRITO, J.; SILVA, P. R. **Comportamento mecânico e durabilidade de argamassas auto-compactáveis produzidas em misturas ternárias de nano sílica (SiO<sub>2</sub>) e nano titânio (TiO<sub>2</sub>).** In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia das Construções – CONPAT 2015. Lisboa, Portugal, 2015.

REINHARDT, H.W. e ASSMANN, A. **Effect of SAPs on Drying Shrinkage, Porosity and Setting of Concrete.** In: International RILEM Conference on Material Science – MATSCI, Aachen – Vol. III, AdIPoC. 2010.

RILEM. **State-of-the-art report of the Rilem Technical Committee 196-ICC: Internal curing of concrete.** Ed. Springer, 2007.

RILEM. **Application of superabsorbent polymer (SAP) in concrete construction: state of the art report technical committee TC-225-SAP.** 167 p., London: Springer, 2012.

RINDER, T.: **Hochfester Beton unter Dauerzuglast.** Stuttgart, University of Stuttgart, Department of Construction Materials, Dissertation, 2002.

SAKATA, K.; AYANO, T. **Effect of ambient temperature and humidity on creep and shrinkage of concrete.** In: MANASEER, A. The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage – Structural Design Effects. USA, ACI International, p. 215-235, 2000.

SAKKA, S.; KOSUKO, H. **Handbook of sol-gel science and technology.** Volume I: Sol-gel Processing. Kluwer Academic Publisher, New York, USA, pp. 9-10. 2000.

SADRMOMTAZI, A., FASIHI, A., BALALAEI, F., HAGHI, A. K. **Investigation of mechanical and physical properties of mortars containing silica fume and nano-SiO<sub>2</sub>.** In: The third international conference on concrete and development, Tehran, Iran: Building and Housing Research Center, p. 1153-61, 2009.

SADRMOMTAZI, A., BARZEGAR, A. **Assessment of the effect of nano-SiO<sub>2</sub> on physical and mechanical properties of self-compacting concrete, Coventry University and the university of Wisconsin Milwaukee Centre for By-products Utilization.** In: Second International Conference on sustainable Construction Materials and Technologies, 2010.

SADRMOMTAZI, A., FASIHI, A. **The role of nano-SiO<sub>2</sub> in the mechanical properties of RHA composite cement mortars.** Nanotechnology and Nanoscience; vol. 2, p. 42-45, 2011

SANT, G.; LURA, P; WEISS, J. **A discussion of analysis approaches for determining ‘time-zero’ from chemical shrinkage and autogenous strain measurements in cement paste.** International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Ed. O. M. Jensen, P. Lura, K. Kovler, RILEM Publications SARL, pp. 375 -383, 2006a

SANT, G., RAJABIPOUR, F., FISHMAN, P., LURA P. AND WEISS, J., **Electrical conductivity measurements in cement paste at early ages.** Proc. Int. Conf. on Advanced Testing of Fresh Cementitious Materials, Stuttgart, Germany, August, 2006b

SANTOS, S. B. **Análise da fluência do concreto massa nas primeiras idades: influência de ativos plastificantes e adições minerais**. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre-RS, 262p. 2011

SANTOS, T. A. C. **Estudo da adição de polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 144 p., 2016.

SANTOS, T. A. C.; AIDAR, L. A. G.; BORGES, J. G.; FRANCINETE JR., P.; MANZANO, M. A. R.; SILVA, E. F. **Determinação do Tempo de Transição Suspensão-Sólido (Tempo Zero) em Microconcretos de Alta Resistência Contendo Polímero Superabsorvente e Nanossílica**. Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT 2016, Belém-PA, 2016.

SEARA-PAZ, S.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; GONZÁLEZ-TABOADA, I. **Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage**. Construction and Building Materials, 122, 95–109 pp., 2016

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. **Innovation in use and research on cementitious material**. Cement and Concrete Research, Montreal, Canada, 38, n. Special Issue - The 12th International Congress on the Chemistry of Cement, pp. 128–136, 2008.

SEFFF, L. **Efeito da adição de micro e nanossílica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento**. Florianópolis: Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 169 p, 2009a

SEFFF, L., LABRINCHA, J.A., FERREIRA, V.M., HOTZA, D., REPETTE, W.L. **Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars**. Construction and Building Materials 23, pp. 2487-2491, 2009b

SEFFF, L.; HOTZA, D., REPETTE, W. L.; FERREIRA, V. M.; LABRINCHA, J. A. **Mortars with nano-SiO<sub>2</sub> and micro-SiO<sub>2</sub> investigated by experimental design**. Construction and Building Materials 24, pp. 1432-1437, 2009c

SHARIQ, M.; PRASAD, J.; ABBAS, H. **Creep and drying shrinkage of concrete containing GGBFS**. Cement and Concrete Composites, 68, pp. 35-45, 2016

SHEN, D.; JIANG, J.; JIAO, Y.; SHEN, J.; JIANG, G. **Early-age tensile creep and cracking potential of concrete internally cured with pre-wetted lightweight aggregate**. Construction and Building Materials, 135, pp. 420–429, 2017

SHEN, D.; SHI, H.; TANG, X.; JI, Y. JIANG, G. **Effect of internal curing with superabsorbent polymers on residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens**. Construction and Building Materials, v. 120, p. 309-320, 2016

SHEN, D.; WANG, X.; DABAO, C.; ZHANG, J.; JIANG, G. **Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age.** Construction and Building Materials, 106, pp. 512-522, 2016

SHIH, J. Y., CHANG, T. P., HSIAO, T. C. **Effect of nano-silica on characterization of Portland cement composite.** Materials Science and Engineering A 424, pp. 266-274, 2006.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração.** Rio de Janeiro: Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 307 p, 2007.

SILVA, E. F.; LOPES, A.N. M.; TOLEDO FILHO, R. D. e FAIRBAIRN, E. M. R. **Aditivo Redutor de Retração: Efeito na Retração Autógena, Propriedades Reológicas, Mecânicas e Térmicas, em Concretos de Alto Desempenho.** In: XXXIII – Jornadas Sul Americanas da Engenharia Estrutural. Santiago - Chile. 2008.

SILVA, E. F.; LOPES, A.N. M.; TOLEDO FILHO, R. D. e 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 Sul Americanas da Engenharia Estrutural. San Juan - Argentina. 2010.

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

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

SILVA, E. F.; LOPES, A.N. M.; TOLEDO FILHO, R. D. e FAIRBAIRN, E. M. R. **Resistência à tração direta de concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração.** In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON. Florianópolis, Santa Catarina. 2011c.

SILVA, E. F.; LOPES, A.N. M.; TOLEDO FILHO, R. D. e FAIRBAIRN, E. M. R. **Módulo de Elasticidade de Concretos de Alta Resistência (CAR) contendo Aditivo Redutor de Retração (ARR).** In: XXXV – Jornadas Sul Americanas da Engenharia Estrutural. Rio de Janeiro. 2012

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

SILVA, E. F.; LOPES, A. N. M.; CLARO, G. P. e SARAIVA, L. M. **Técnica do Ultrassom para determinar o Tempo-Zero de Microconcretos de Alta Resistência.** In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON. Gramado, Rio Grande do Sul. 2013b.

SILVA, E. F.; R. MANZANO, M. A. R. LOPES, A.N. M. e TOLEDO FILHO, R. D. **Effect of SAP on the Autogenous Shrinkage and Compressive Strength of High-Strength Fine-Grained Concrete.** In: International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction, Dresden, p. 211-219, 2014.

SOBOLEV, K.; FERRARA, M. **How nanotechnology can change the concrete world - Part 1.** American Ceramic Bulletin 84 (10), pp. 14-17, 2005a.

SOBOLEV, K.; FERRARA, M. **How nanotechnology can change the concrete world- Part 2.** American Ceramic Bulletin 84 (11), pp. 16-20, 2005b.

SOBOLEV, K.; FLORES, I.; HERMOSILLO, R. **Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites.** In Proceedings of ACI Session on "Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives". American Concrete Institute, 7 November, Denver, U.S.A., pp. 91-118, 2006.

SUAREZ, M. L. G. **Polímeros Super Absorventes (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos de alta resistência.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2015. 82 p.

TANABE, T.; SAKATA, K.; MIHASHI, H; SATO, R.; MAEKAWA, K.; NAKAMURA (ed.) **Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures.** Proceedings of the Eighth International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, vol. 1 e 2, JAPAN, 2008

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry.** 2. Ed. London: Thomas Telford, 1997.

TAZAWA, E. **Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete – “Committee Report”** – In: Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute, edited by Ei-Chi Tazawa, E & FN Spon, London 1999.

TAZAWA, E., MIYAZAWA, S., **Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete.** In: Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute, edited by Ei-Chi Tazawa, E & FN Spon, London, pp. 269-280, 1999.

THUADAIJ, N.; NUNTIYA, A. **Synthesis and characterization of nanosilica from rice husk ash prepared by precipitation method.** Journal of Natural Science. Special Issue on Nanotechnology 7(1), pp. 59-65, 2008.

TOLEDO FILHO, R.D.; SILVA, E.F.; LOPES, A.N.M.; MECHTCHERINE, V. e DUDZIAK, L. **Effect of Superabsorbent Polymers on the Workability of Concrete and Mortar.** In: RILEM TC 225-SAP. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. London: Ed. Springer, Cap. 5, 2012.

TRALDI, C. L.; AGUIRRE, L. M.; SILVA, E. F.; LOPES, A. N. M. **Polímero superabsorvente como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos.** In: Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, 2014, Montevideu. Anais Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, 2014.

ULM, F.-J., ACKER, P. **Le poit sur le fluage et la recouvrance des betons**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1997.

VELASCO, R. V. **Concretos Auto-Adensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço: Propriedades Reológicas, Físicas, Mecânicas e Térmicas**. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 349p., 2008

WEBER, S.; REINHARDT, H. W. **A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Autogenous Curing**. Advanced Cement Based Materials, 6, pp. 59-68, 1997.

Wei, Y.; Guo, W., Liang, S. **Microprestress-solidification theory-based tensile creep modeling of early-age concrete: Considering temperature and relative humidity effects**. Construction and Building Materials, 127, pp. 618–626, 2016

WEISS, J. **Experimental determination of the “time-zero” to (maturity  $M_0$ )**. In: K. Kovler, A. Bentur (Eds.), International RILEM Conference on Early Age Cracking in Cementitious Systems—EAC', RILEM TC 181-EAS, Haifa, pp. 195–206, 2002

WEISS, J.; LURA, P.; RAJABIPOUR, F.; SANT, G. **Performance of Shrinkage-Reducing Admixtures at Different Humidities and at Early Ages**. ACI Materials Journal, 105(5), 478–486, 2008.

YOUNG, J. F. **Physical Mechanisms and their Mathematical Descriptions**. In: Bazant, Z. P. Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete. USA John Wiley & Sons Ltd, p. 63-98, 1988.

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, 28(5), pp. 298–309, 2016. DOI: 10.1680/jadcr.15.00083

ZINGG, A.; WINNEFELD, F.; HOLZER, L.; PAKUSCH, J.; BECKER, S.; FIGI, R.; GAUCKLER, L. **Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different  $C_3A$  amounts**. Cement & Concrete Composites, 31, pp. 153–162, 2009



## APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Tabela A1 - Caracterização das propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V ARI

Propriedades		Resultado CP V ARI	Exigências segundo NBR 5733	Método de ensaio
Finura	Resíduo na # ABNT 200 (%)	0,4	≤ 6,0	NBR 11579/2012
	Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5440	≥ 3000	NBR 16372/2015
Água de consistência da pasta normal (%)		32,4	n.e	NBR NM 43/2003
Tempo de pega	Início de Pega (h:min)	02:30	≥ 1:00	NBR NM 65/2003
	Fim de Pega (h:min)	03:10	≤ 10:00	
Expansão em autoclave (%)		0,03	n.e.	ACTM C 151
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	32,1	≥ 14,0	NBR 7215/1996
	3 dias	37,2	≥ 24,0	
	7 dias	41,8	≥ 34,0	
n.e = não especificado				

Tabela A2 - Componentes químicos do cimento CP V ARI

Componentes Químicos		Resultado CP V ARI	Exigência segundo NBR 5733	Método de ensaio
Perda ao fogo (%)		1,82	≤ 4,5	NBR NM 18/2012
Resíduo insolúvel (%)		0,79	≤ 1,0	NBR NM 15/2012
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)		3,28	**	NBR NM 16/2012
Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> ) (%)		5,57	n.e	
Óxido de magnésio (MgO) (%)		4,36	≤ 6,5	NBR NM 11-2/2012
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) (%)		24,41	n.e	
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)		3,02	n.e	
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)		7,09	n.e	
Óxido de cálcio (CaO) (%)		53,74	n.e	
Óxido de cálcio livre (CaO) (%)		2,16	≤ 3,0	NBR NM 13/2012
Álcalis totais (%)	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,29	n.e	NBR NM 17/2012
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,77	n.e	
	Equivalente alcalino em (Na <sub>2</sub> O)	0,80	n.e	
Álcalis solúveis em água (%)	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,18	n.e	
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,64	n.e	
	Equivalente alcalino em (Na <sub>2</sub> O)	0,60	n.e	
** Quando C <sub>3</sub> A do clínquer < 8% - limite < 3,0				
** Quando C <sub>3</sub> A do clínquer > 8% - limite < 4,5				
n.e – não especificado				

Tabela A3 - Componentes químicos e propriedades físicas do cimento CEM I 42,5 R

Componentes Químicos		Resultado CEM I 42,5 R	Método de ensaio
Perda ao fogo (%)	em 105°C	0,2	EN 196-2 secção 7
	em 1050°C	4,1	
	em 950°C	4,1	
Resíduo insolúvel (%)		1,11	EN 196-2 secção 9
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)		2,89	EN 196-2 secção 8
Óxido de magnésio (MgO) (%)		1,59	EN 196-2 secção 13.13
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) (%)		18,36	EN 196-2 secções 13.4 e 13.9
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)		3,41	LNEC E 406
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)		5,06	EN 196-2 secção 13.11
Óxido de cálcio (CaO) (%)		61,42	EN 196-2 secção 13.12
Teor de cloretos (%)		0,03	EN 196-2 secção 14
Álcalis totais (%)	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,10	EN 196-2 secção 17
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	1,02	
	Equivalente alcalino em (Na <sub>2</sub> O)		
Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		3500	EN 196-6
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		3130	

Tabela A4 - Caracterização física e química da sílica ativa utilizada

Propriedades determinadas		Resultado Sílica ativa	Exigências NBR 12653/12	Método de ensaio	
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		2210	n.e	NBR NM 23/2001	
Componentes químicos (%)	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

Tabela A6 - Caracterização do agregado miúdo

Características	Areia Natural	Exigências segundo NBR 7211	Método de ensaio
Dimensão máxima Característica (mm)	4,75	n.e	NBR NM 248
Módulo de finura	2,67	n.e	
Coefficiente de inchamento médio	1,37	n.e	NBR 6467
Umidade crítica (%)	2,9	n.e	
Absorção (%)	0,3	n.e	NBR NM 30
Massa específica na condição seca (kg/m <sup>3</sup> )	2630,0	n.e	NBR NM 52
Massa específica na condição SSS (kg/m <sup>3</sup> )	2640,0	n.e	
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2650,0	n.e	
Teor de matéria orgânica (+/- clara)	+ clara	+ clara	NBR NM 49
Massa unitária no estado solto – seco (kg/m <sup>3</sup> )	1624,6	n.e	NBR NM 45
Teor de material pulverulento (%)	4,14	3%* 5%**	NBR NM 46
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,03	3%	NBR 7218
n.e = não especificado			
* Concreto submetido ao desgaste superficial			
** Concretos protegidos do desgaste superficial			

Tabela A7 - Caracterização do agregado graúdo

Características	Brita	Exigências segundo NBR 7211	Método de ensaio
Dimensão máxima Característica (mm)	12,5	n.e	NBR NM 248
Módulo de finura	5,95	n.e	
Índice de forma pelo paquímetro (c/e)	1,9	n.e	NBR 7809
Absorção (%)	0,3	n.e	NBR NM 53
Massa específica na condição seca (kg/m <sup>3</sup> )	2770,0	n.e	
Massa específica na condição SSS (kg/m <sup>3</sup> )	2730,0	n.e	
Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2710,0	n.e	NBR NM 45
Massa unitária no estado solto – seco (kg/m <sup>3</sup> )	1546,9	n.e	
Massa unitária no estado solto – SSS (kg/m <sup>3</sup> )	1624,6	n.e	
Índice de Volume de Vazios - M. Unit. Solto (%)	44,16	n.e	
Massa Unit. Estado Compactado - Seco - (kg/m <sup>3</sup> )	1618,5	n.e	
Massa Unit. Estado Compactado - SSS - (kg/m <sup>3</sup> )	1629,8	n.e	
Índice de Volume de Vazios (%)	41,57	n.e	NBR 7218
Teor de Material pulverulento (%)	1,52	2,0%	
n.e = não especificado			

## APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS

### B.1 – Tempo Zero do concretos

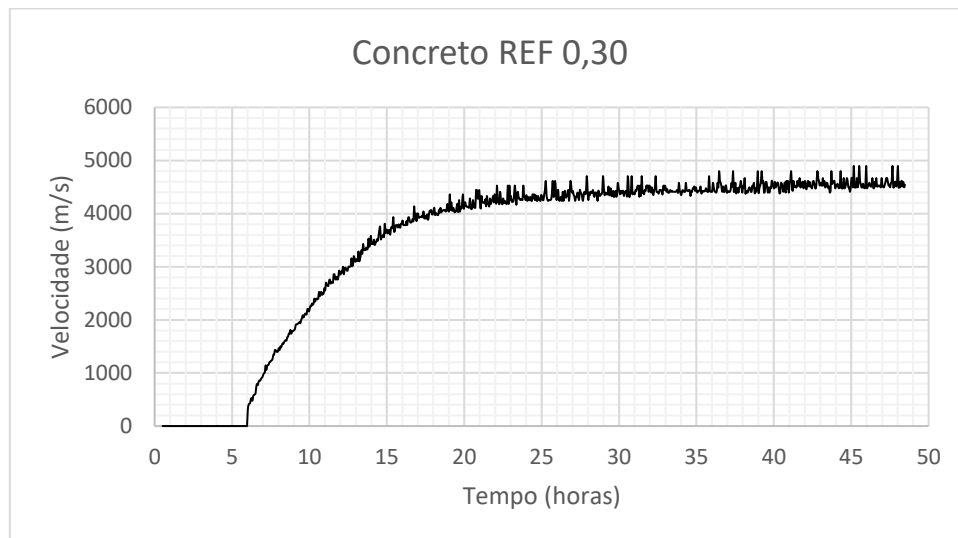


Figura B1 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto REF 0,30

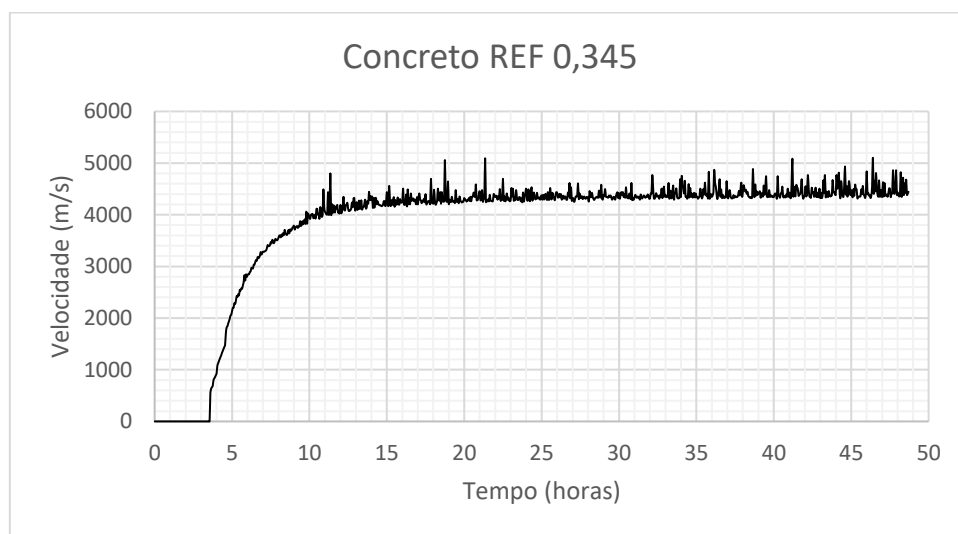


Figura B2 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto REF 0,345

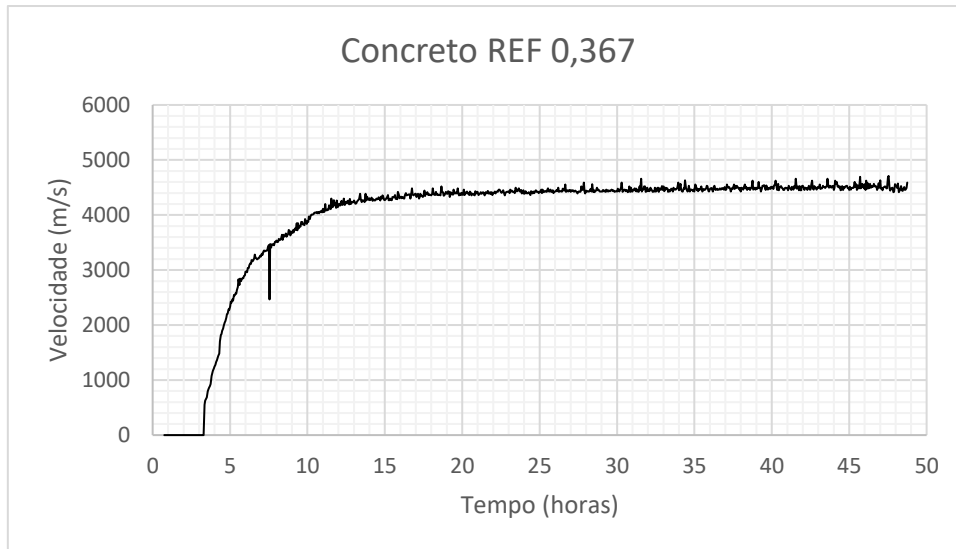


Figura B3 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto REF 0,367

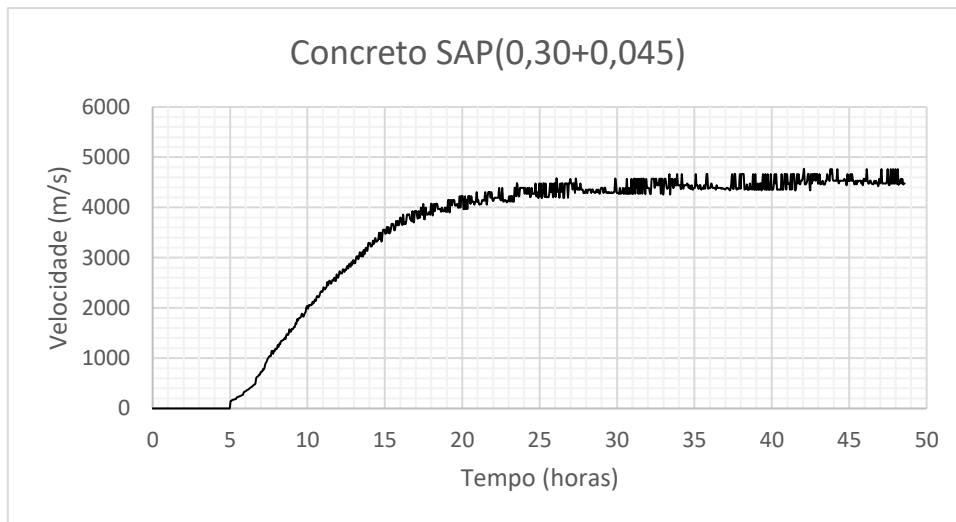


Figura B4 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto SAP(0,30+0,045)

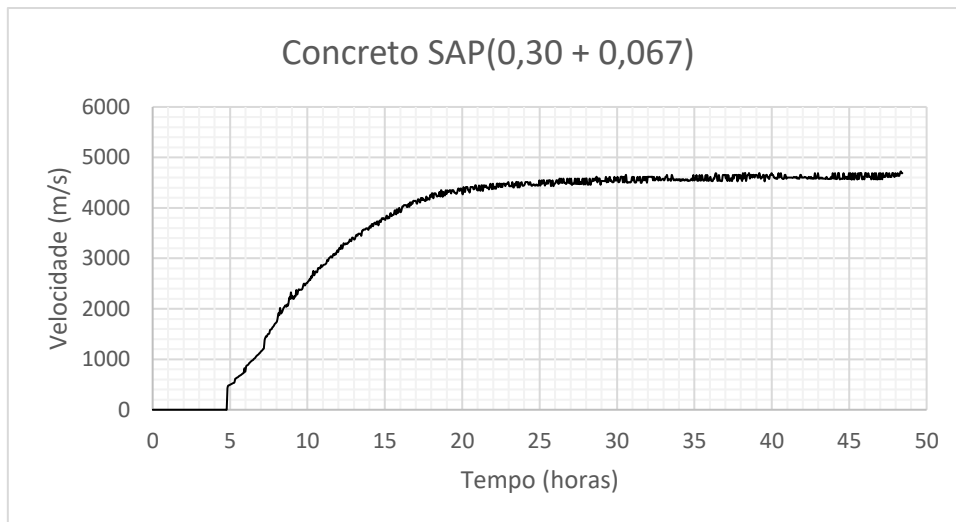


Figura B5 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto SAP(0,30+0,067)

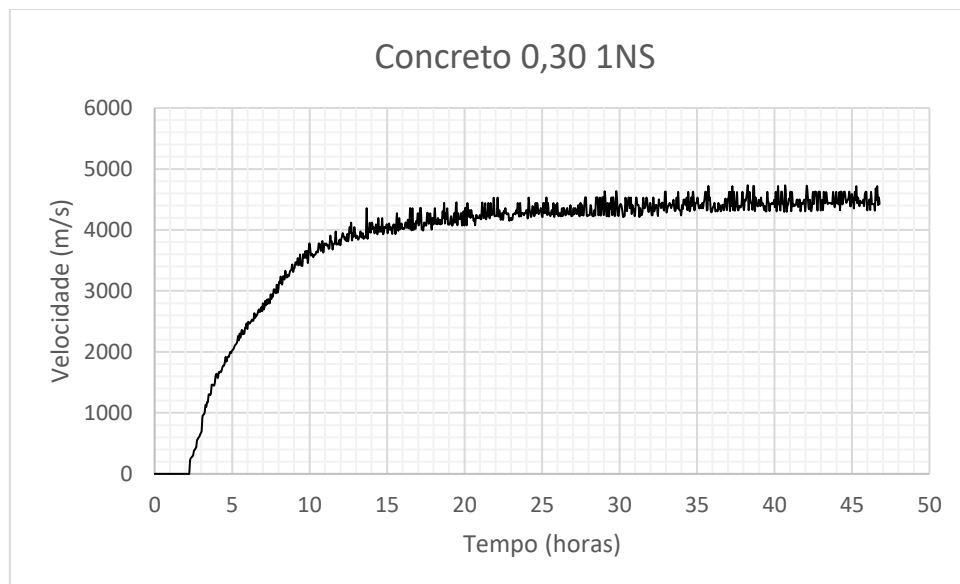


Figura B6 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto 0,30 1NS

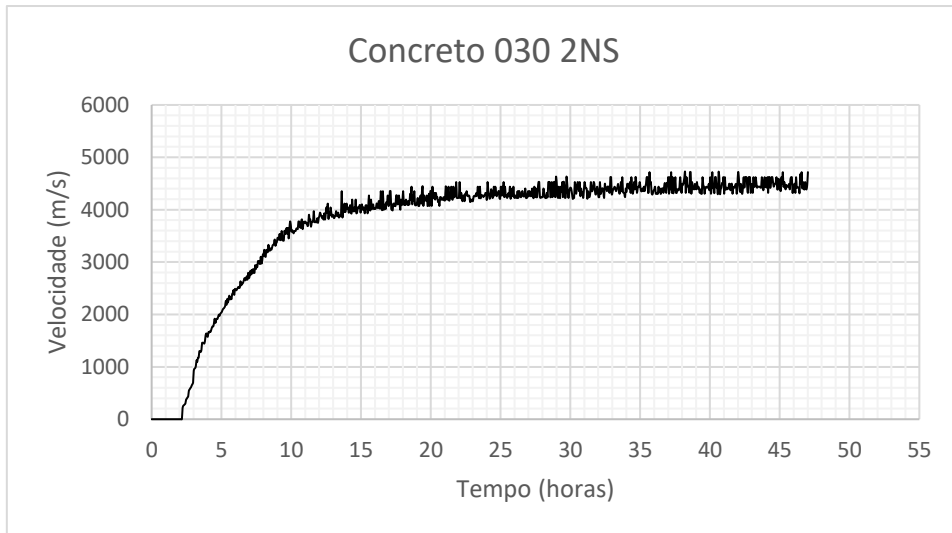


Figura B7 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto 0,30 2NS

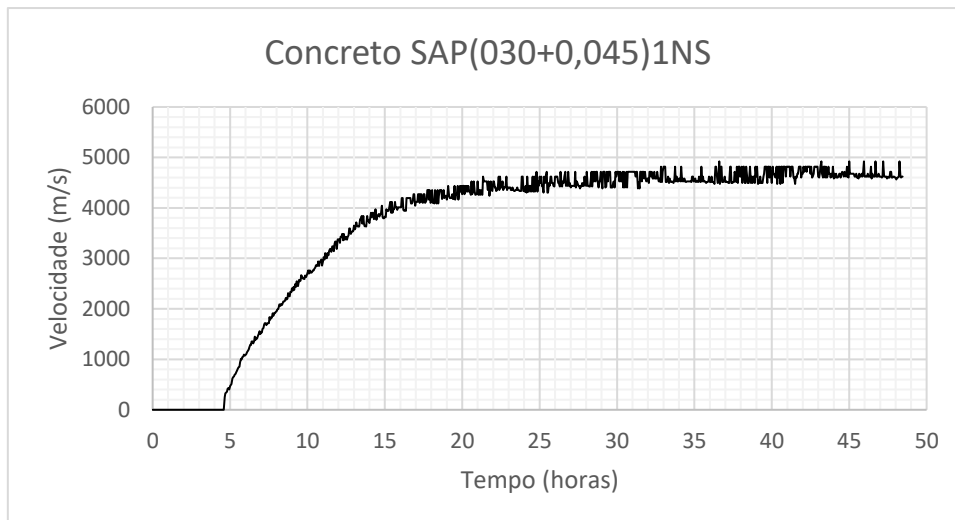


Figura B8 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto SAP(0,30+0,045)1NS

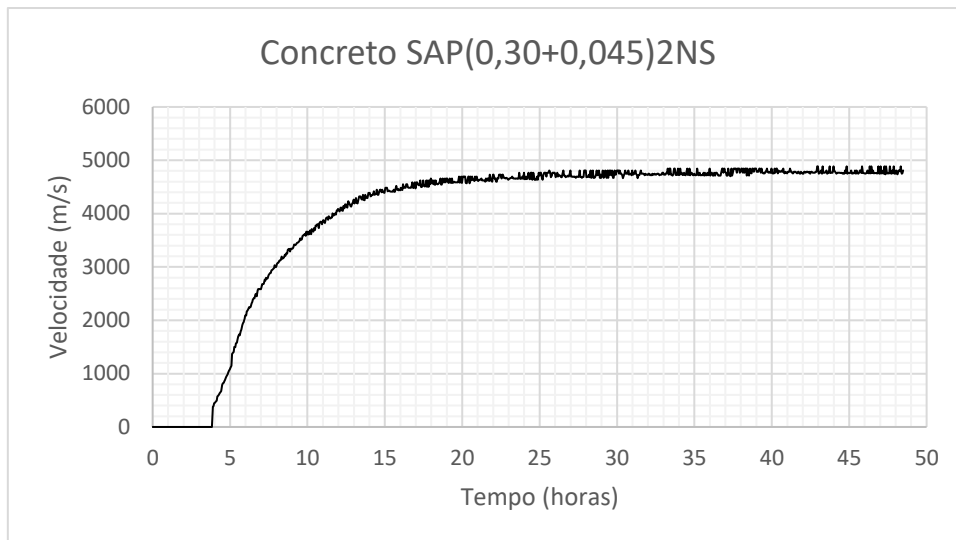


Figura B9 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto SAP(0,30+0,045)2NS

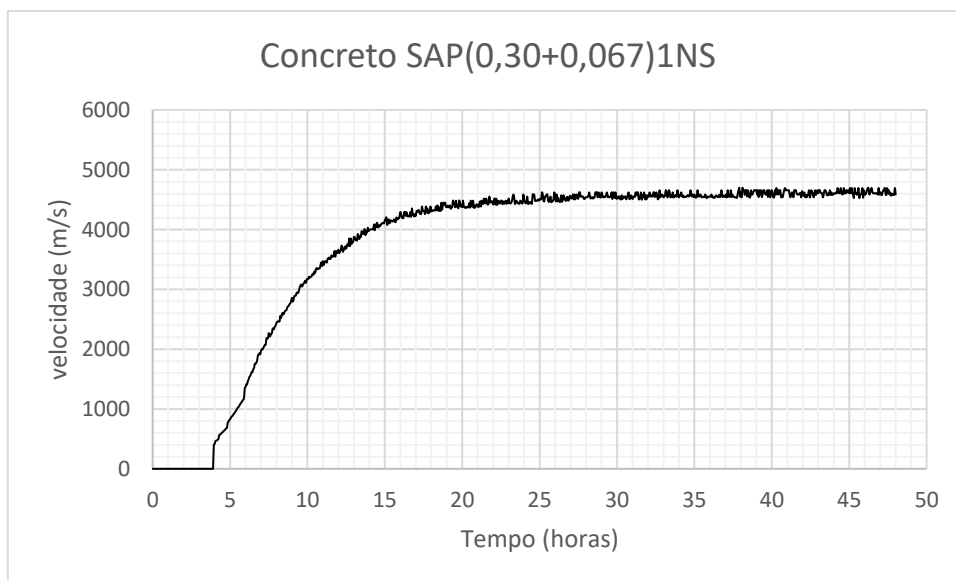


Figura B10 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto SAP(0,30+0,067)1NS



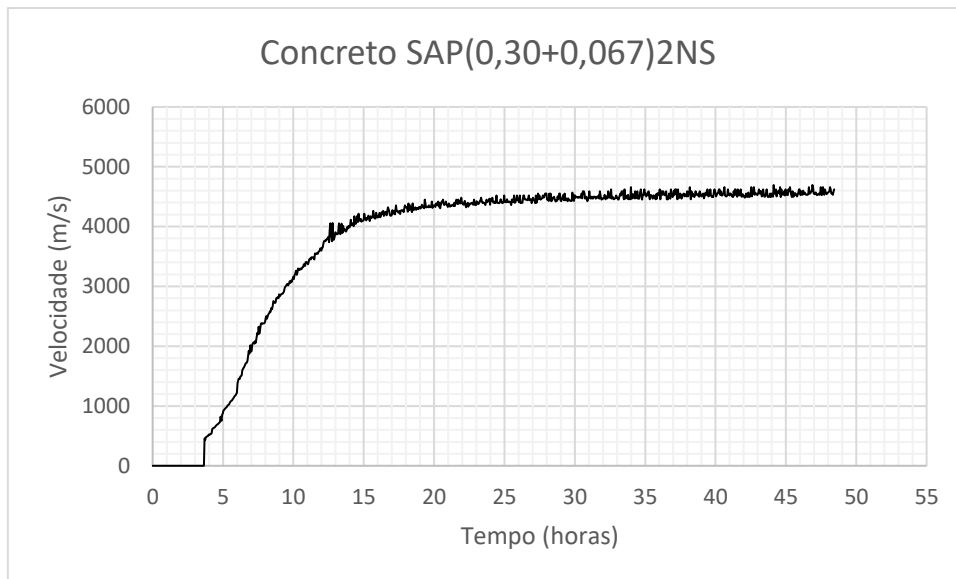


Figura B11 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus tempo para determinação do tempo zero do concreto SAP(0,30+0,067)2NS

## B.2 – Tempo Zero das argamassas

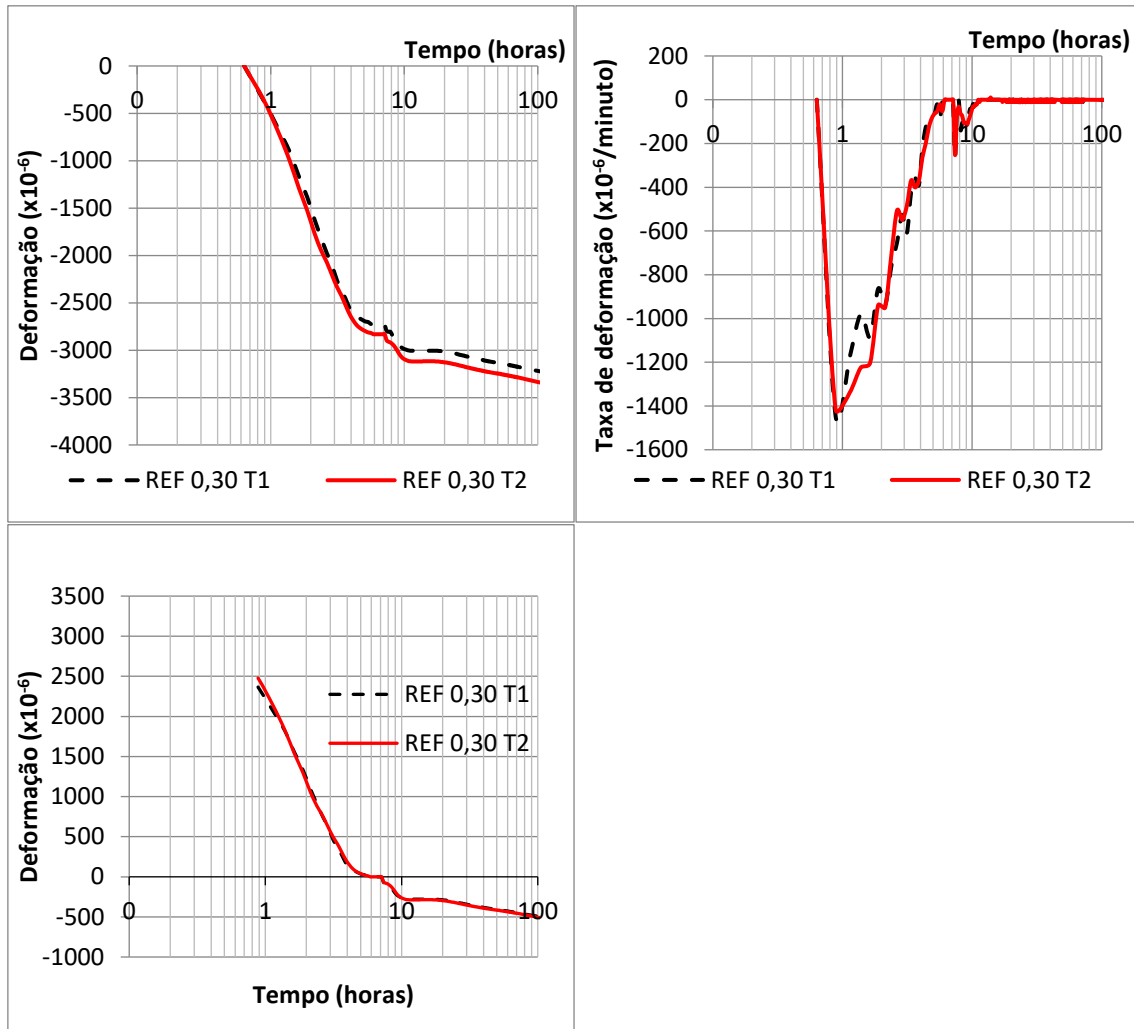


Figura B12 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa REF 0,30

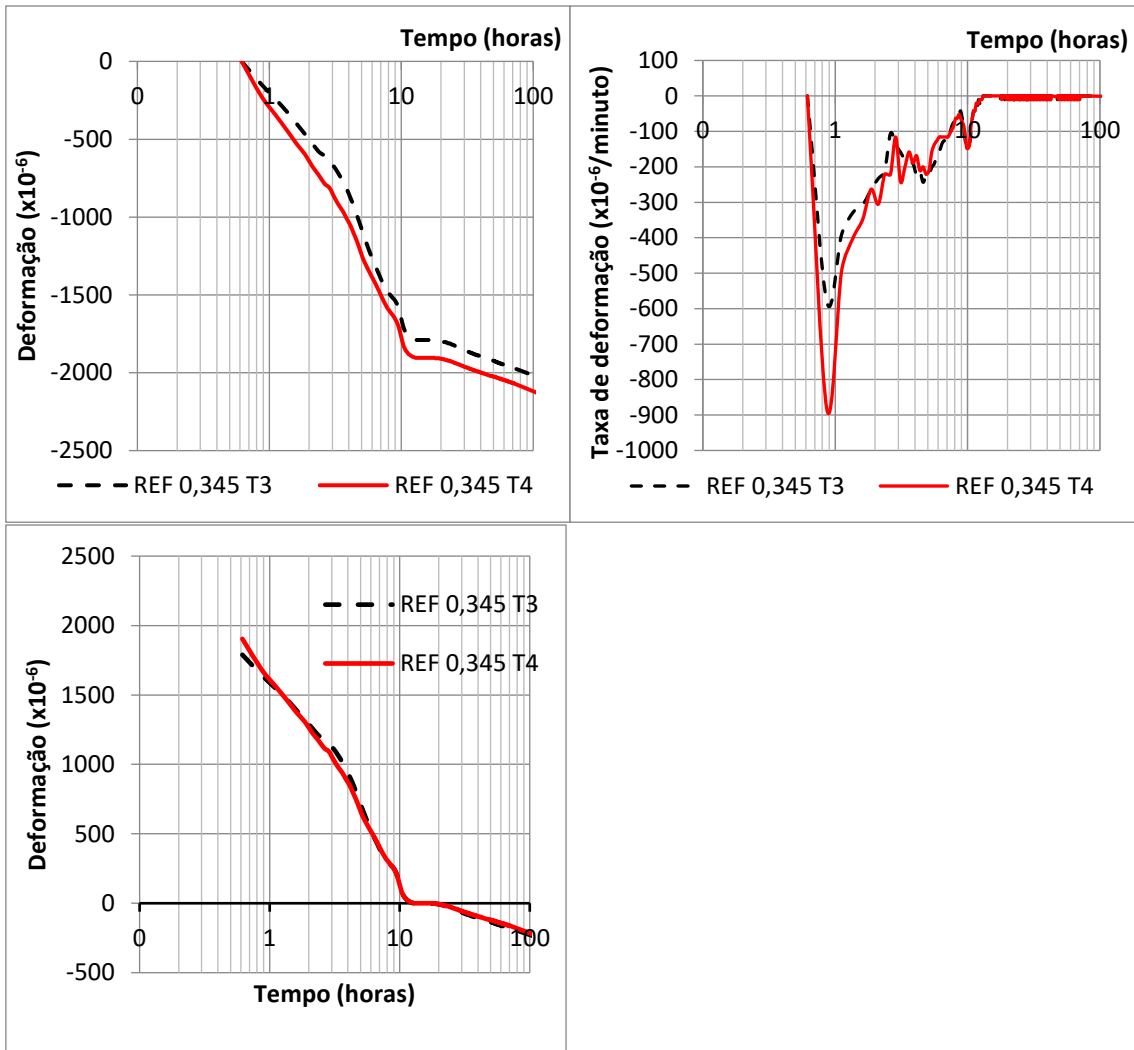


Figura B13 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa REF 0,345

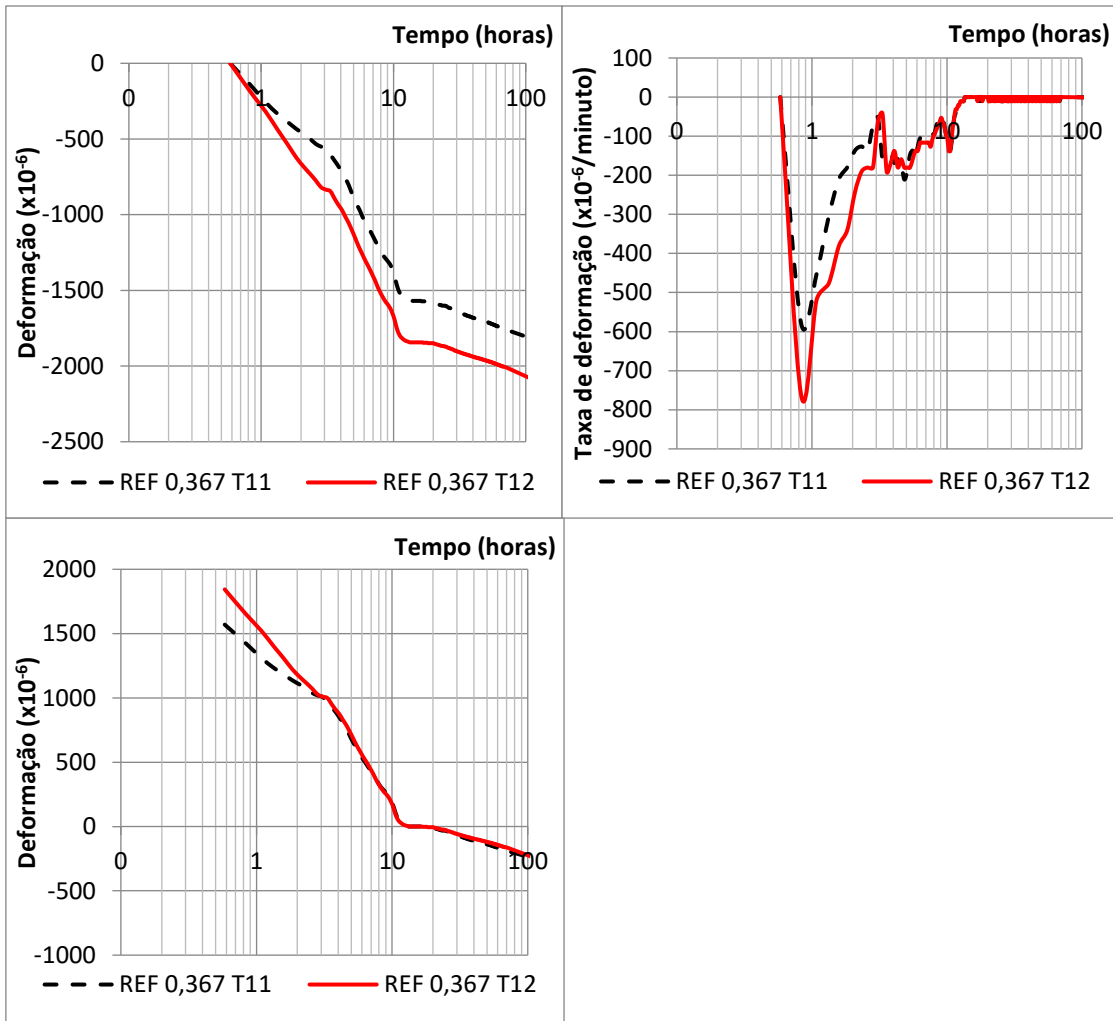


Figura B14 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa REF 0,367

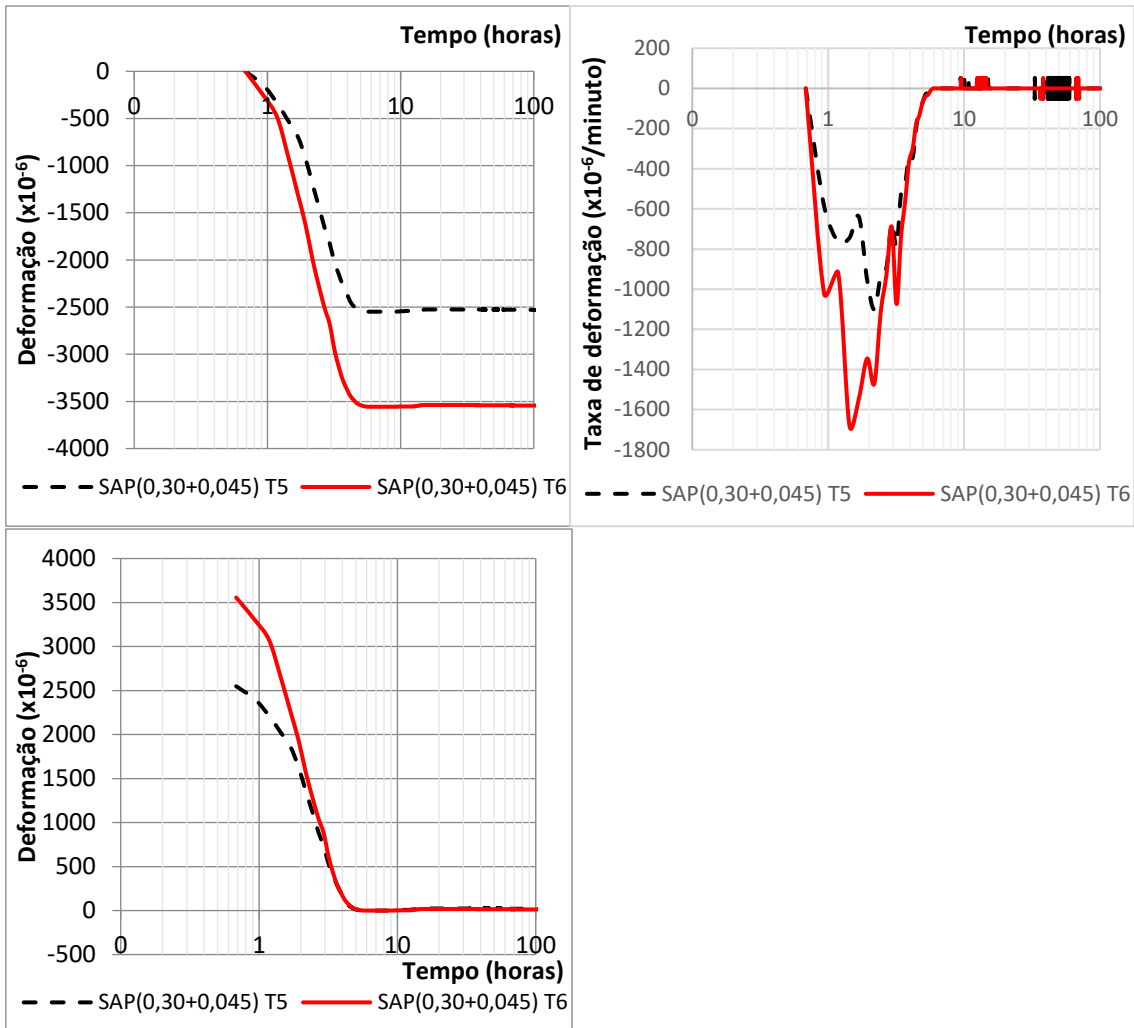


Figura B15 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa SAP(0,30+0,045)

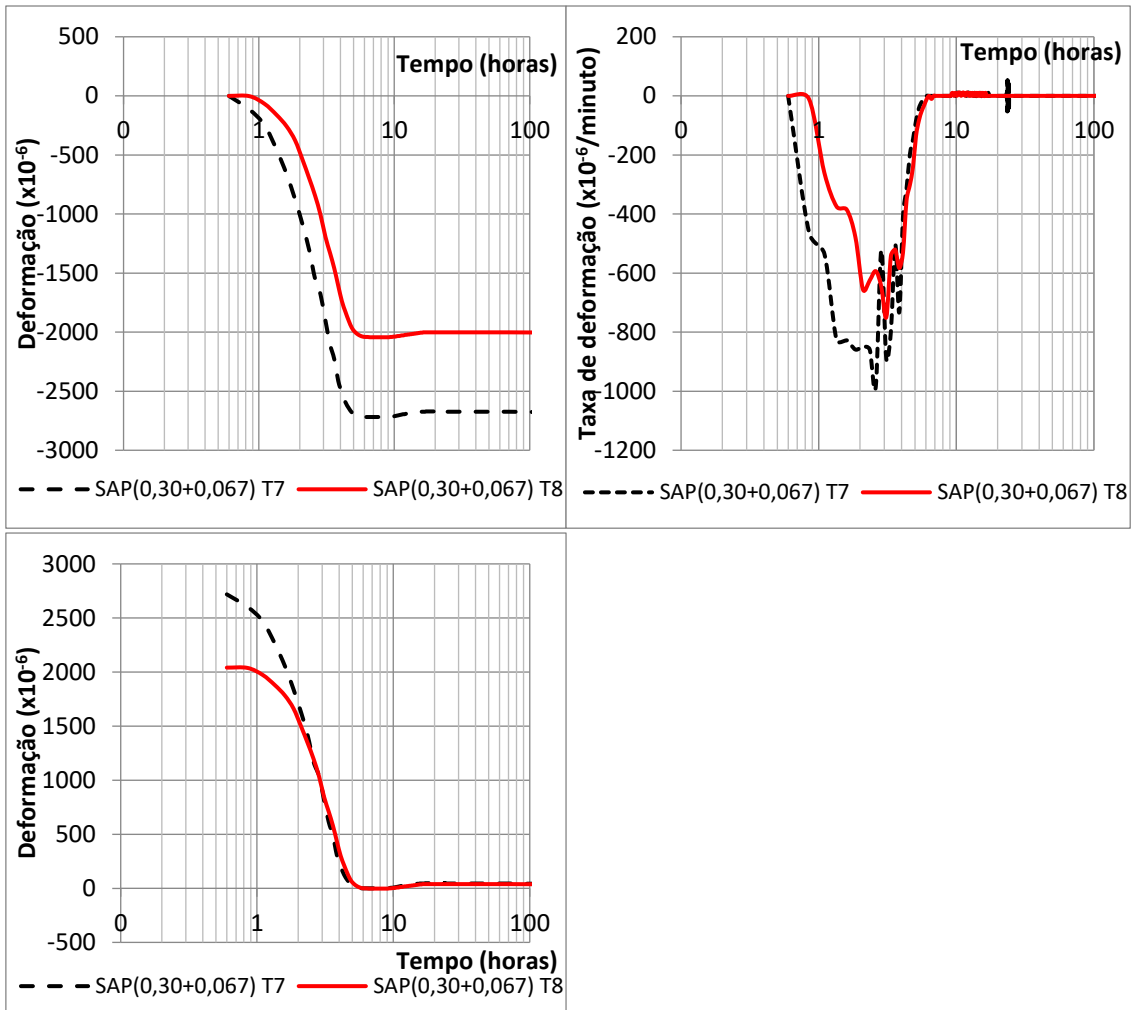


Figura B16 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa SAP(0,30+0,067)

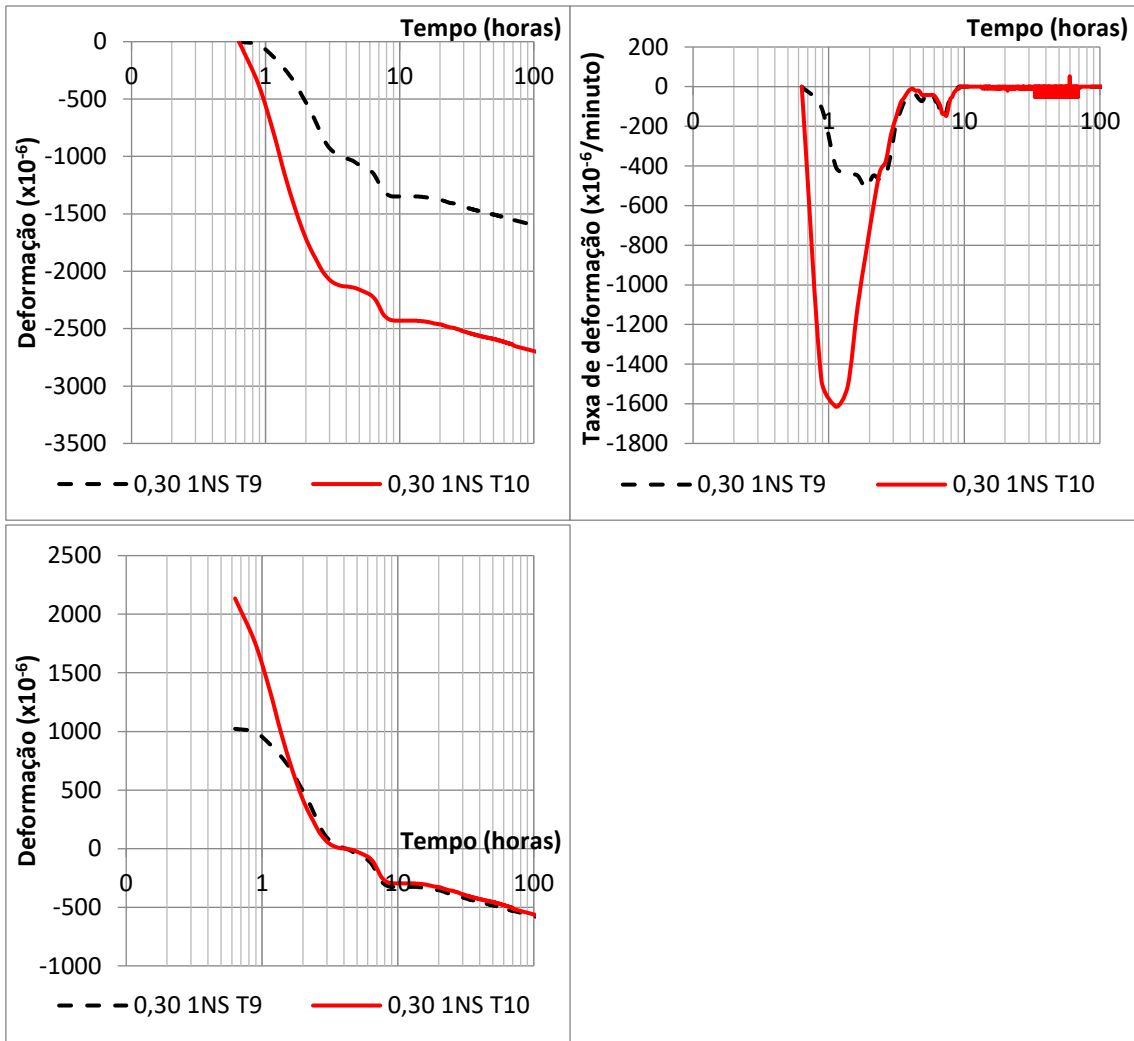


Figura B17 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa 0,30 1NS

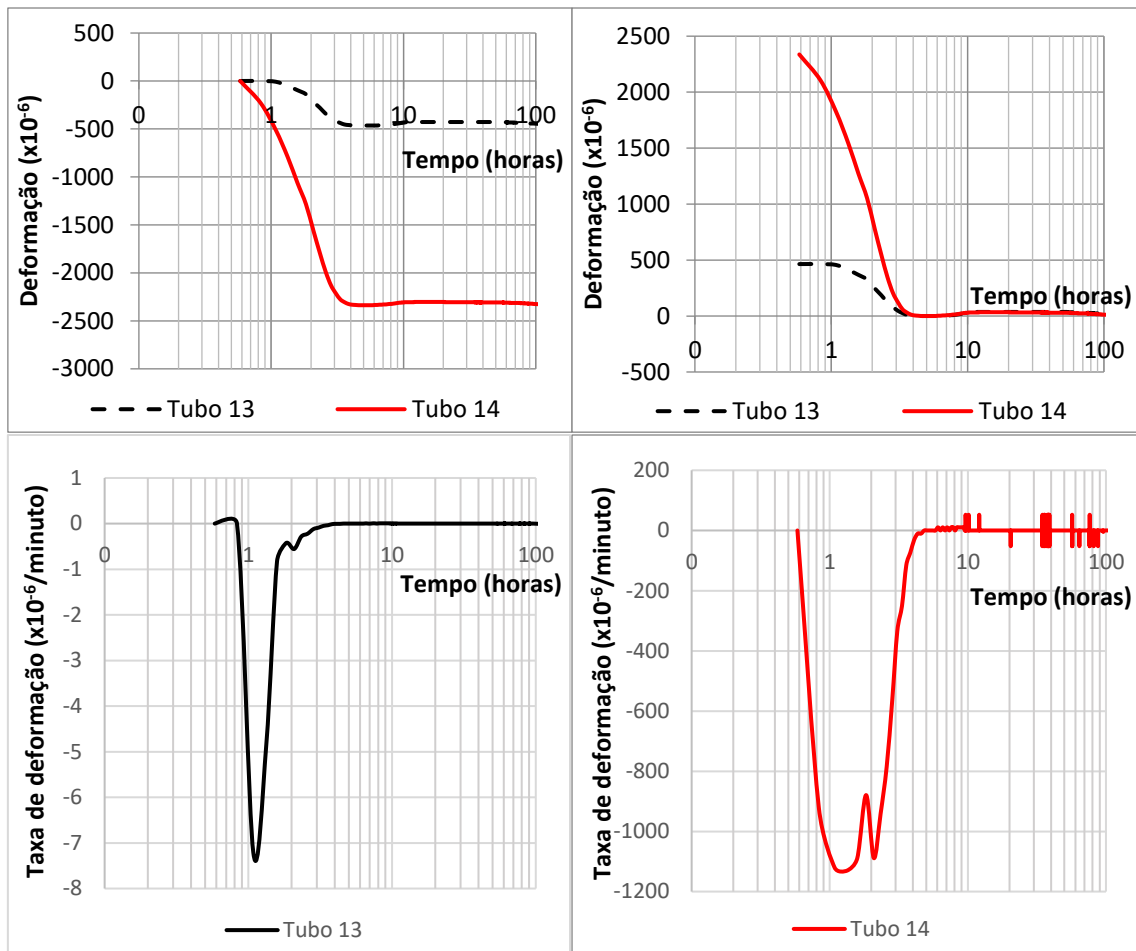


Figura B18 - Deformação absoluta, deformação após determinação do zero e taxa de deformação de cada corpo de prova da argamassa SAP(0,30+0,045)INS



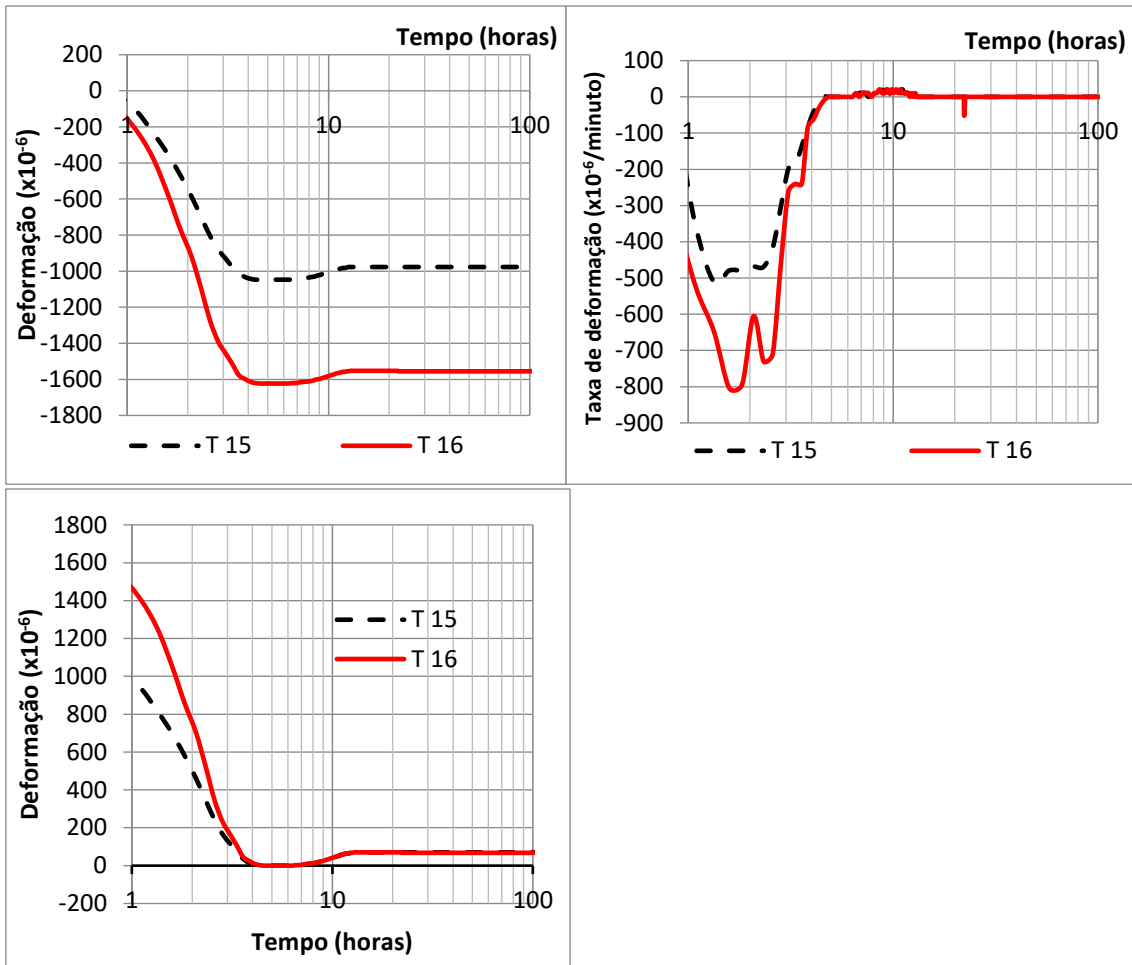


Figura B19 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa SAP(0,30+0,067)1NS

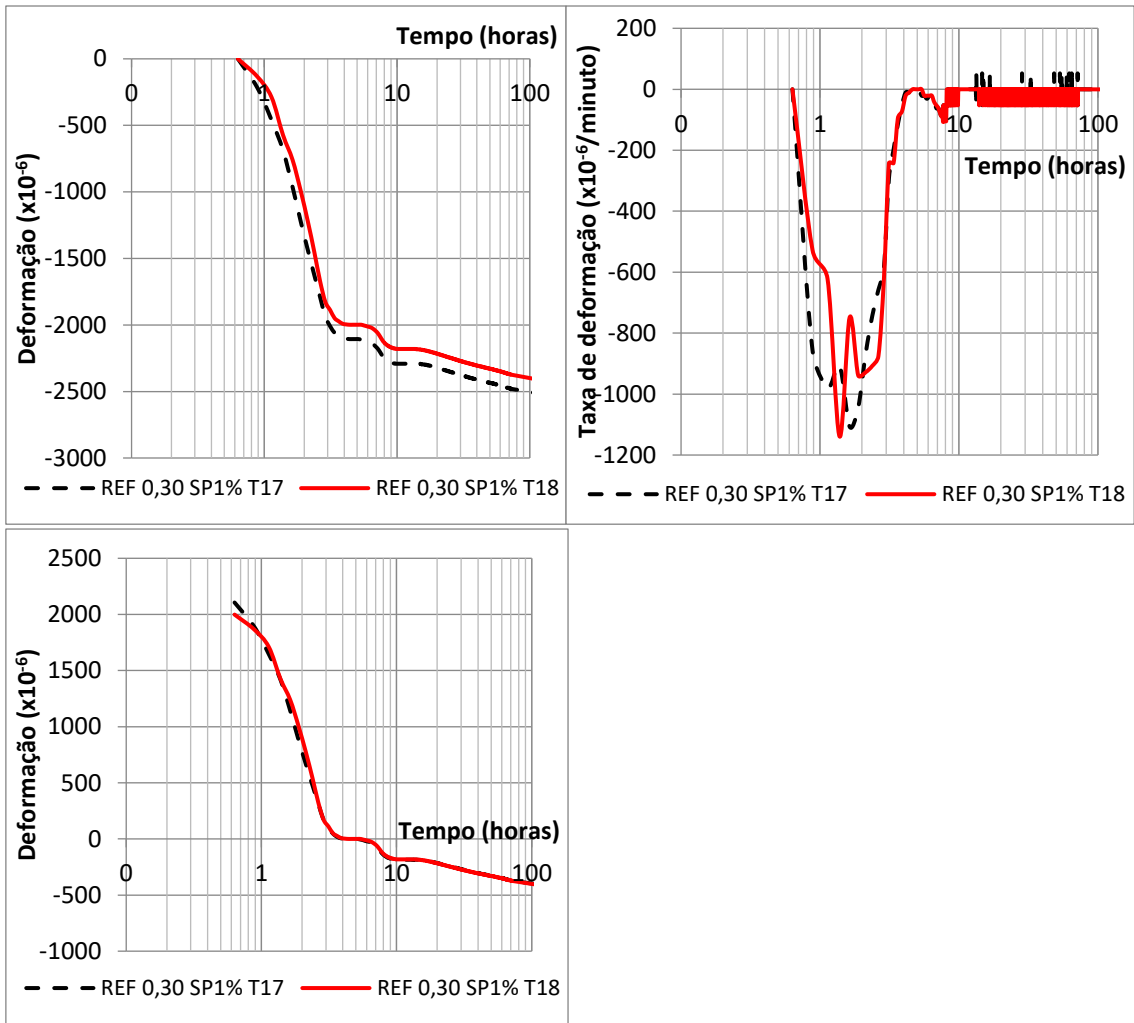


Figura B20 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa REF 0,30 SP1%

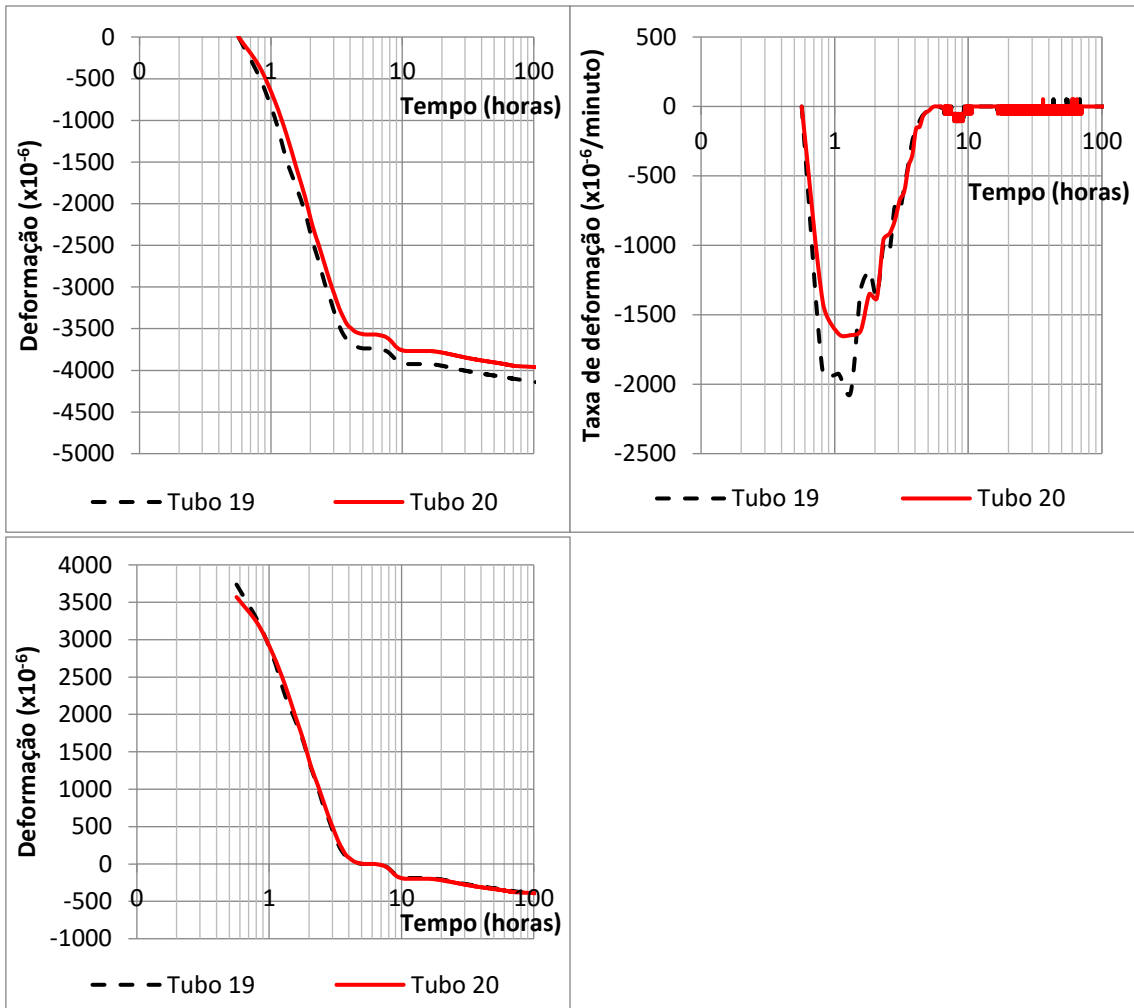


Figura B21 - Deformação absoluta, taxa de deformação e deformação após determinação do zero da argamassa REF 0,30 SP1,25%

### B.3 – Variação Autógena dos concretos

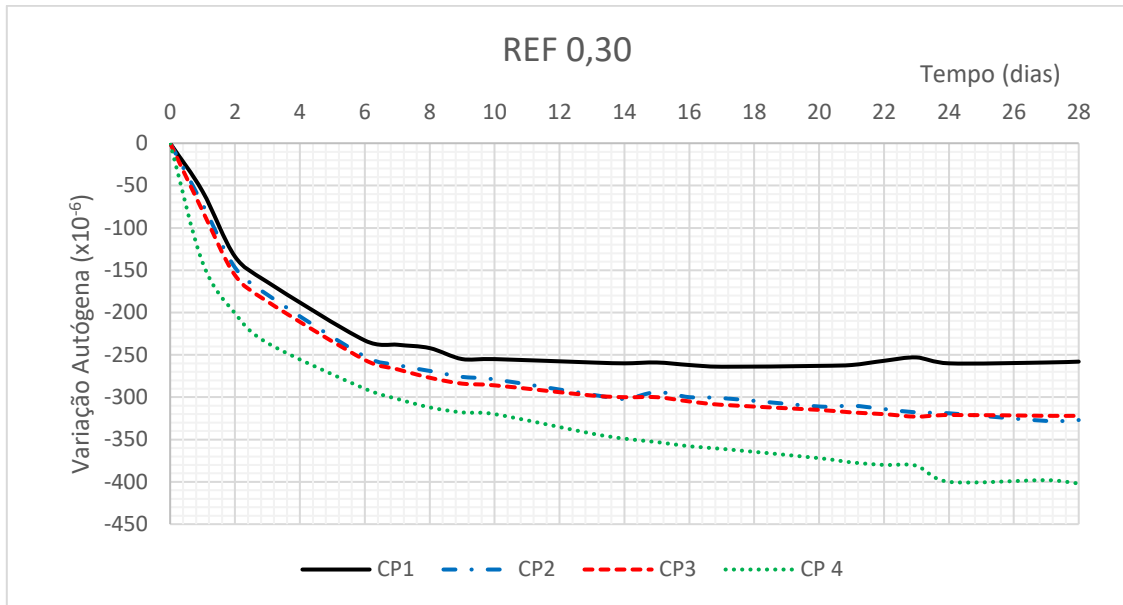


Figura B22 - Resultados individuais da variação autógena do concreto REF 0,30 a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

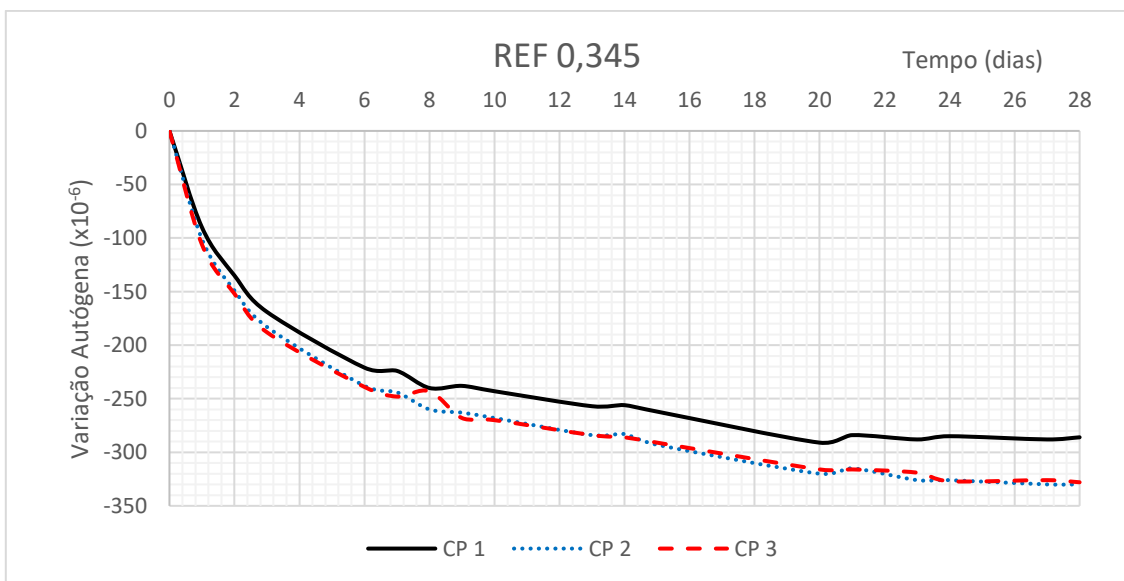


Figura B23 - Resultados individuais da variação autógena do concreto REF 0,345 a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

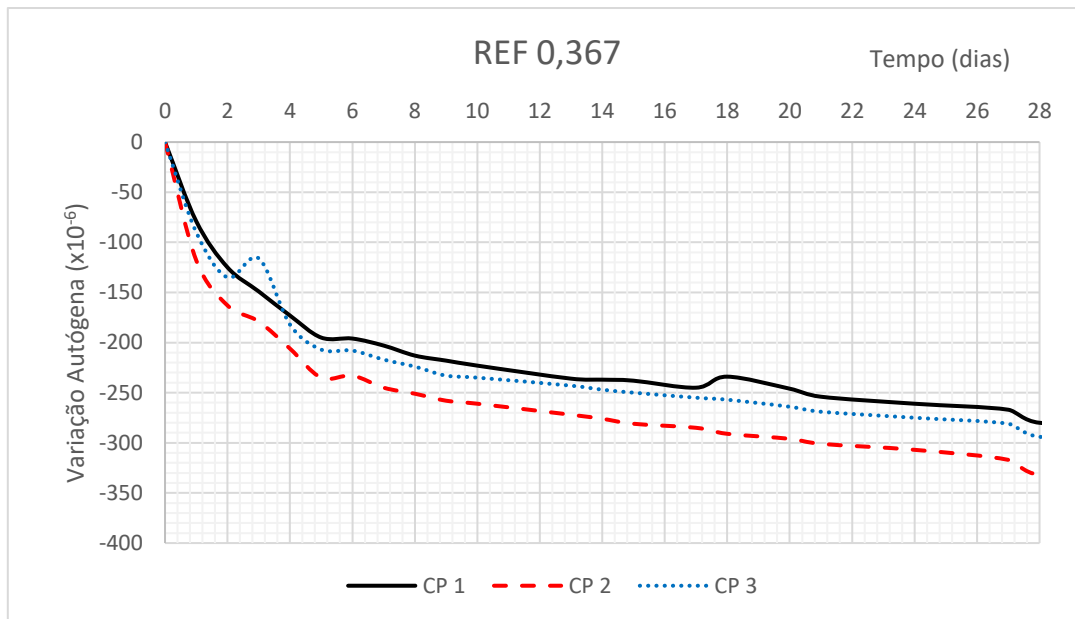


Figura B24 - Resultados individuais da variação autógena do concreto REF 0,367 a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

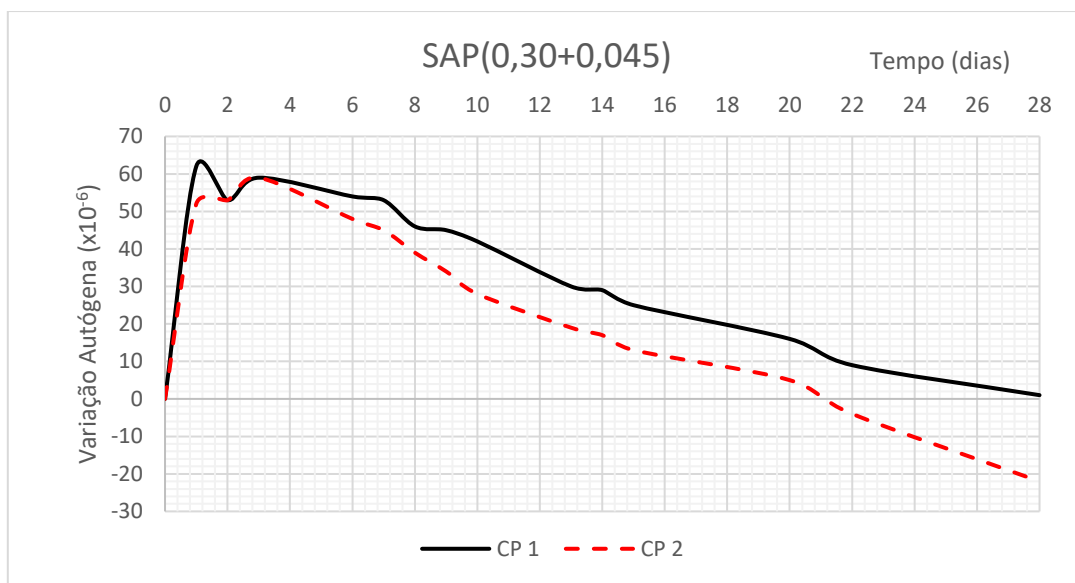


Figura B25 - Resultados individuais da variação autógena do concreto SAP(0,30+0,045) a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

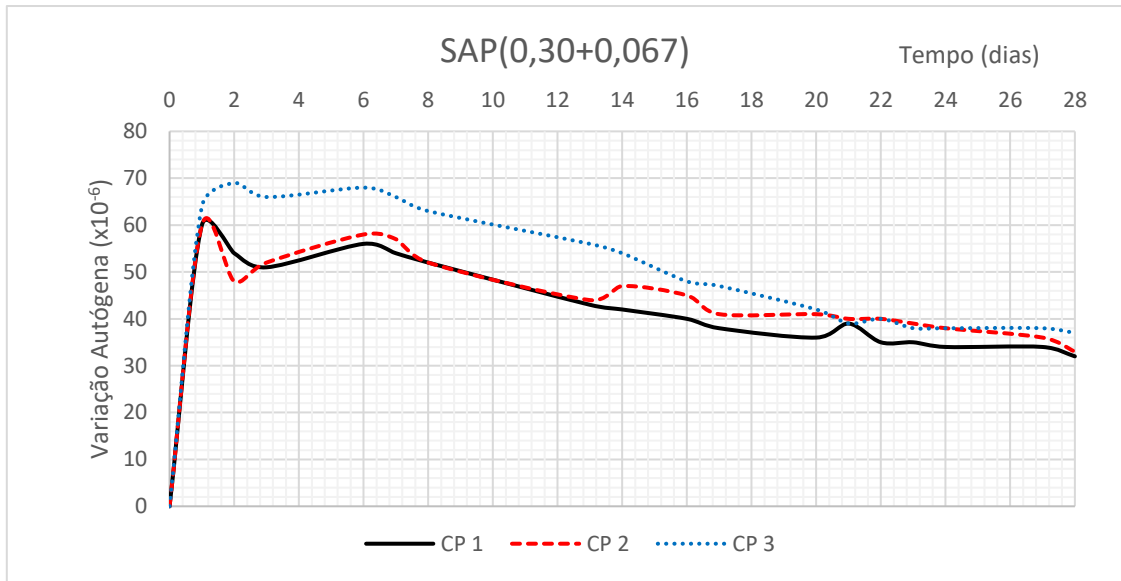


Figura B26 - Resultados individuais da variação autógena do concreto SAP(0,30+0,067) a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

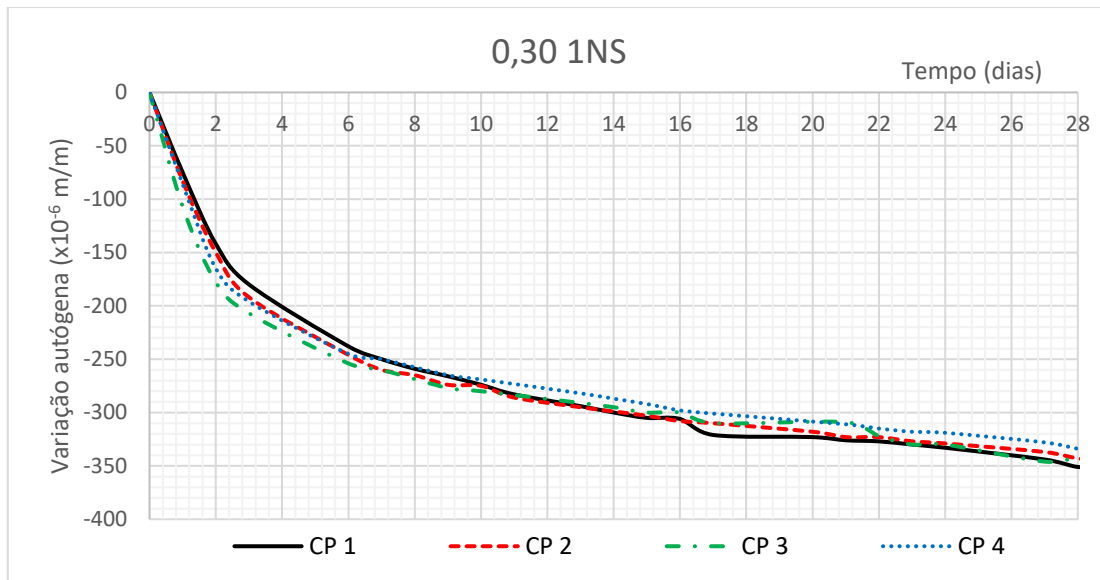


Figura B27 - Resultados individuais da variação autógena do concreto 0,30 1NS a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

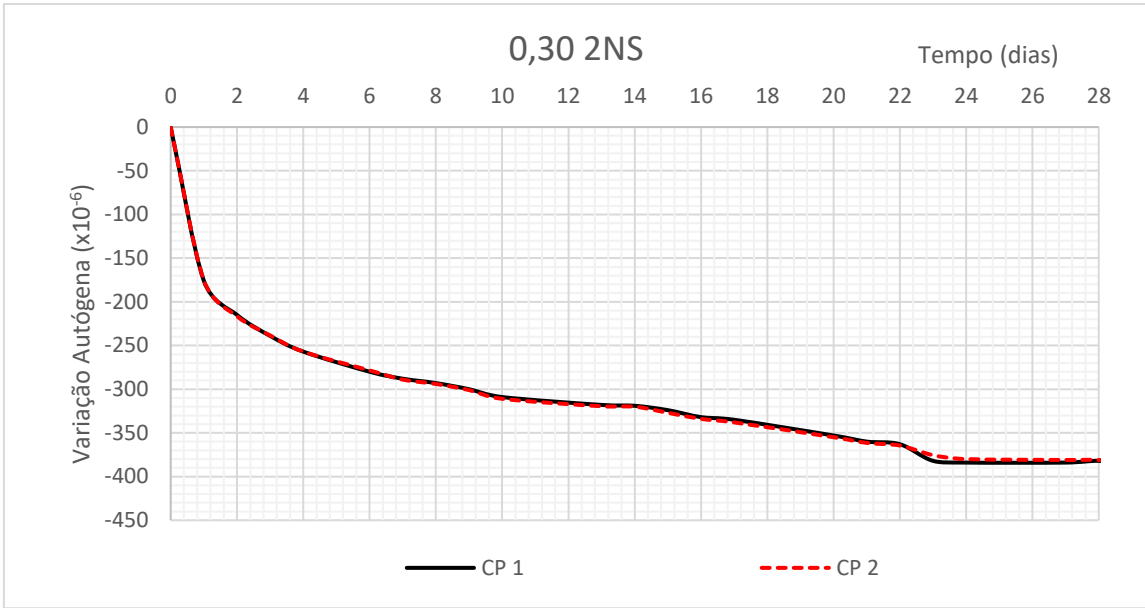


Figura B28 - Resultados individuais da variação autógena do concreto 0,30 2NS a partir de  $T_0$  até 28 dias

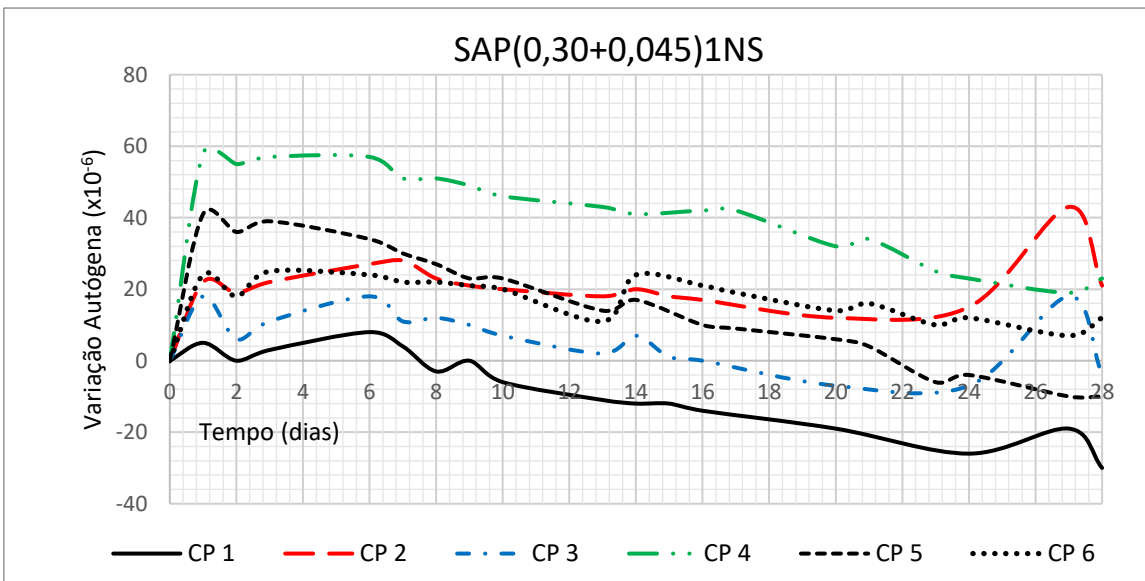


Figura B29 - Resultados individuais da variação autógena do concreto SAP(0,30+0,045)1NS a partir de  $T_0$  até 28 dias

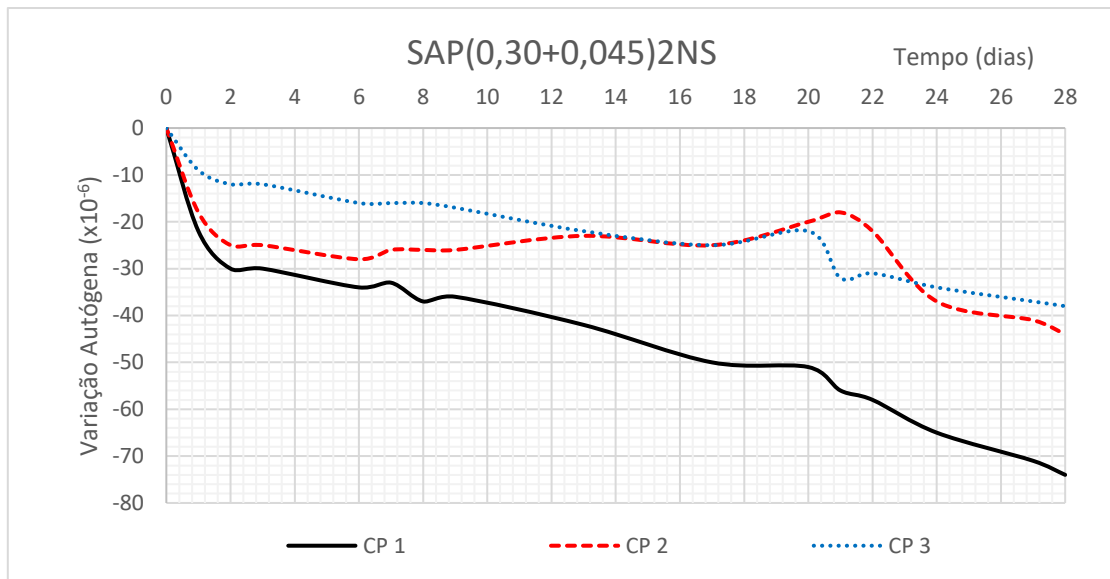


Figura B30 - Resultados individuais da variação autógena do concreto SAP(0,30+0,045)2NS a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

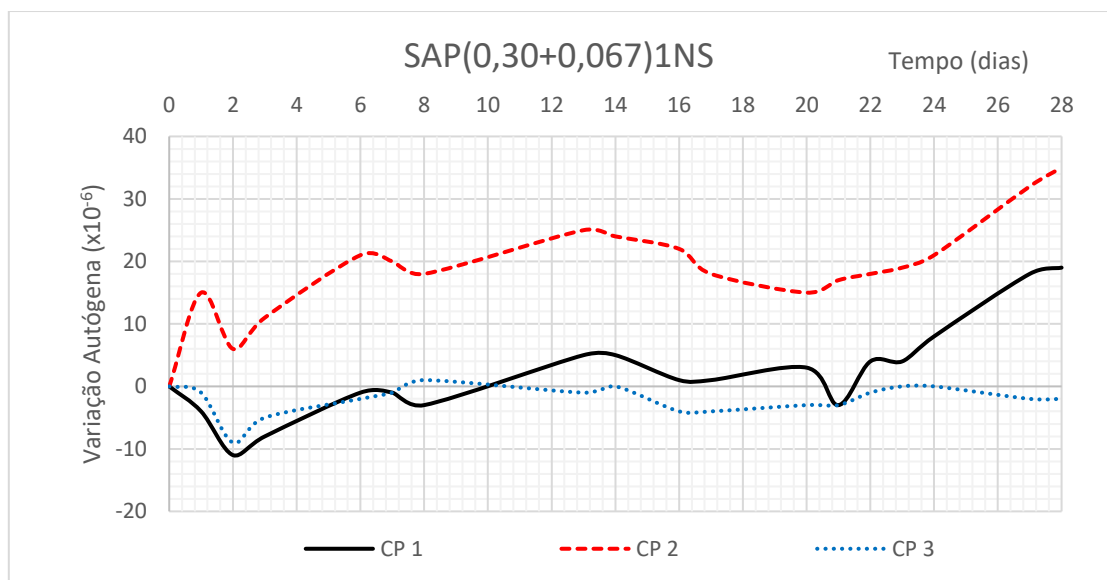


Figura B30 - Resultados individuais da variação autógena do concreto SAP(0,30+0,067)1NS a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias



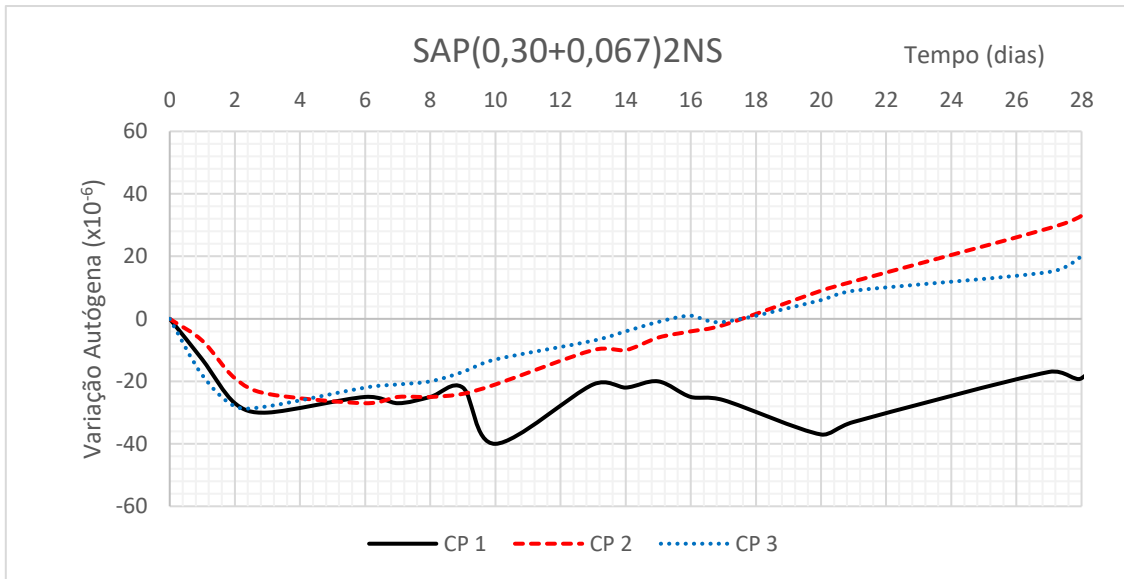


Figura B31 - Resultados individuais da variação autógena do concreto SAP(0,30+0,067)2NS a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

B.4 – Perda de massa dos corpos de prova empregados nos ensaios de variação autógena dos concretos

Tabela B1 - resultados individuais de perda de massa de água dos corpos de prova empregados no ensaio de variação autógena dos concretos

Concreto	Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)
REF 0,30	cp1	11938	11937	0,01
	cp2	11930	11929	0,01
	cp3	11683	11680	0,03
	cp4	11766	11765	0,01
	cp5	11687	11685	0,02
REF 0,345	cp1	11712	11705	0,06
	cp2	11772	11765	0,06
	cp3	11751	11747	0,03
REF 0,367	cp1	11711	11709	0,02
	cp2	11669	11661	0,07
	cp3	11680	11680	0,00
0,30 1NS	cp1	11590	11583	0,06
	cp2	11675	11673	0,02
	cp3	10079	10073	0,06
	cp4	10140	10136	0,04
	cp5	10101	10098	0,03
0,30 2NS	cp1	10110	10100	0,10
	cp2	10001	9987	0,14
	cp3	9958	9955	0,03
SAP(0,30+0,045)	cp1	9929	9925	0,04
	cp2	11791	11788	0,03
SAP(0,30+0,045)1NS	cp1	11812	11807	0,04
	cp2	11860	11858	0,02
	cp3	11832	11832	0,00
	cp4	11723	11719	0,03
	cp5	11583	11581	0,02
	cp6	11613	11608	0,04
SAP(0,30+0,045)2NS	cp1	11822	11812	0,08
	cp2	11872	11862	0,08
	cp3	11850	11841	0,08
SAP(0,30+0,067)	cp1	11667	11664	0,03
	cp2	11695	11693	0,02
	cp3	11615	11614	0,01
SAP(0,30+0,067)1NS	cp1	11708	11706	0,02
	cp2	11702	11701	0,01
	cp3	11598	11593	0,04
SAP(0,30+0,067)2NS	cp1	11449	11444	0,04
	cp2	11658	11655	0,03
	cp3	11546	11536	0,09

## B.5 – Variação Autógena das argamassas

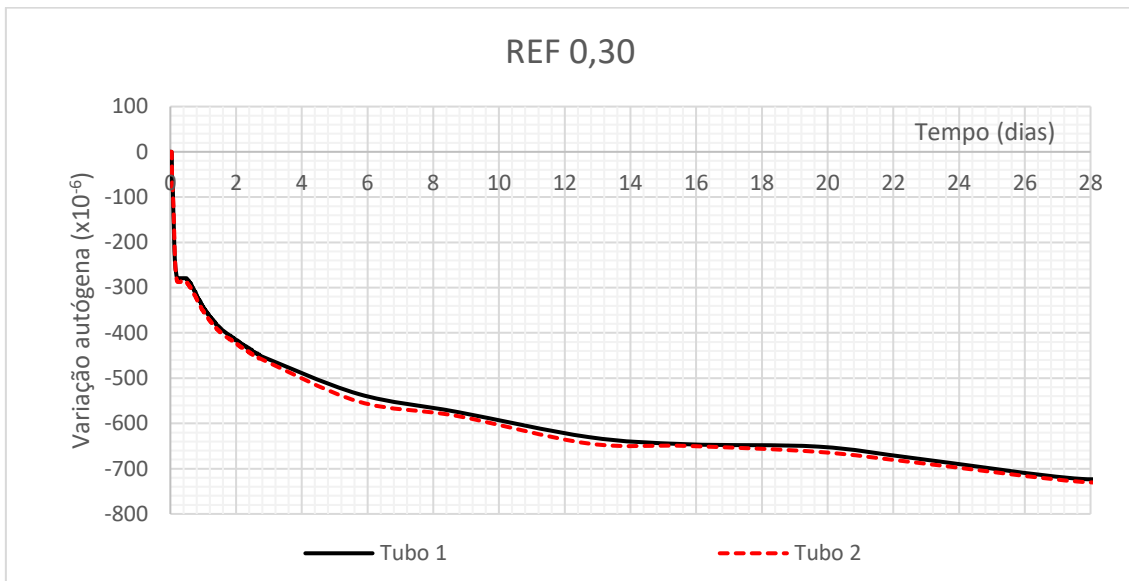


Figura B32 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa REF 0,30 a partir de  $T_0$  até 28 dias

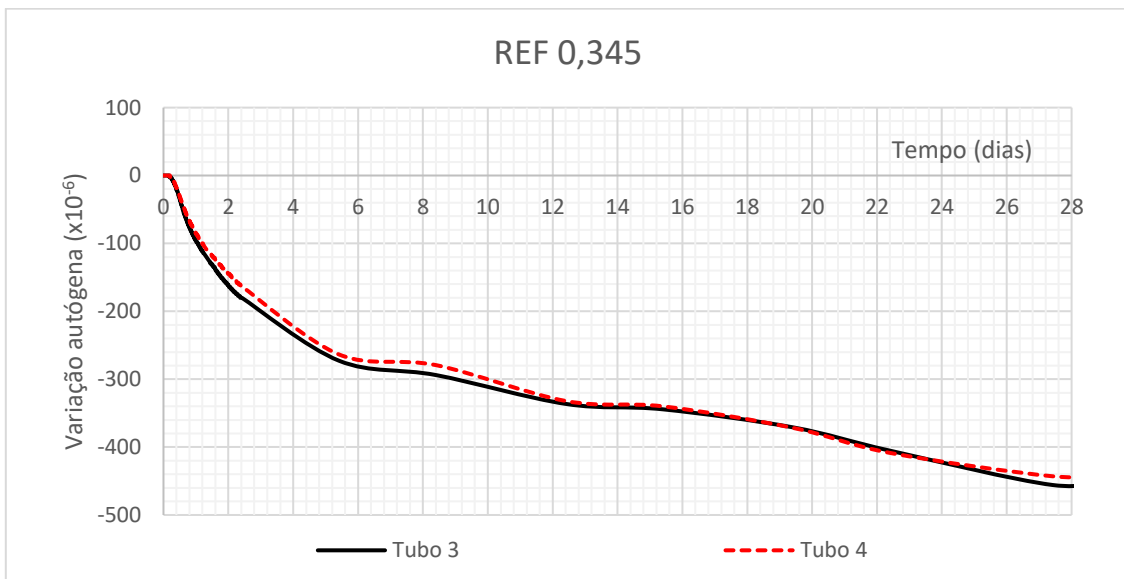


Figura B33 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa REF 0,345 a partir de  $T_0$  até 28 dias

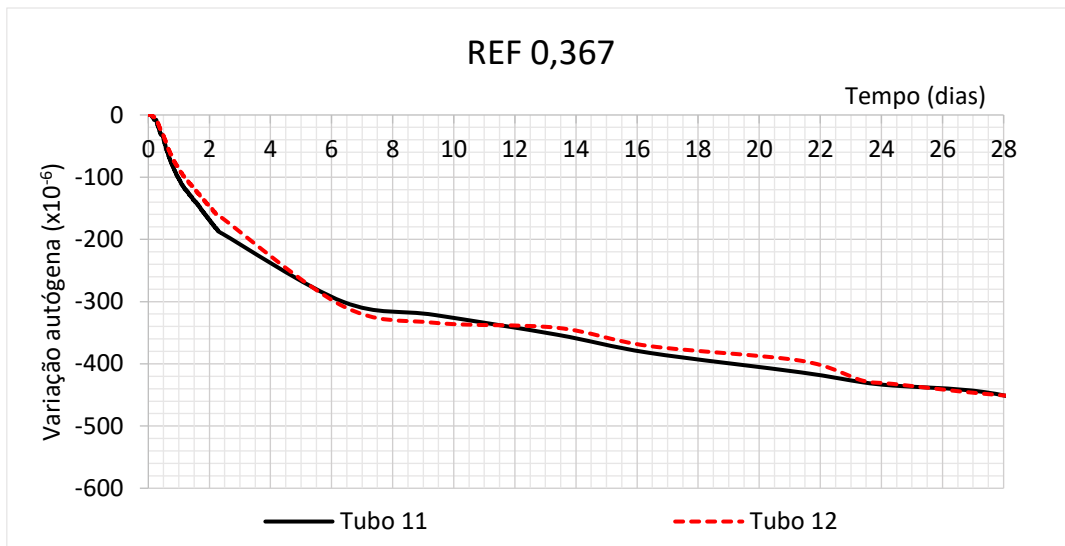


Figura B34 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa REF 0,367 a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

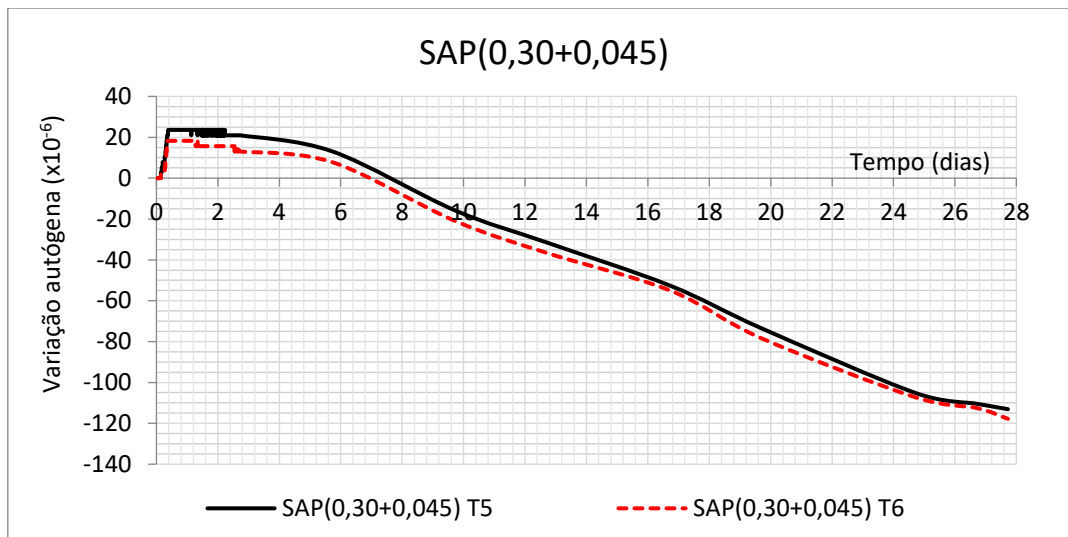


Figura B35 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa SAP(0,30+0,045) a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

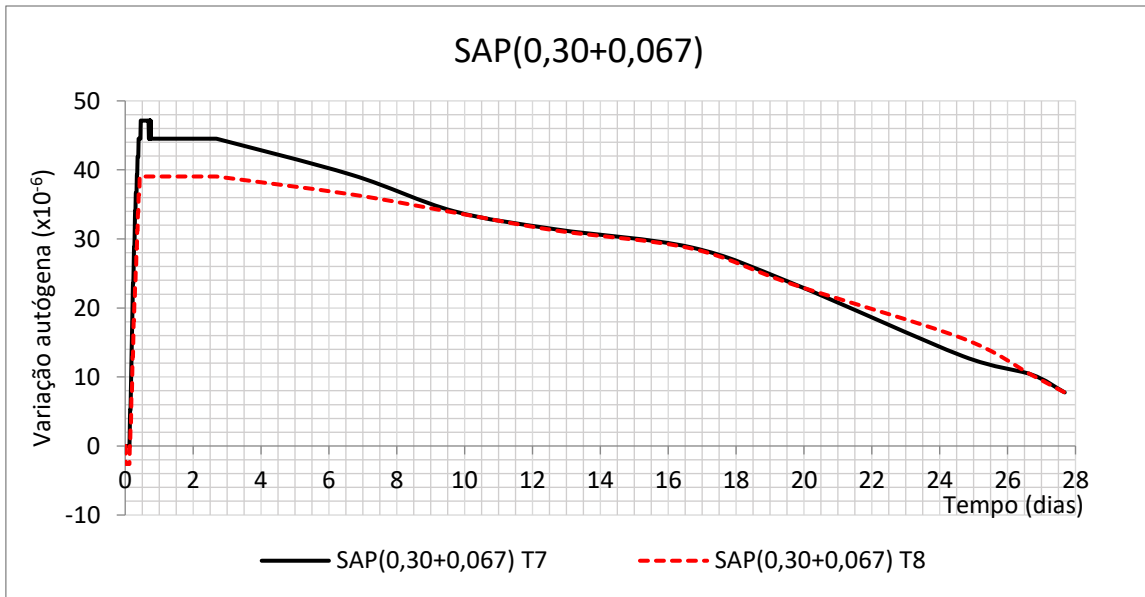


Figura B36 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa SAP(0,30+0,067) a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

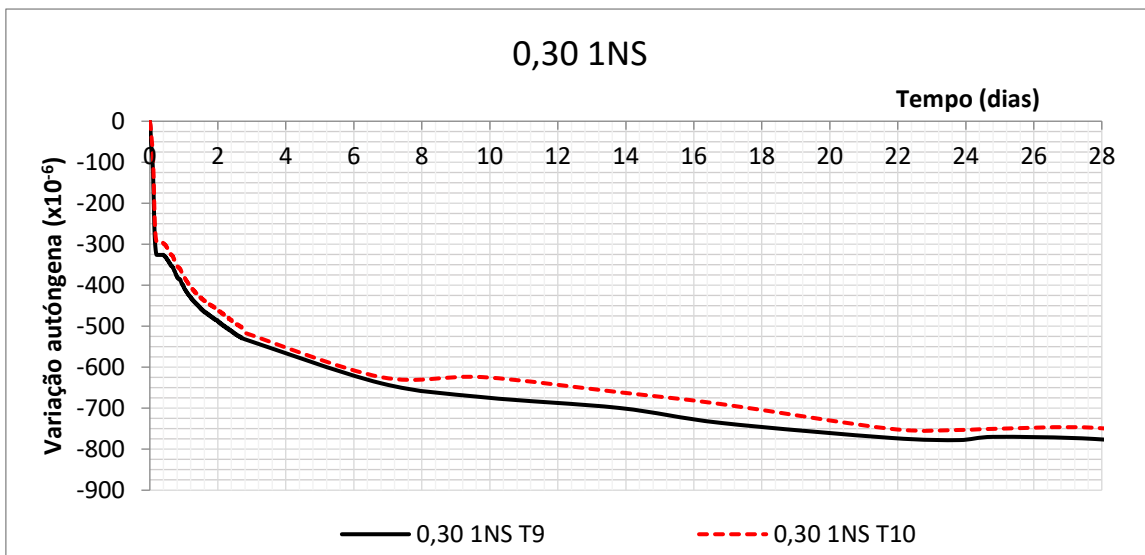


Figura B37 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa 0,30 1NS a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

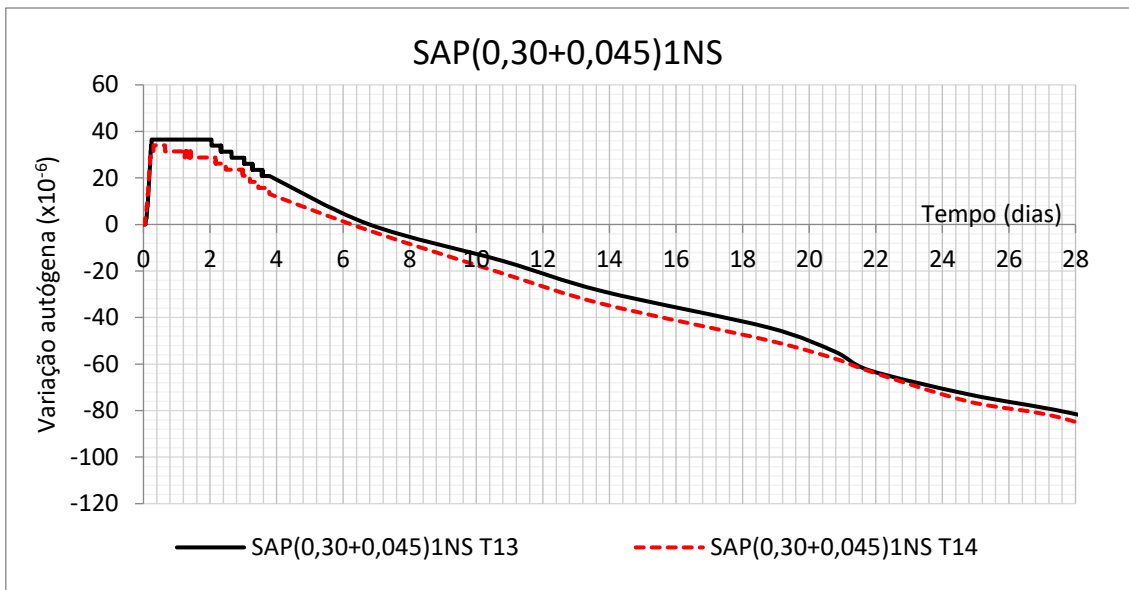


Figura B38 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa SAP(0,30+0,045)1NS a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

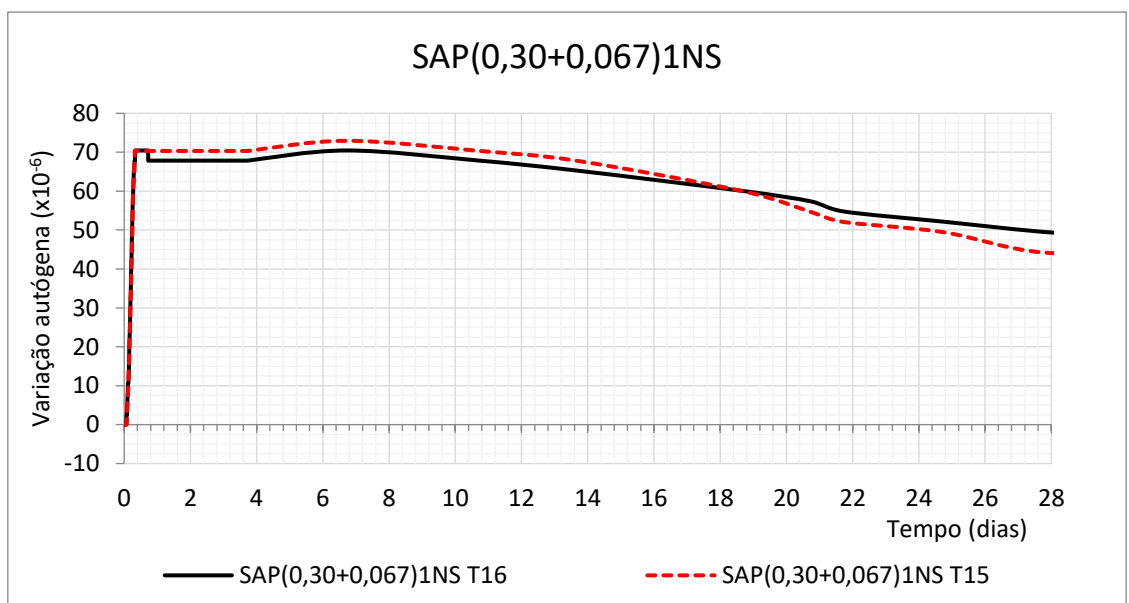


Figura B39 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa SAP(0,30+0,067)1NS a partir de T<sub>0</sub> até 28 dias

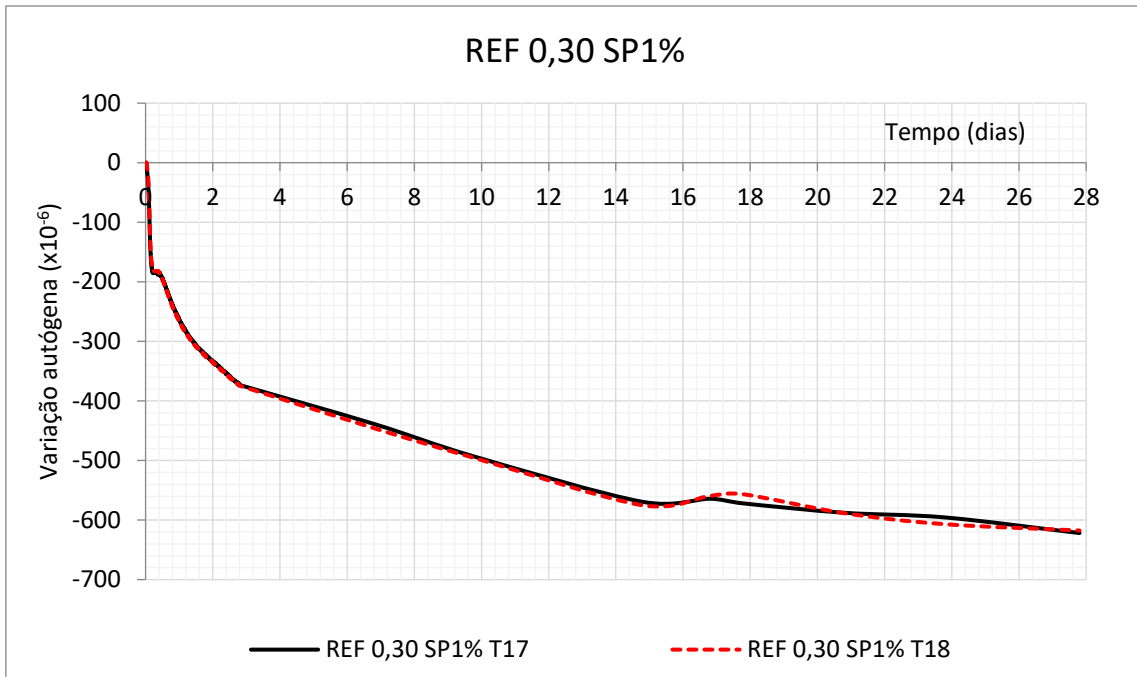


Figura B40 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa REF 0,30 SP1% a partir de  $T_0$  até 28 dias

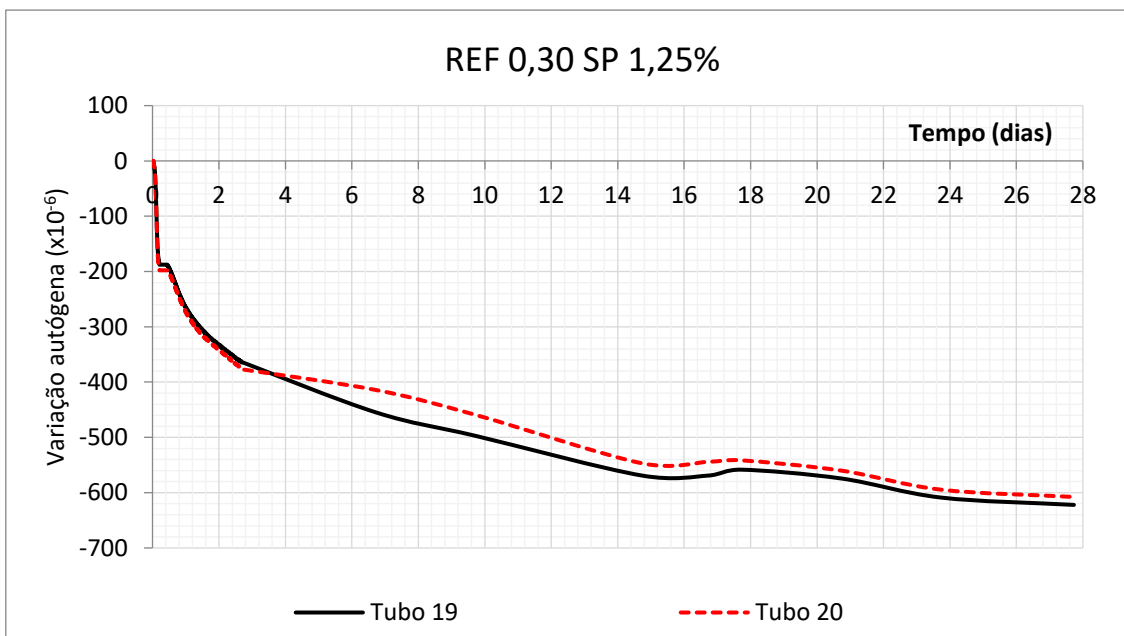


Figura B41 - Resultados individuais da variação autógena da argamassa REF 0,30 SP1,25% a partir de  $T_0$  até 28 dias

## B.6 – Retração por secagem dos concretos conforme ASTM C 157

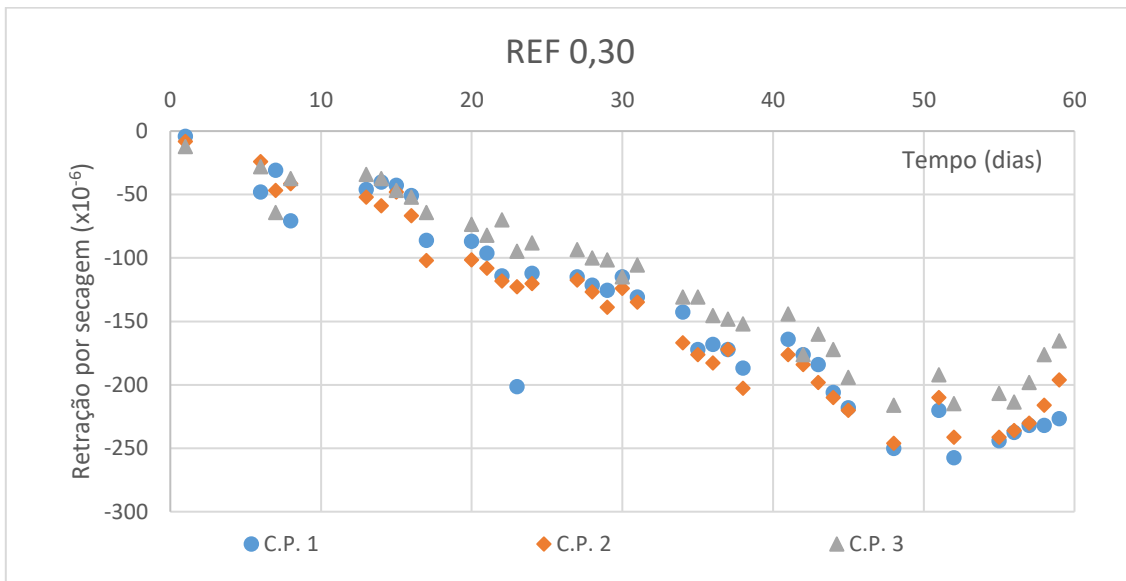


Figura B42 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto REF 0,30

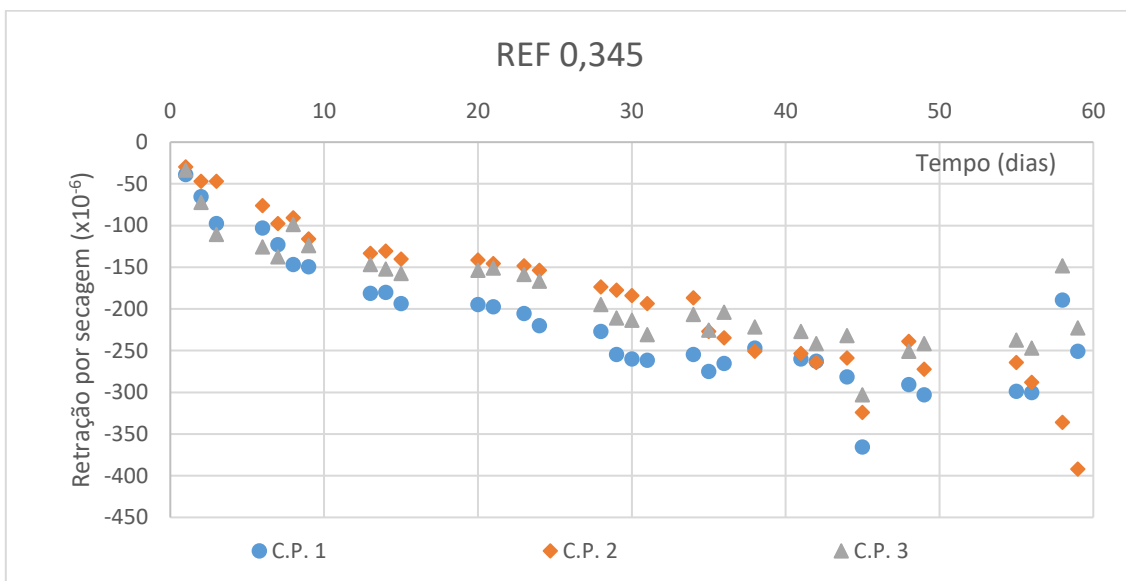


Figura B43 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto REF 0,345



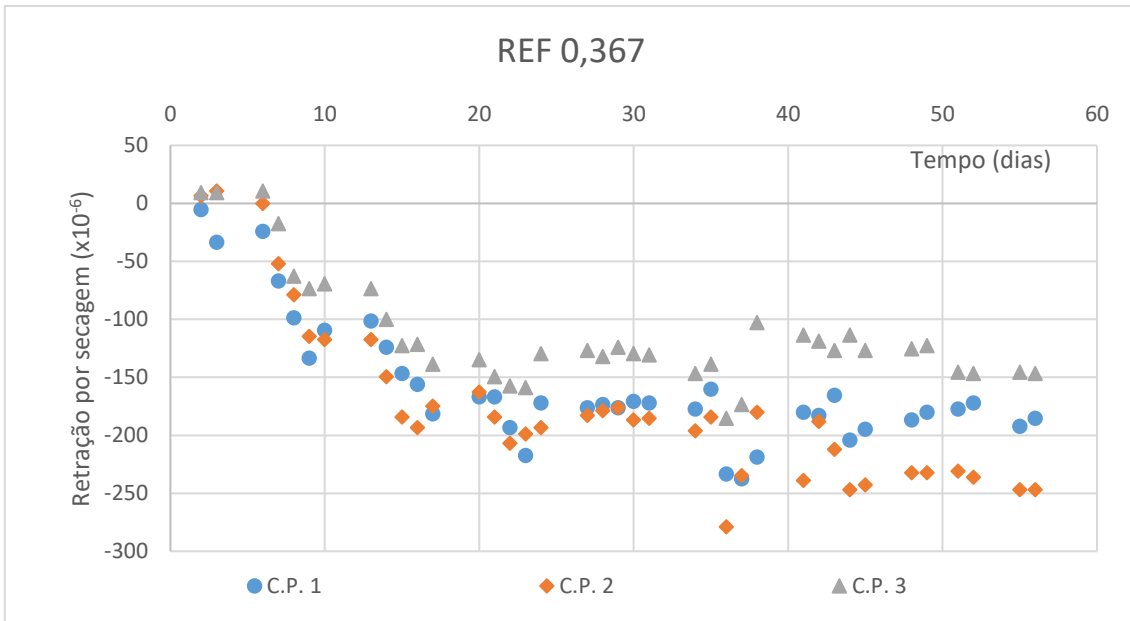


Figura B44 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto REF 0,367

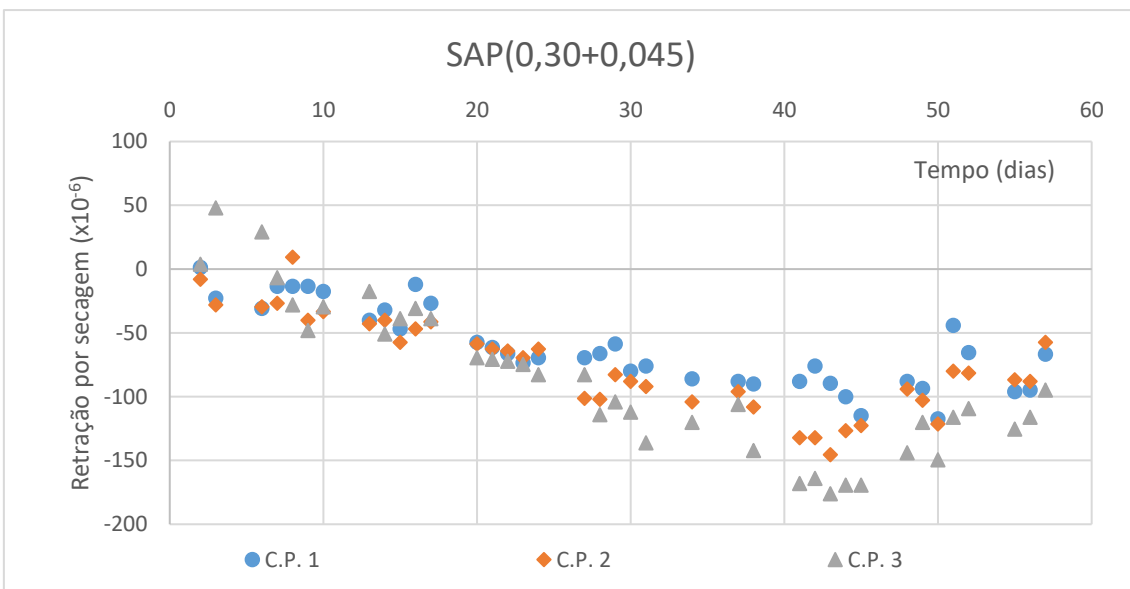


Figura B45 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto SAP(0,30+0,045)

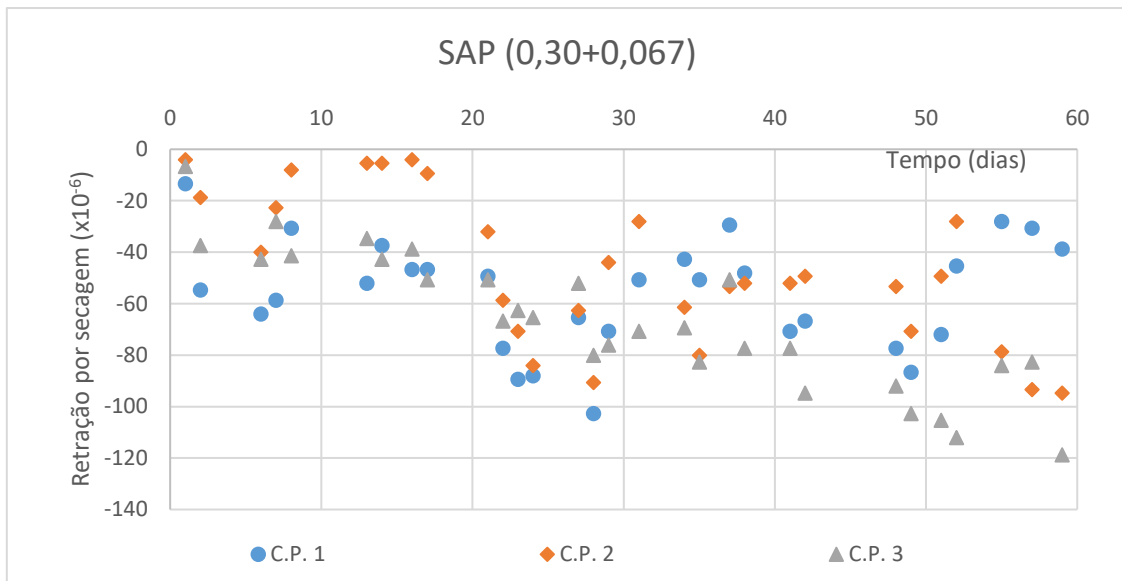


Figura B46 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto SAP(0,30+0,067)

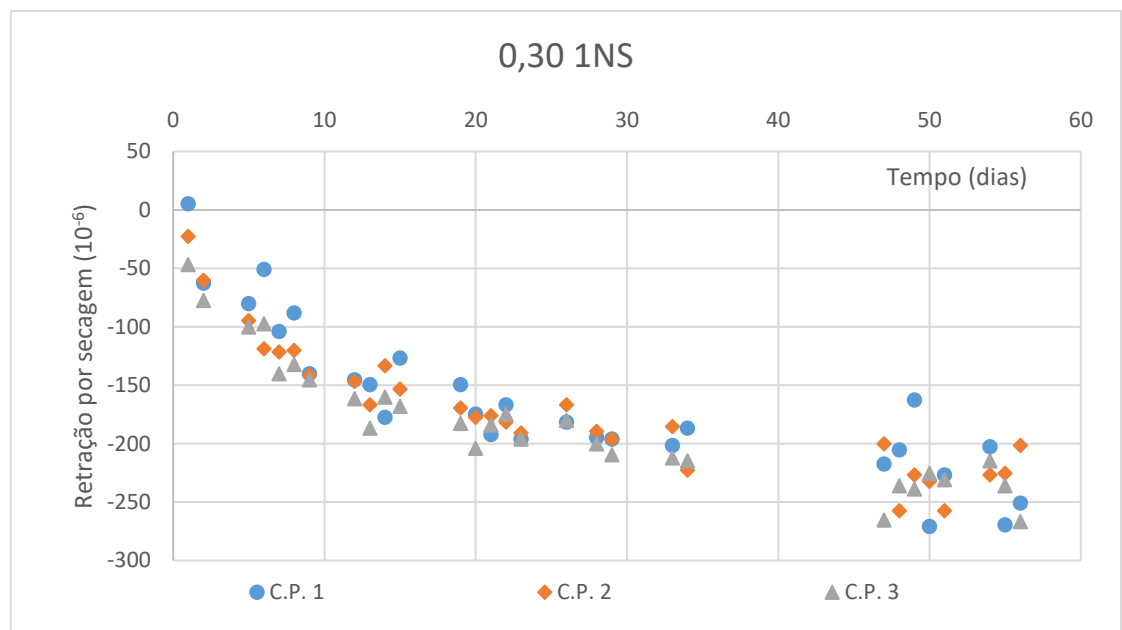


Figura B47 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto 0,30 1NS

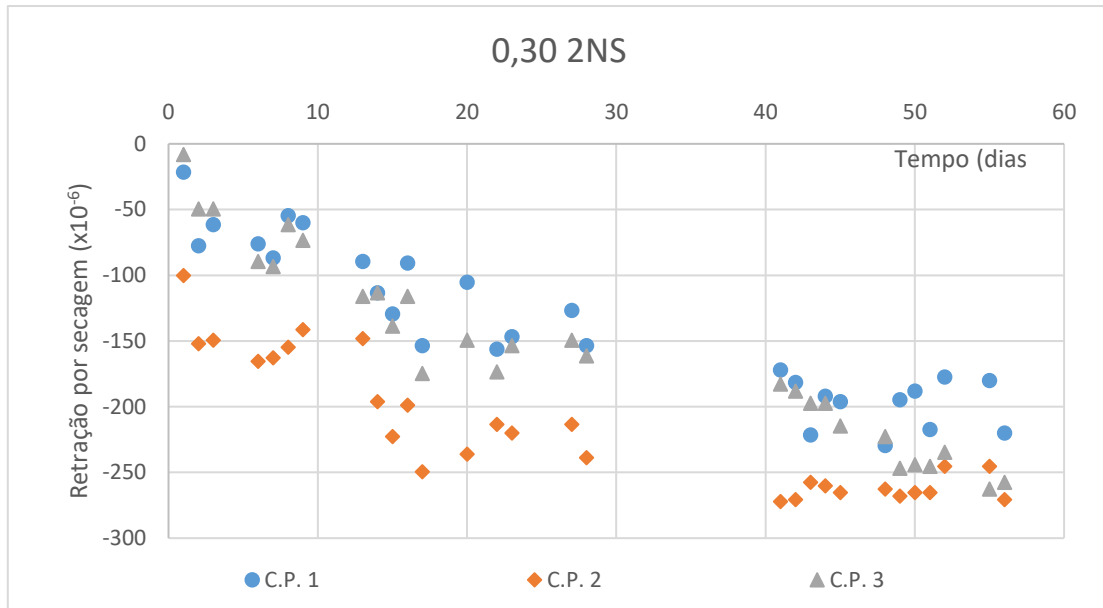


Figura B48 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto 0,30 2NS

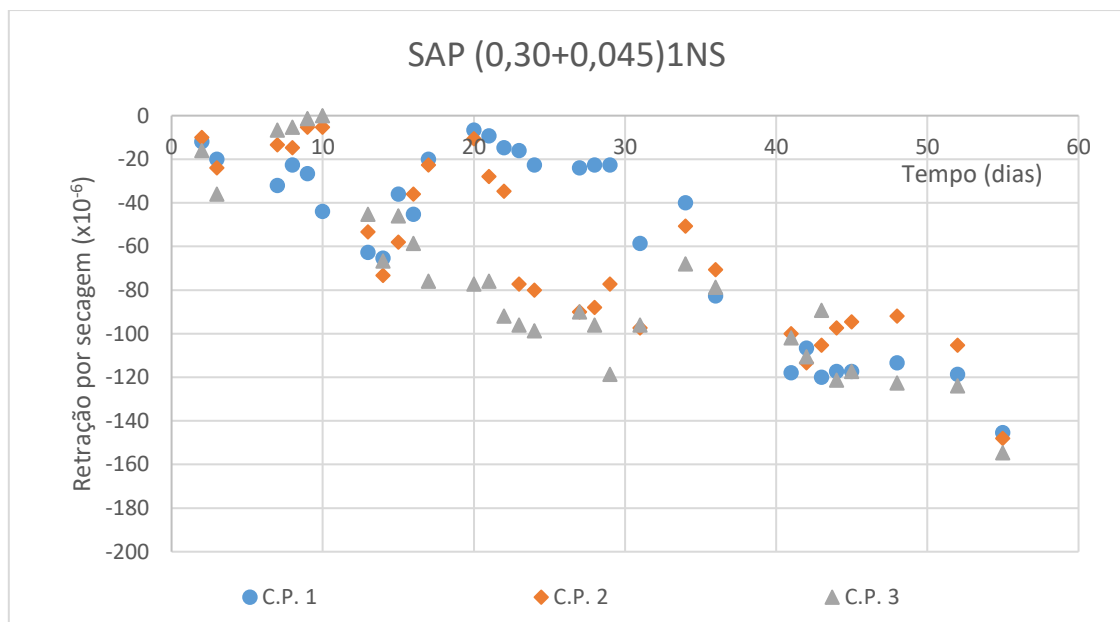


Figura B49 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto SAP(0,30+0,045)1NS

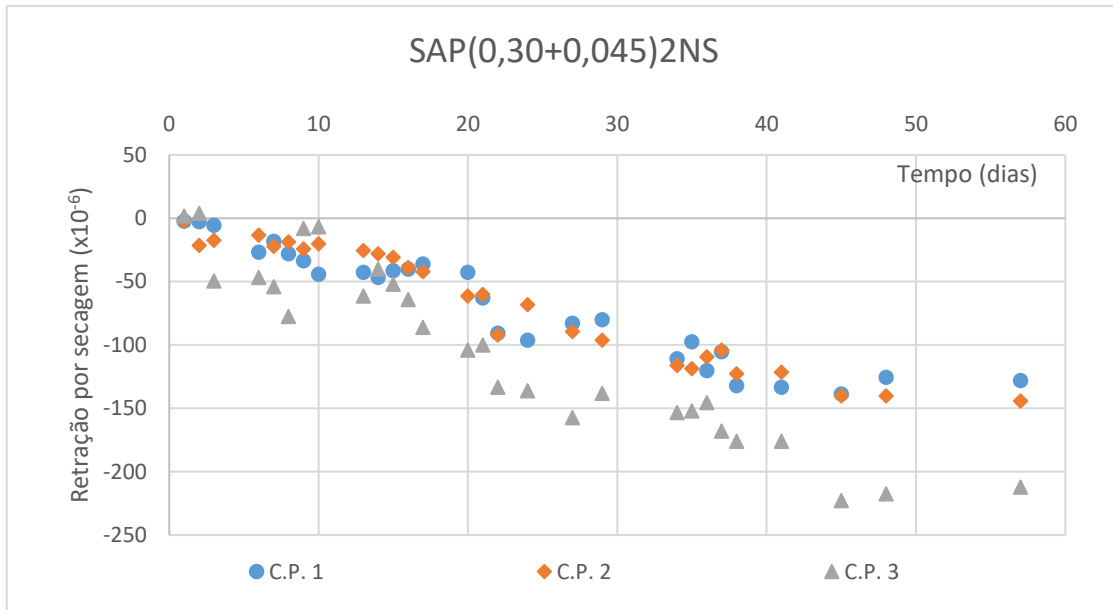


Figura B50 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto SAP(0,30+0,045)2NS

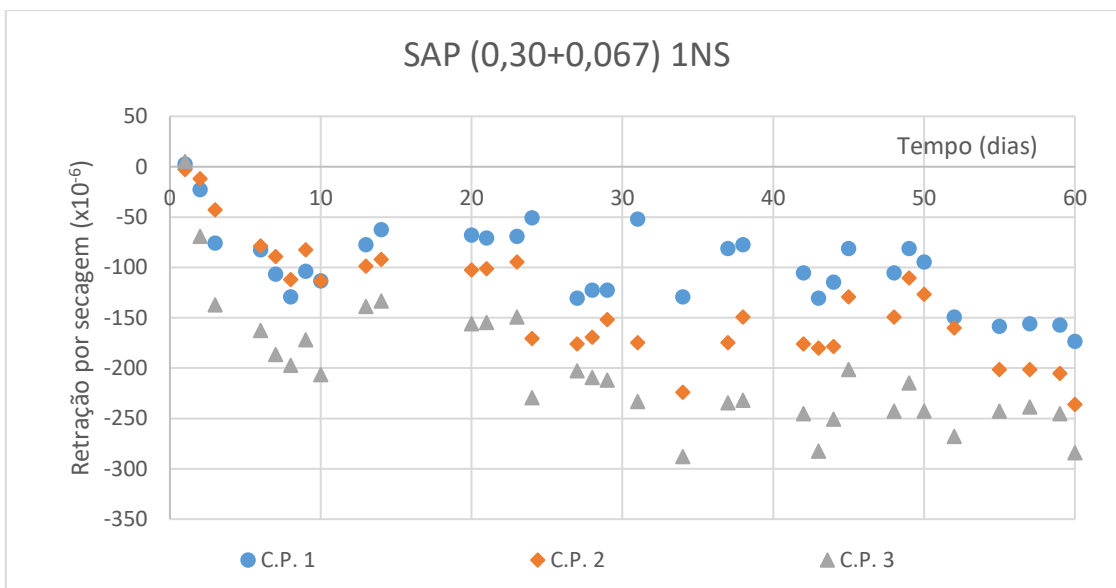


Figura B51 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto SAP(0,30+0,067)1NS

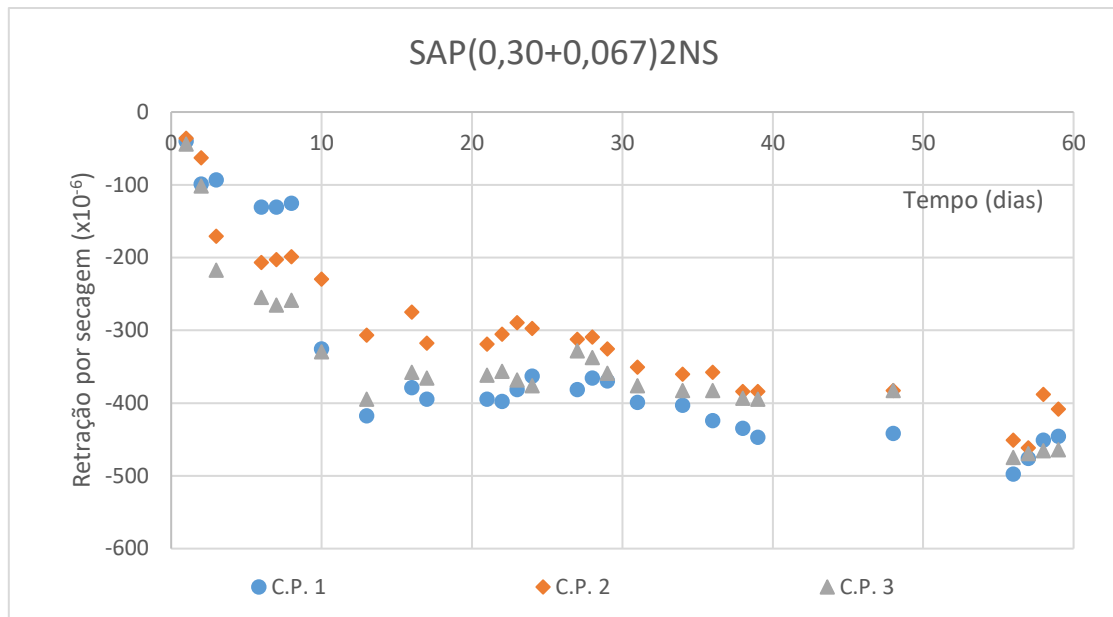


Figura B52 - Resultados individuais de retração por secagem, segundo a ASTM C 157, do concreto SAP(0,30+0,067)2NS

B.7 – Retração por secagem dos concretos – Extensômetro embutido

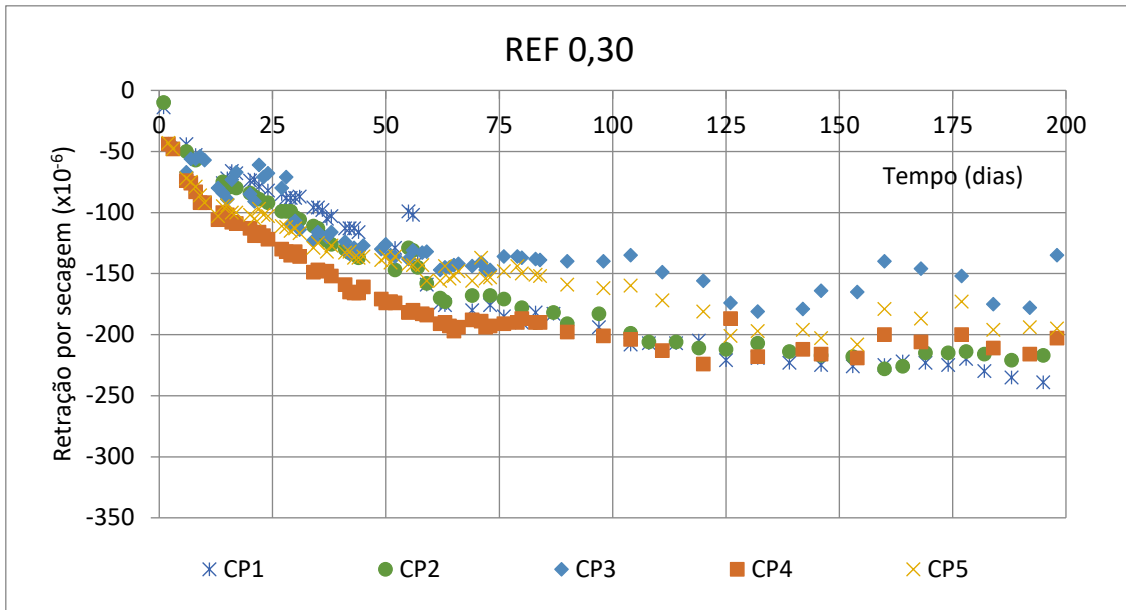


Figura B53 - Resultados individuais de retrração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto REF 0,30

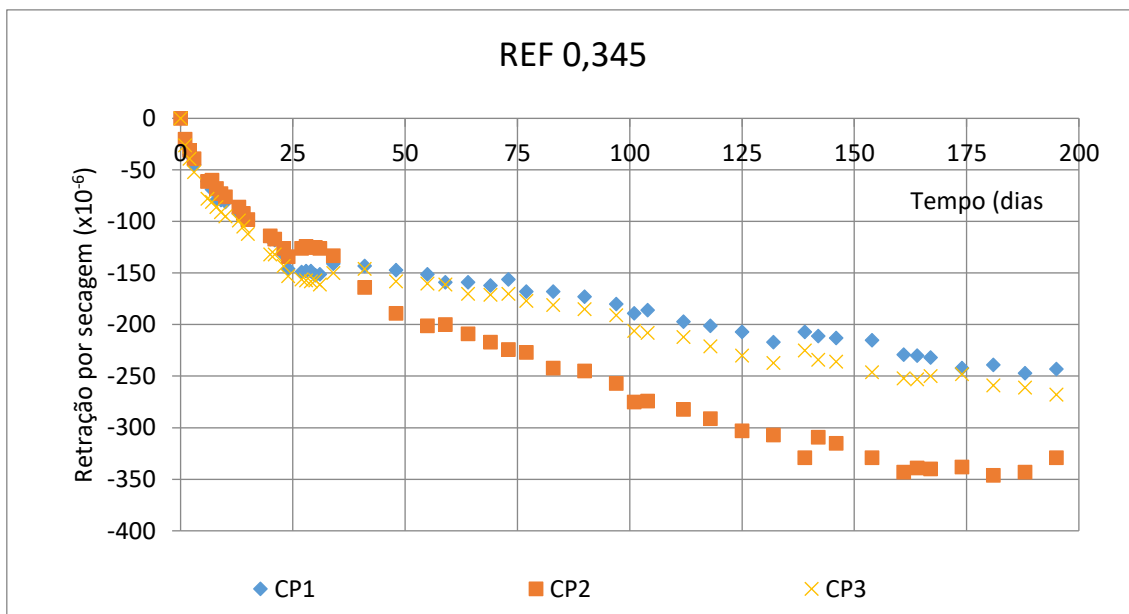


Figura B54 - Resultados individuais de retrração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto REF 0,345

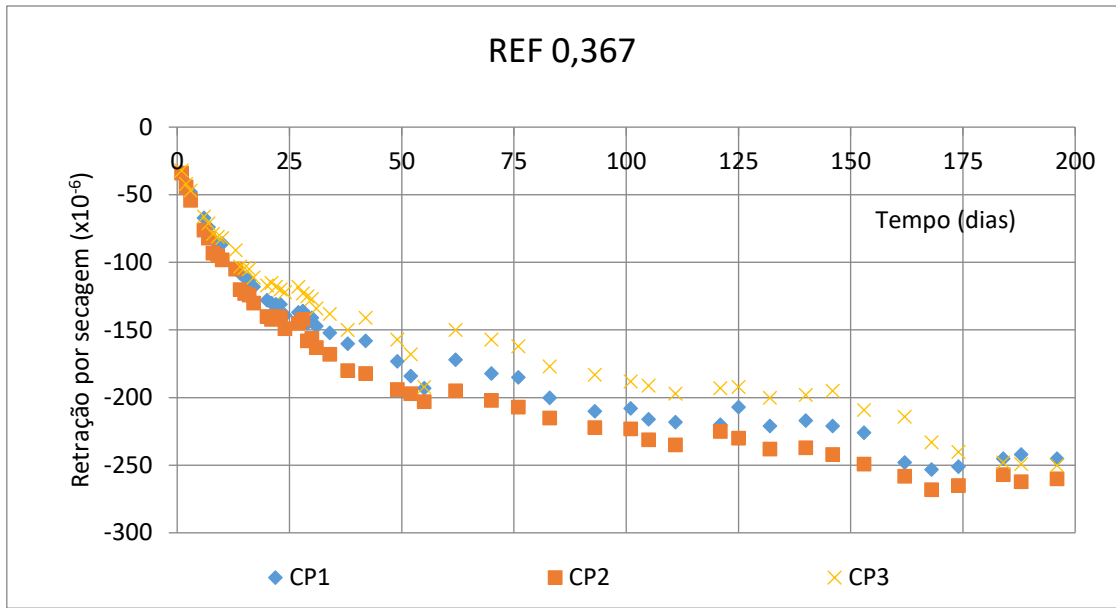


Figura B55 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto REF 0,367

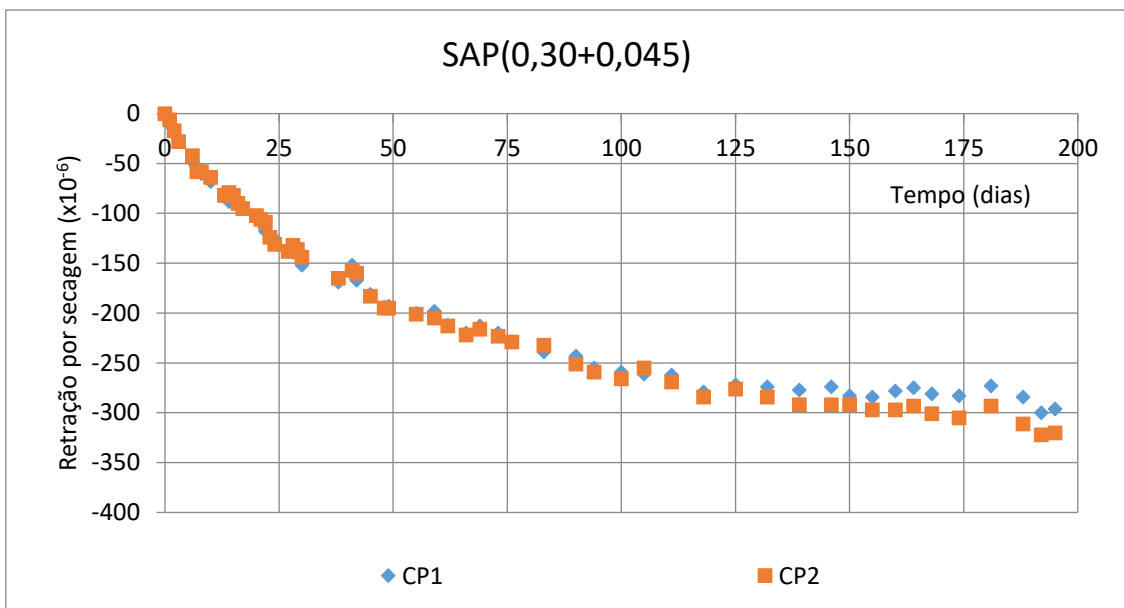


Figura B56 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto SAP(0,30+0,045)

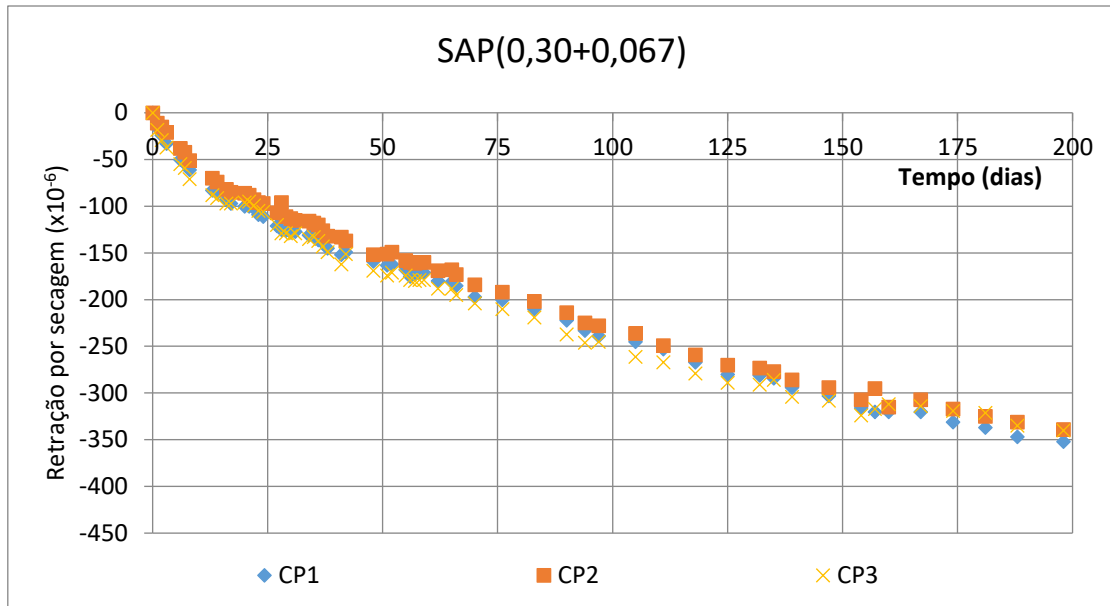


Figura B57 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto SAP(0,30+0,067)

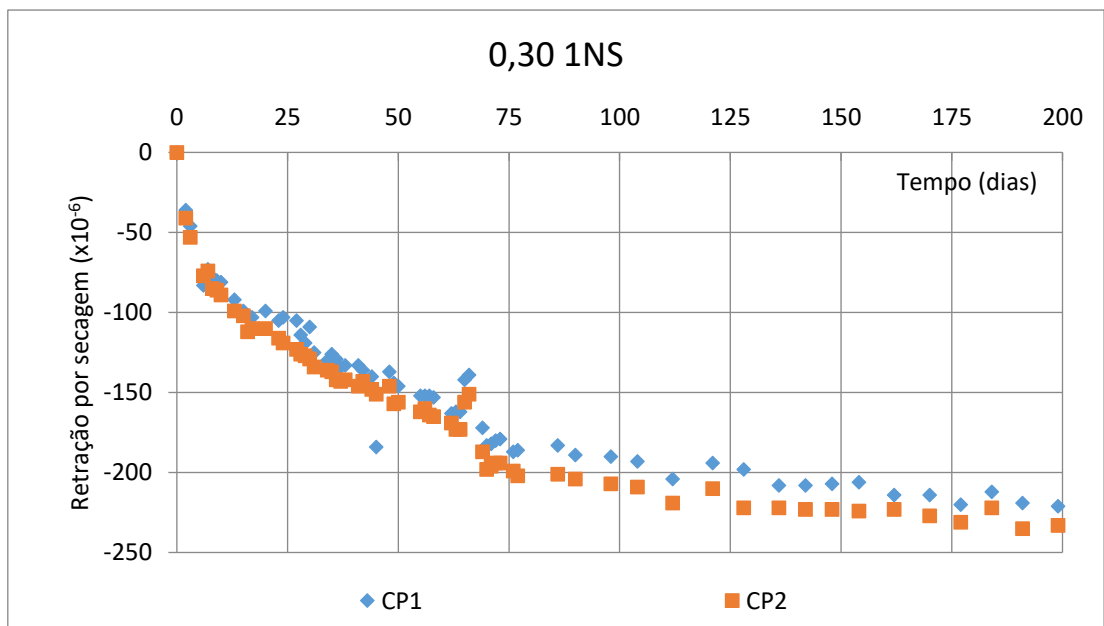


Figura B58 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto 0,30 1NS



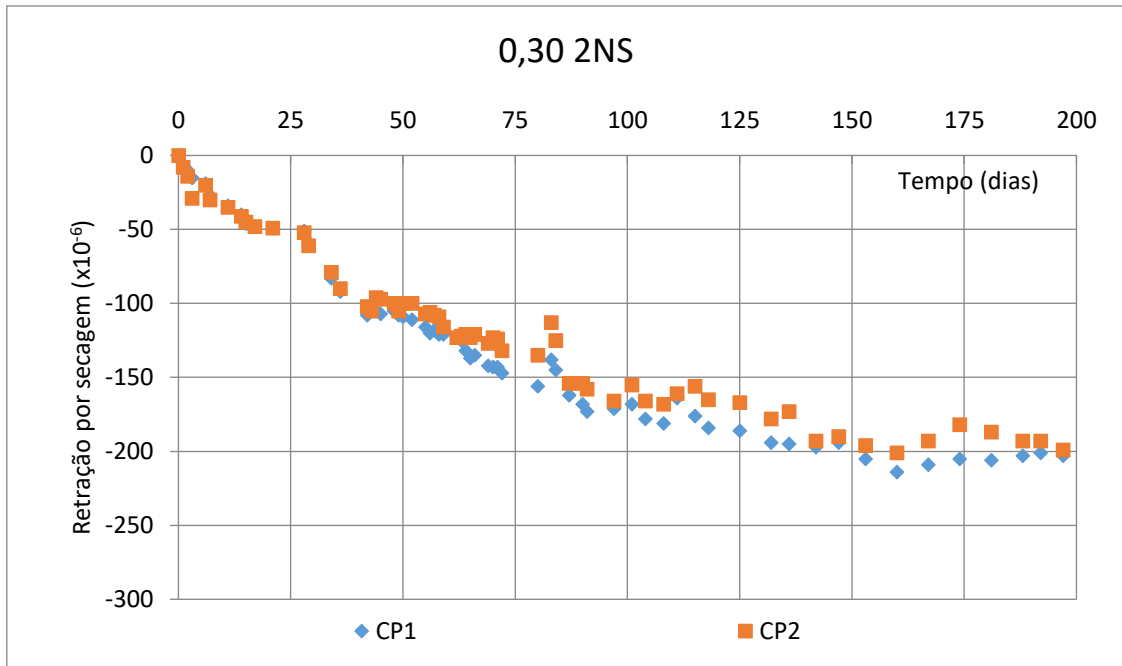


Figura B59 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto 0,30 2NS

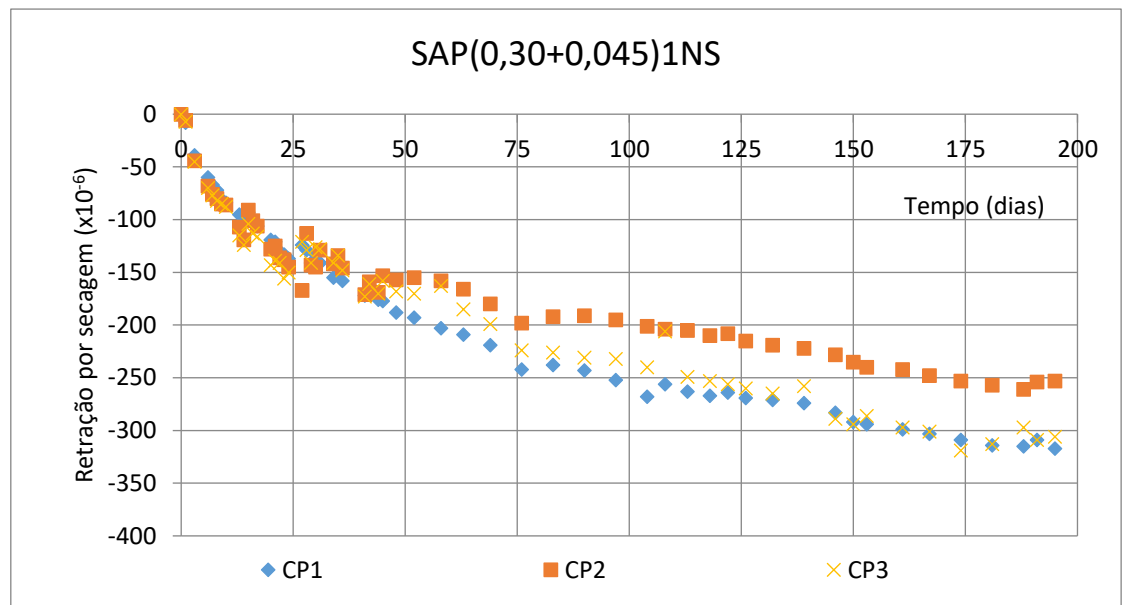


Figura B60 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto SAP(0,30+0,045)1NS

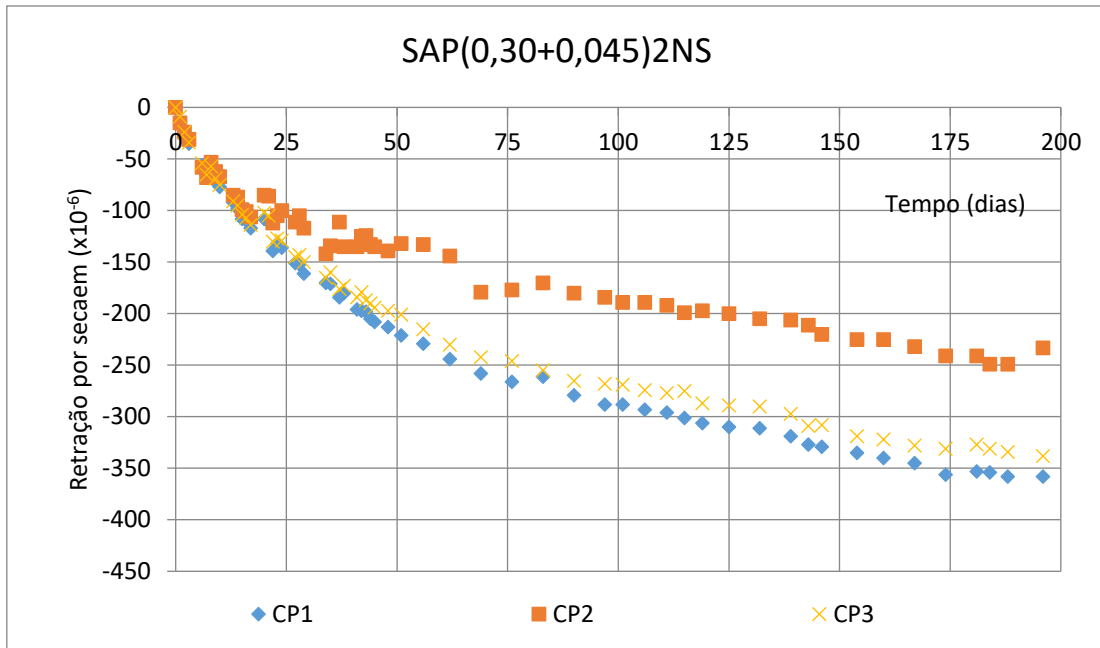


Figura B61 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto SAP(0,30+0,045)2NS

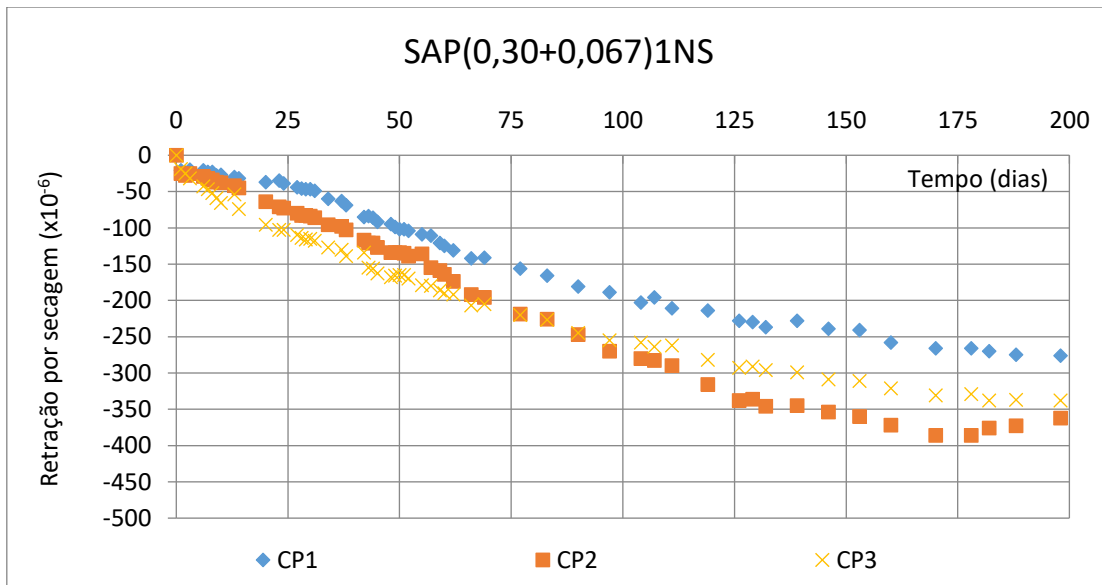


Figura B62 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto SAP(0,30+0,067)1NS

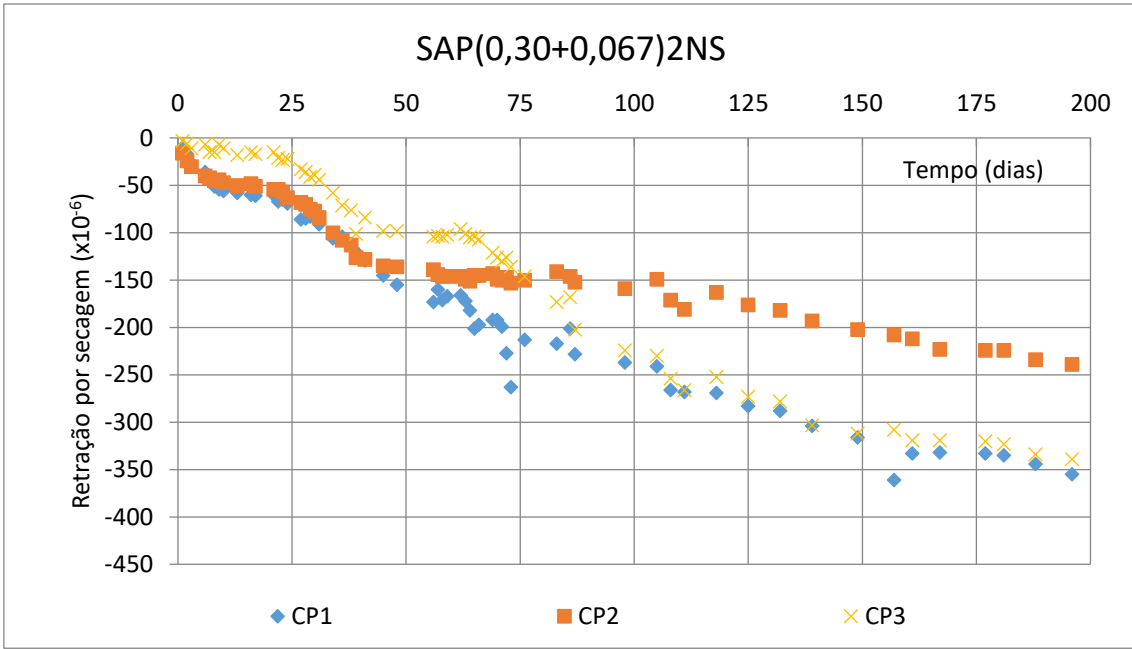


Figura B63 - Resultados individuais de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido, do concreto SAP(0,30+0,067)2NS

B.8 – Comparação entre resultados de retração por secagem dos concretos pelo método da ASTM C 157 e pelo método do extensômetro embutido

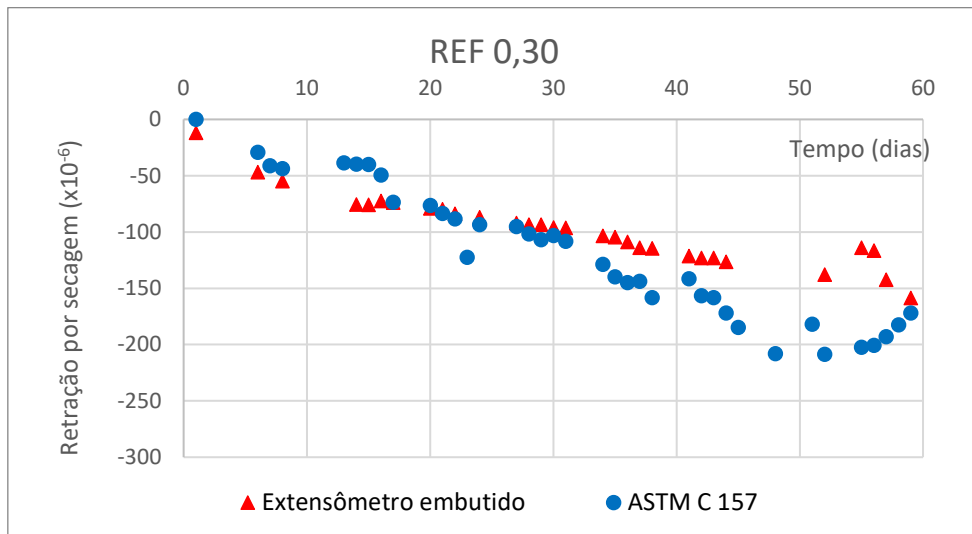


Figura B64 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto REF 0,30

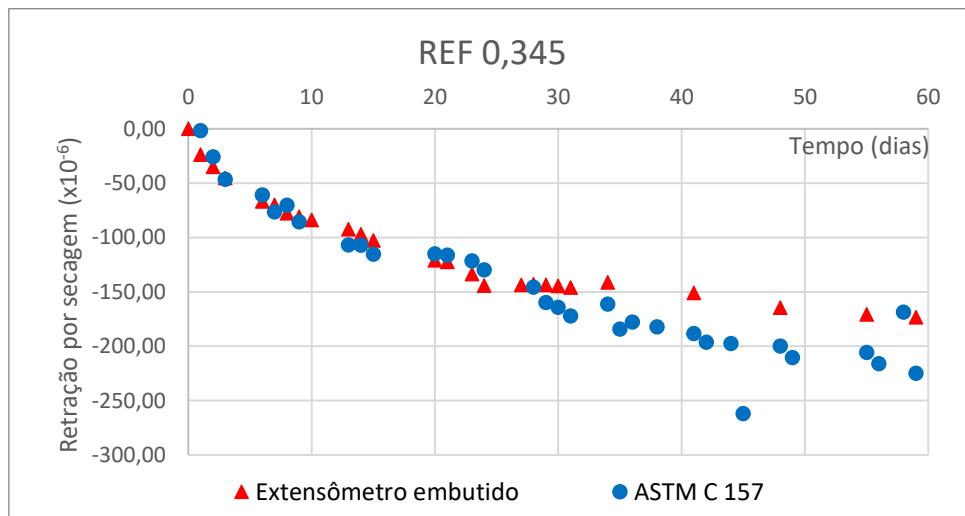


Figura B65 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto REF 0,345

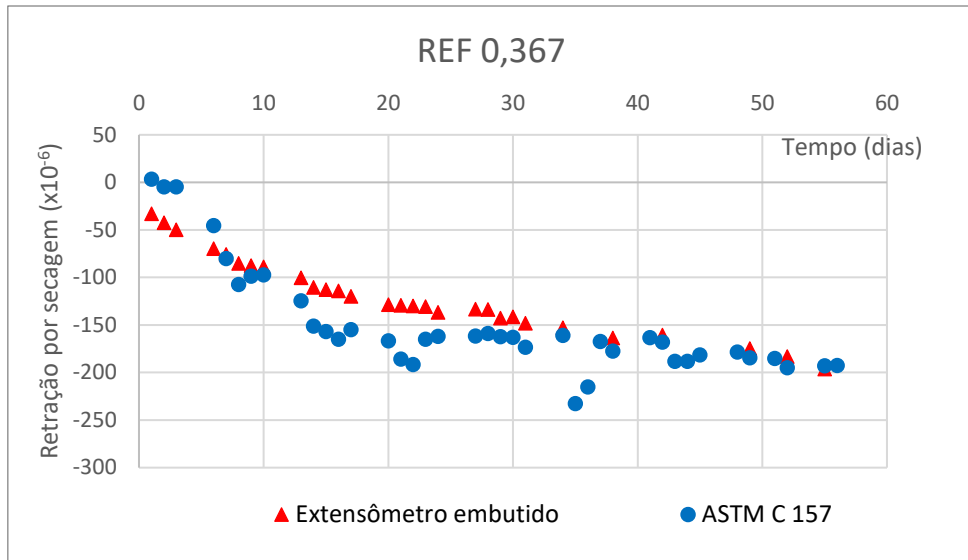


Figura B66 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto REF 0,367

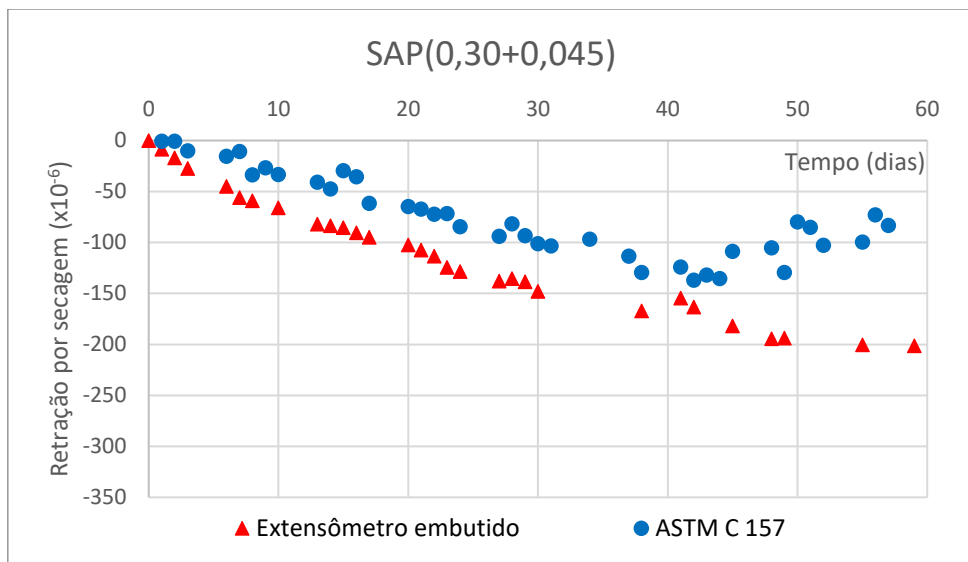


Figura B67 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto SAP(0,30+0,045)

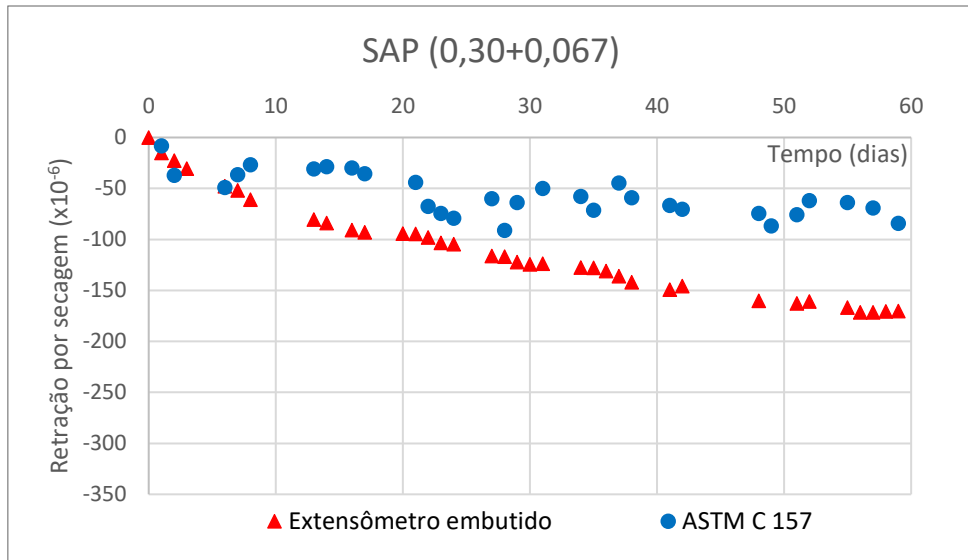


Figura B68 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto SAP(0,30+0,067)

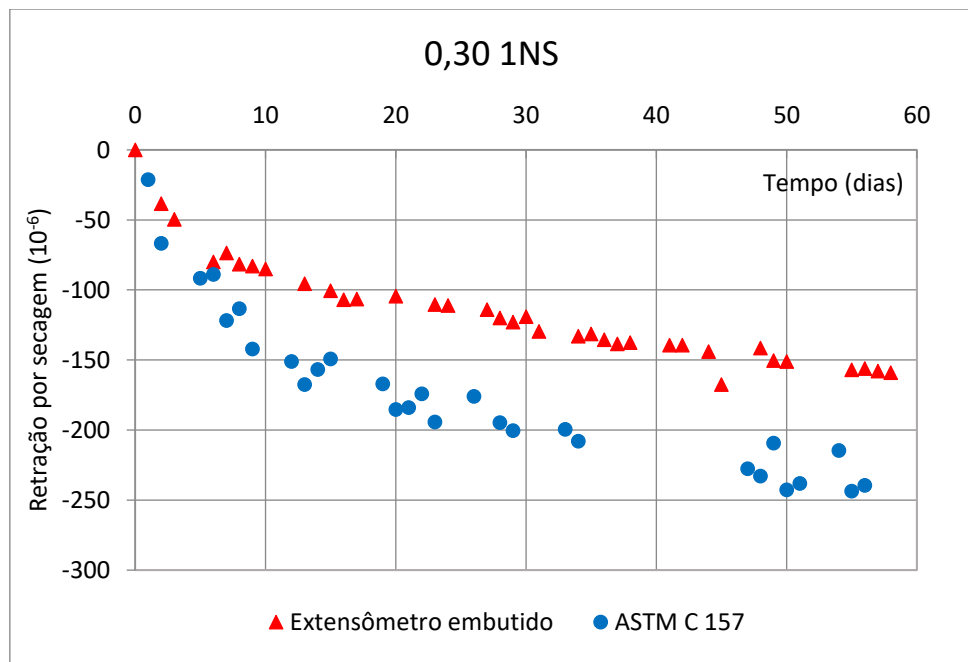


Figura B69 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto 0,30 1NS

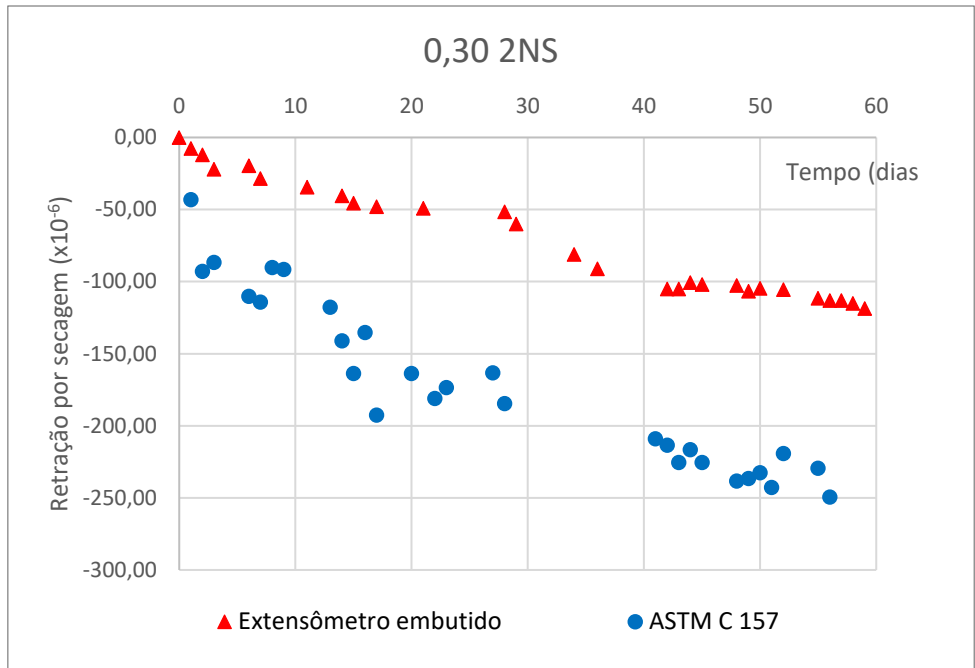


Figura B70 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto 0,30 2NS

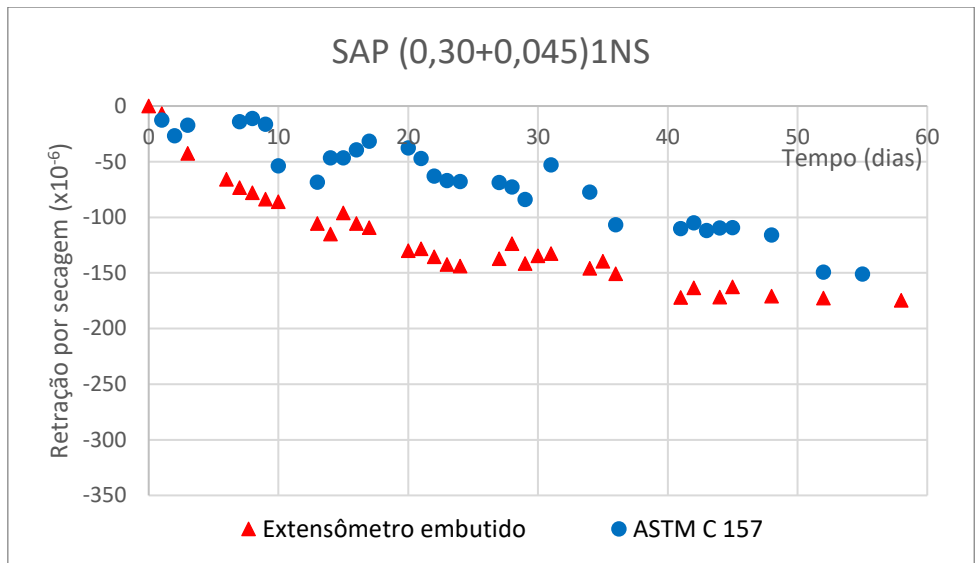


Figura B71 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto SAP(0,30+0,045)1NS

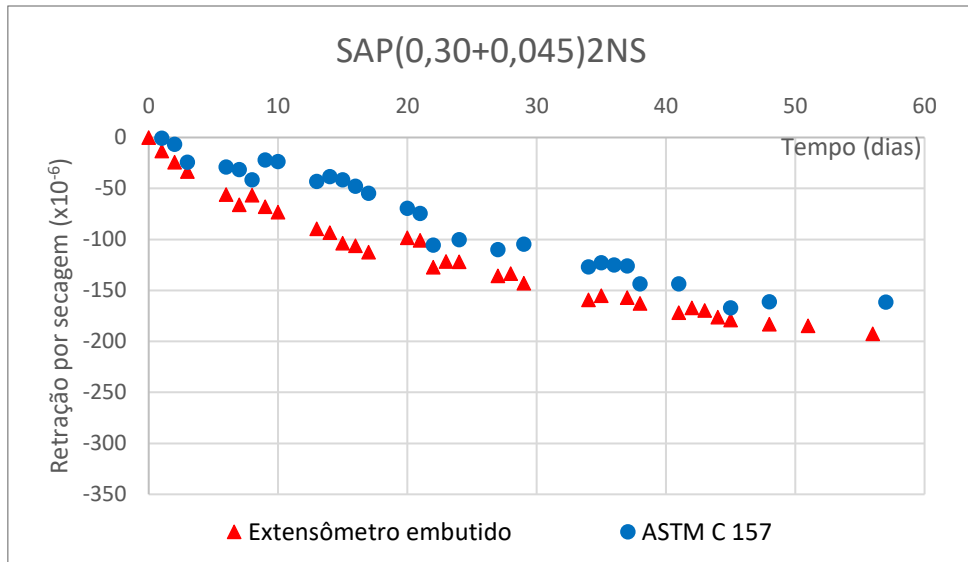


Figura B72 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto SAP(0,30+0,045)2NS

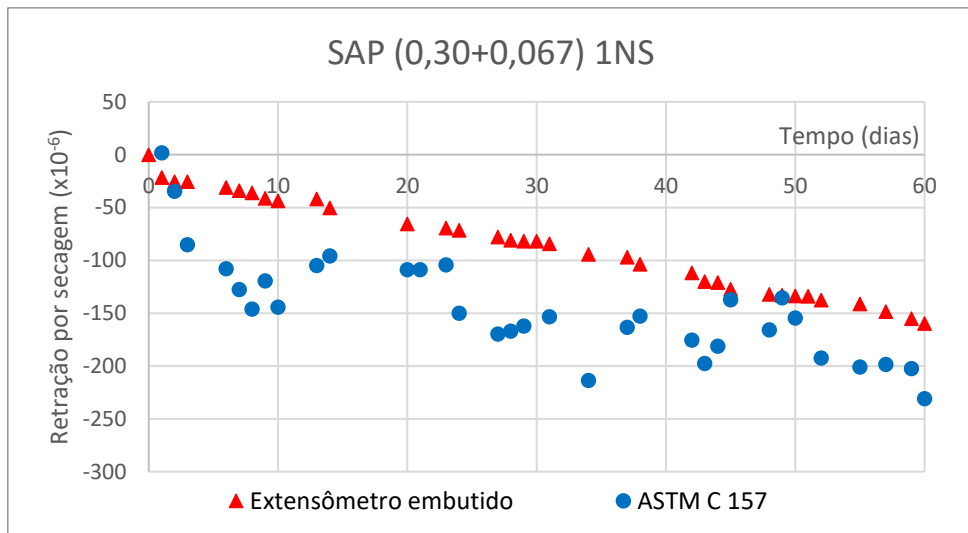


Figura B73 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto SAP(0,30+0,067)1NS



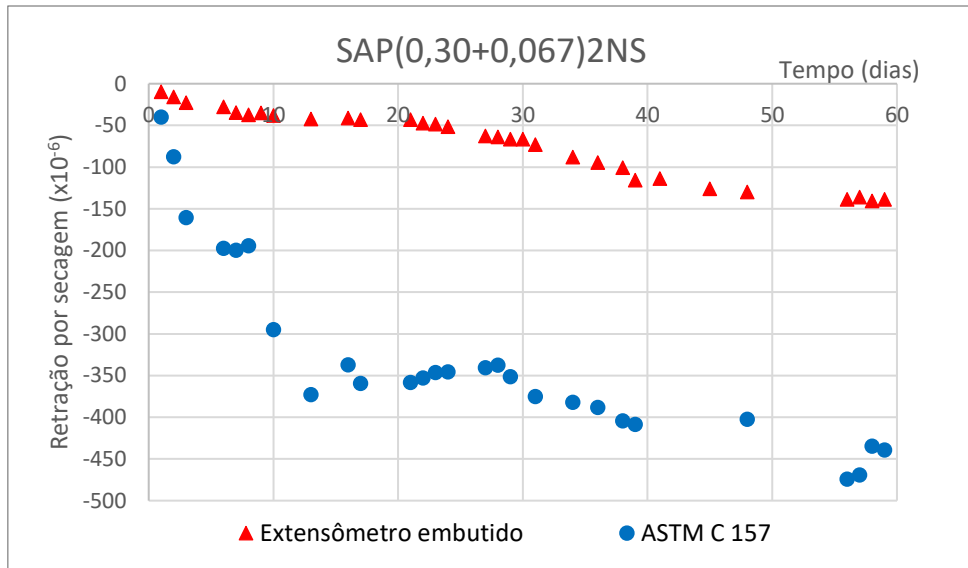


Figura B74 – Comparação dos resultados médios de retração por secagem, pelo método do extensômetro embutido e método da ASTM C157, do concreto SAP(0,30+0,067)2NS

B.9 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem

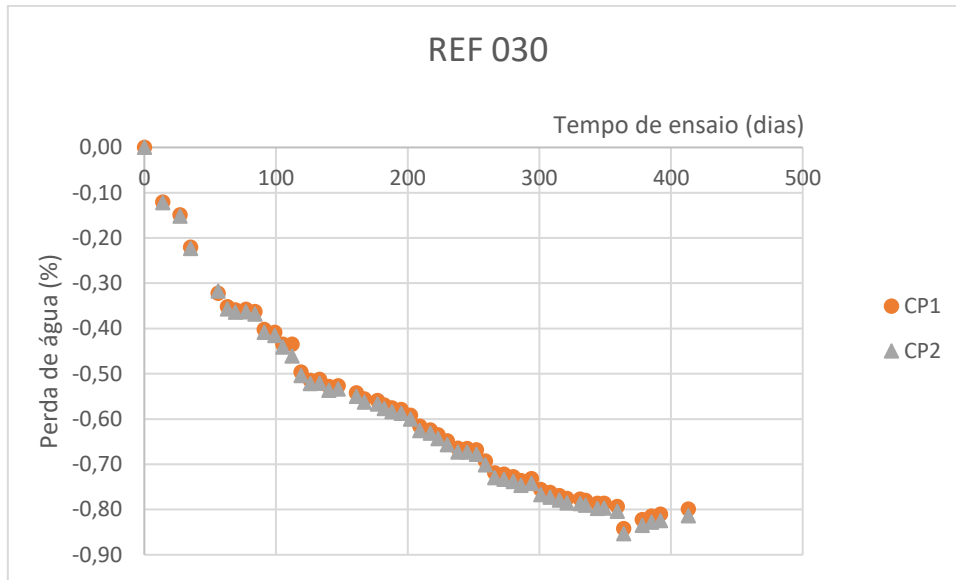


Figura B75 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto REF 0,30

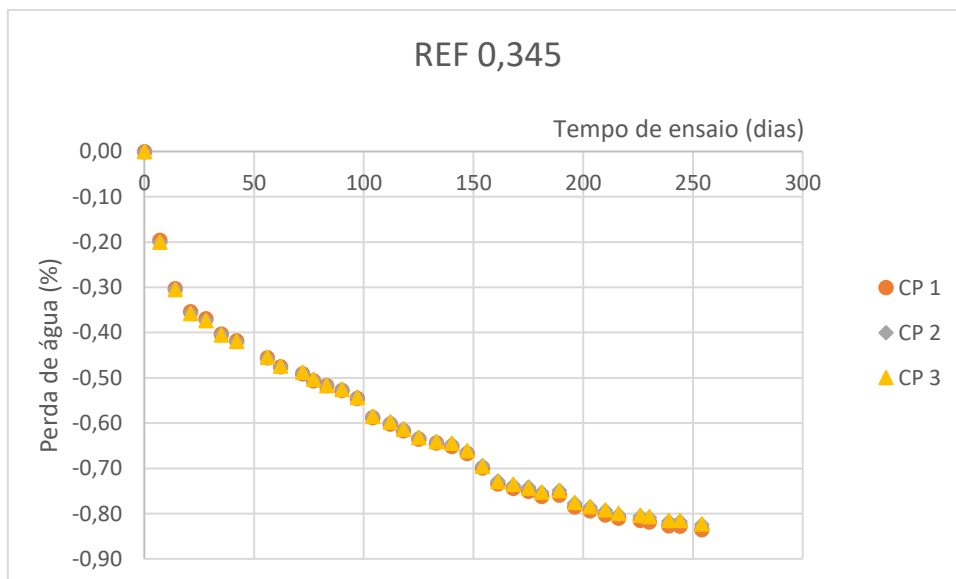


Figura B76 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto REF 0,345

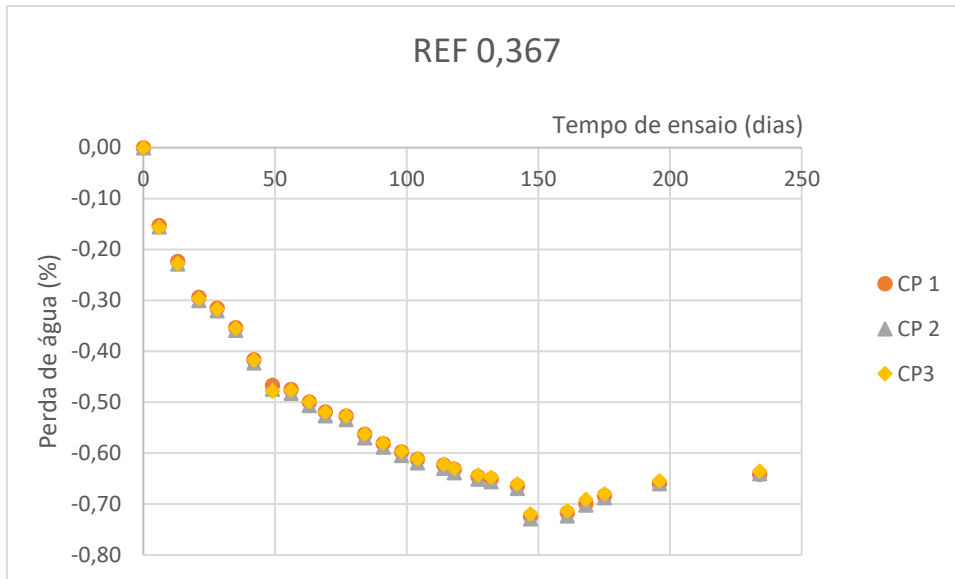


Figura B77 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto REF 0,367

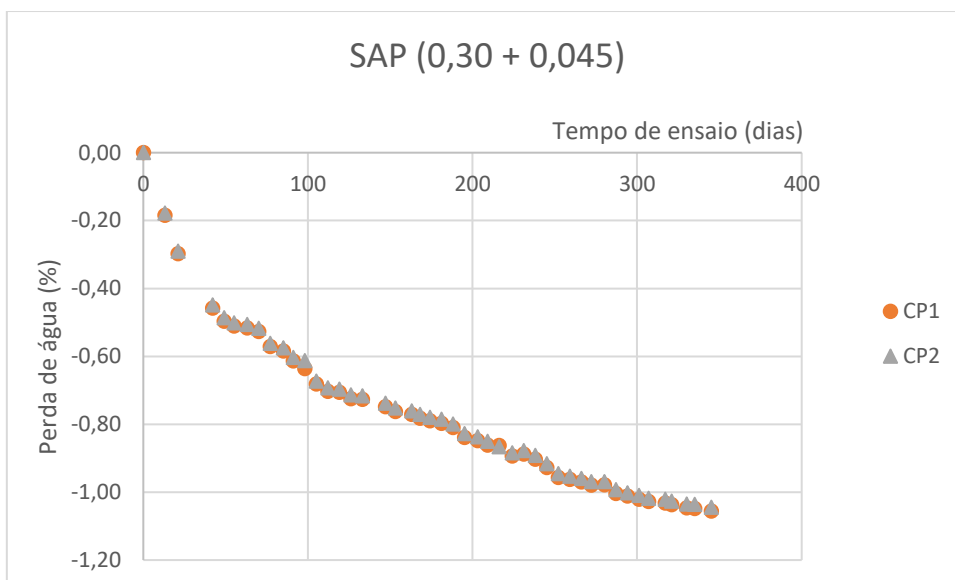


Figura B78 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,045)

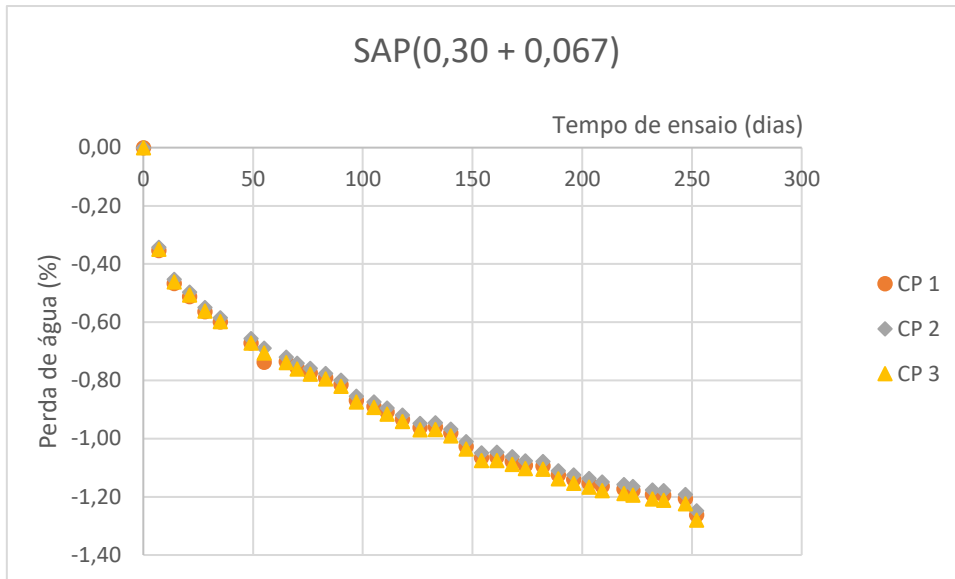


Figura B79 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,067)

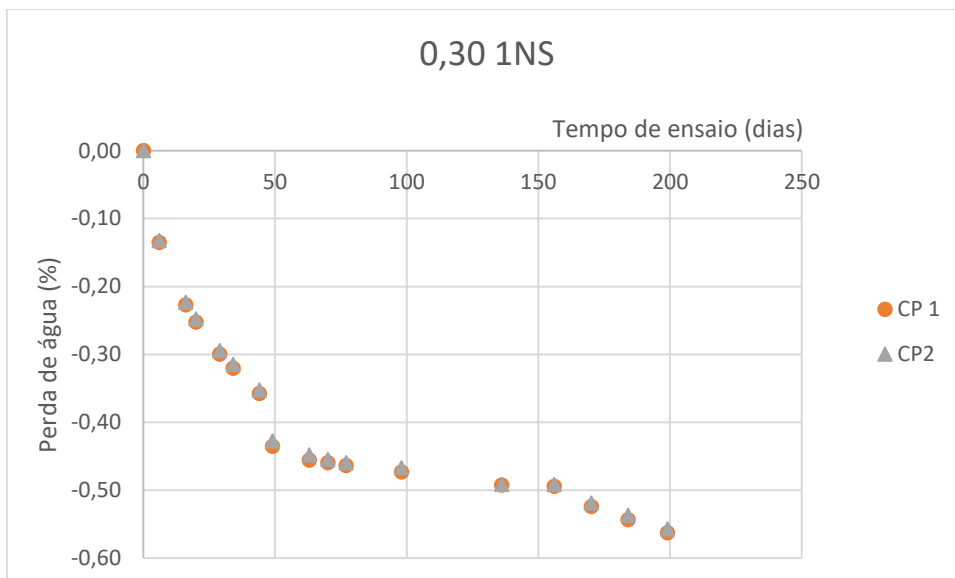


Figura B80 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto 0,30 1NS

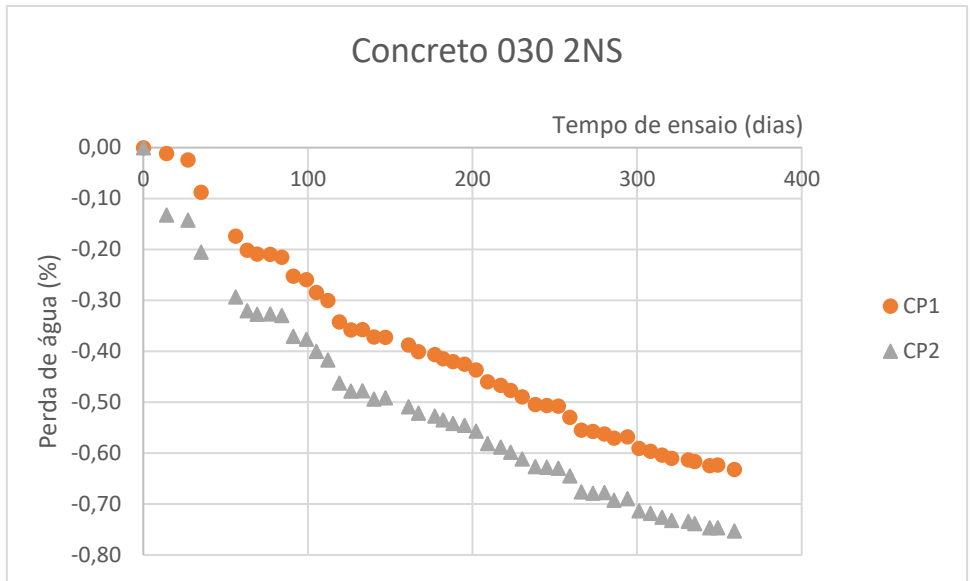


Figura B81 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto 0,30 2NS

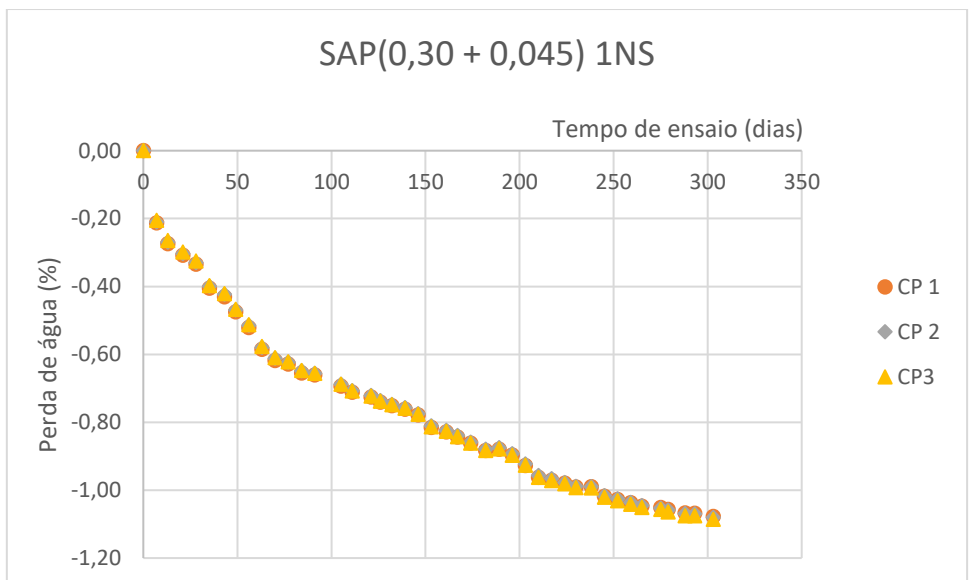


Figura B82 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,045)1NS

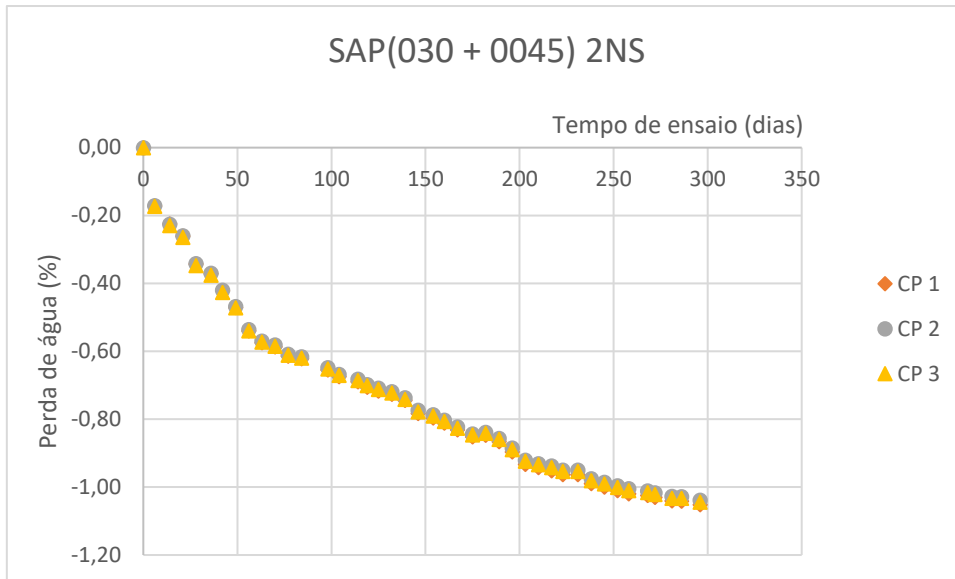


Figura B83 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,045)2NS

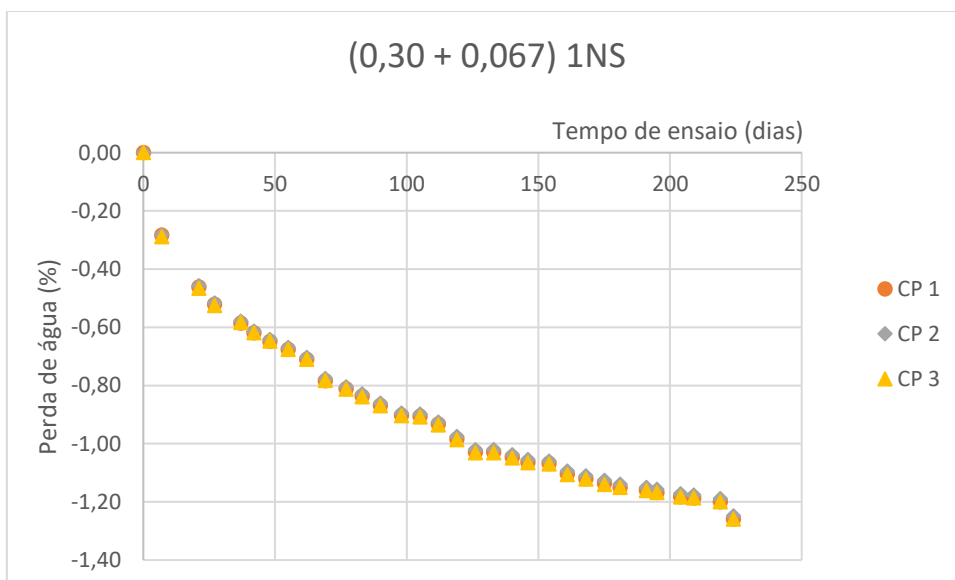


Figura B84 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,067)1NS

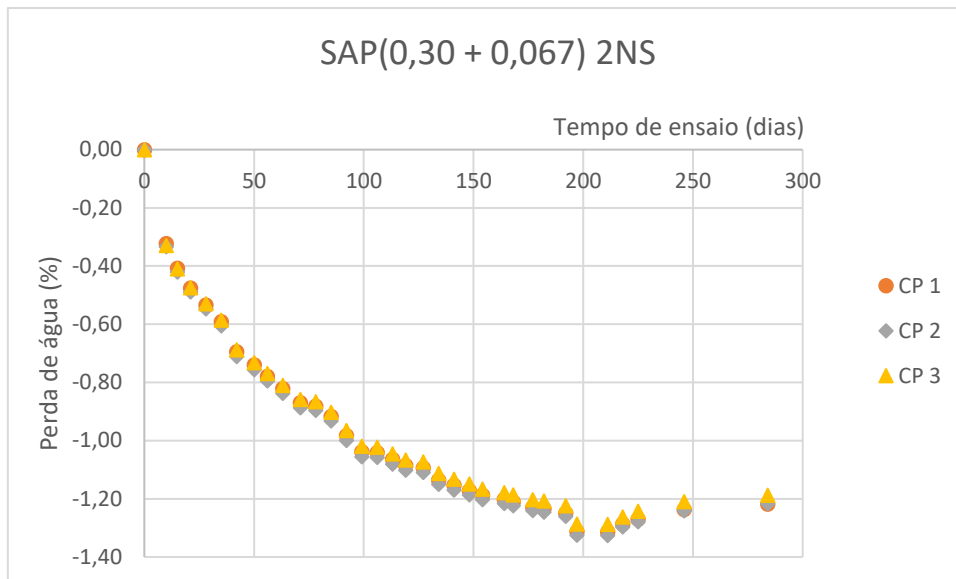


Figura B85 – Resultados individuais de perda de massa devido à retração por secagem do concreto SAP(0,30+0,067)2NS

B.10 – Resultados individuais das propriedades mecânicas e elásticas dos concretos

Tabela B2 - Resultados individuais de resistência à compressão dos concretos

Traço	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)								
		CP1	CP2	CP3	Méd.1	Des. Pad.	CV (%)	Méd	Des. Pad.	CV (%)
0,30 1NS	3	41,3	56,7	53,4	50,5	6,62	13,1	55,1	1,65	3,0
	7	74,0	65,7	57,2	65,6	6,86	10,5	69,9	4,15	5,9
	28	74,7	70,8	70,3	71,9	1,97	2,7	71,9	1,97	2,7
	91	76,1	82,7	77,9	78,9	2,79	3,5	78,9	2,79	3,5
	182	83,4	83,4	84,1	83,6	0,33	0,4	83,6	0,33	0,4
0,30 2 NS	3	60,2	64,2	60,8	61,7	1,76	2,9	61,7	1,76	2,9
	7	59,7	69,5	73,5	67,6	5,80	8,6	71,5	2,00	2,8
	28	87,0	82,9	76,5	82,1	4,32	5,3	85,0	2,05	2,4
	91	91,5	89,3	87,1	89,3	1,80	2,0	89,3	1,80	2,0
	182	86,2	99,5	96,5	94,1	5,70	6,1	98,0	2,12	2,3
REF 0,30	1	44,9	44,7	44,4	44,7	0,21	0,5	44,7	0,21	0,5
	3	62,3	57,4	62,0	60,6	2,24	3,7	60,6	2,24	3,7
	7	69,6	73,2	66,5	69,8	2,74	3,9	69,8	2,74	3,9
	28	77,3	63,9	75,8	72,3	5,99	8,3	76,6	0,75	1,0
	91	85,7	89,5	87,2	87,5	1,56	1,8	87,5	0,75	0,9%
	182	87,6	94,4	92,5	91,5	2,86	3,1	91,5	2,86	3,1
SAP(0,30+0,045)	1	39,1	42,4	42,1	41,2	1,49	3,6	41,2	1,49	3,6
	3	55,8	57,9	55,0	56,2	1,22	2,2	56,2	1,22	2,2
	7	48,4	58,4	65,3	57,4	6,94	12,1	61,9	3,45	5,6
	28	72,5	67,5	73,2	71,1	2,54	3,6	71,1	2,54	3,6
	91	77,3	72,0	76,2	75,2	2,28	3,0	75,2	2,28	3,0
	182	80,9	86,8	89,3	85,7	3,52	4,1	85,7	3,52	4,1
SAP(0,30+0,045)1NS	1	44,1	40,3	42,1	42,2	1,55	3,7	42,2	1,55	3,7
	3	51,7	56,4	59,6	55,9	3,24	5,8	55,9	3,24	5,8
	7	58,0	71,1	72,0	67,0	6,40	9,5	71,6	0,45	0,6
	28	65,6	76,3	75,2	72,4	4,81	6,6	75,8	0,78	1,0
	91	77,1	73,6	79,6	76,8	2,46	3,2	76,8	2,46	3,2
	182	83,5	81,3	81,9	82,2	0,93	1,1	82,2	0,93	1,1
SAP(0,30+0,045)2 NS	3	62,8	61,5	62,7	62,3	0,59	0,9	62,3	0,59	0,9
	7	64,2	67,4	66,0	65,9	1,31	2,0	65,9	1,31	2,0
	28	71,0	69,9	72,6	71,2	1,11	1,6	71,2	1,11	1,6
	91	76,8	82,0	75,3	78,0	2,87	3,7	78,0	2,87	3,7



Traço	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)								
		CP1	CP2	CP3	Méd.1	Des. Pad.	CV (%)	Méd	Des. Pad.	CV (%)
	182	91,3	90,9	89,9	90,7	0,59	0,6	90,7	0,59	0,6
REF 0,345	1	48,6	51,0	48,3	49,3	1,21	2,5	49,3	1,21	2,5
	3	60,9	63,7	57,3	60,6	2,62	4,3	60,6	2,62	4,3
	7	65,2	65,1	73,6	68,0	3,98	5,9	68,0	3,98	5,9
	28	73,4	79,0	72,0	74,8	3,02	4,0	74,8	3,02	4,0
	91	82,2	83,5	82,1	82,6	0,64	0,8	82,6	0,64	0,8
	182	89,2	91,8	76,0	85,7	6,92	8,1	90,5	1,84	2,0
SAP(0,30+0,067)	1	38,1	39,4	38,0	38,5	0,64	1,7	38,5	0,64	1,7
	3	52,2	52,8	54,5	53,2	0,97	1,8	53,2	0,97	1,8
	7	54,9	60,1	59,3	58,1	2,29	3,9	58,1	2,29	3,9
	28	64,1	63,2	57,6	61,6	2,88	4,7	61,6	2,88	4,7
	91	69,7	73,4	74,8	72,6	2,15	3,0	72,6	2,15	3,0
	182	85,2	76,6	79,0	80,3	3,62	4,5	80,3	3,62	4,5
SAP(0,30+0,067)INS	3	51,7	45,9	54,1	50,6	3,44	6,8	52,9	1,70	3,2
	7	58,0	61,9	61,1	60,3	1,68	2,8	60,3	1,68	2,8
	28	63,6	62,7	70,4	65,6	3,44	5,2	65,6	3,44	5,2
	91	72,6	74,5	73,0	73,4	0,82	1,1	73,8	0,82	1,1
	182	67,0	72,0	77,9	72,3	4,45	6,2	75,0	4,17	5,6
SAP(0,30+0,067)2NS	3	53,0	52,0	46,7	50,6	2,76	5,5	50,6	2,76	5,5
	7	58,6	59,7	55,8	58,0	1,64	2,8	58,0	1,64	2,8
	28	63,9	61,5	64,5	63,3	1,30	2,0	63,3	1,30	2,0
	91	68,6	67,0	70,6	68,7	1,47	2,1	68,7	1,47	2,1
	182	72,7	71,2	72,7	72,2	0,71	1,0	72,2	0,71	1,0
REF 0,367	1	31,7	30,7	31,5	31,3	0,44	1,4	31,3	0,44	1,4
	3	39,1	41,3	42,0	40,8	1,24	3,0	40,8	1,24	3,0
	7	51,3	51,6	46,8	49,9	2,20	4,4	49,9	2,20	4,4
	28	75,1	75,1	65,3	71,8	4,62	6,4	75,1	0,00	0,0
	91	82,9	83,3	84,7	83,6	0,77	0,9	83,6	0,77	0,9
	182	88,3	87,5	91,8	89,2	1,87	2,1	89,2	1,87	2,1

Tabela B3 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos

Traço	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)								
		CP1	CP2	CP3	Média 1	Desvio Padrão	CV (%)	Média 2	Desvio Padrão	CV (%)
REF 0,30	3	5,22	4,56	4,18	4,65	0,43	9,23	4,65	0,43	9,23
	7	5,62	5,5	5,83	5,65	0,14	2,41	5,65	0,14	2,41
	28	6,16	5,87	6,06	6,03	0,12	1,99	6,03	0,12	1,99
	91	6,46	6,41	6,44	6,44	0,02	0,32	6,44	0,02	0,32
	182	6,67	6,91	6,52	6,70	0,16	2,40	6,70	0,16	2,40
REF 0,345	3	5,3	5,47	6,19	5,65	0,39	6,82	5,65	0,39	6,82
	7	5,54	5,96	6,2	5,90	0,27	4,62	5,90	0,27	4,62
	28	6,43	6,2	5,9	6,18	0,22	3,51	6,18	0,22	3,51
	91	5,72	6,69	5,94	6,12	0,42	6,79	6,12	0,42	6,79
	182	6,72	6,75	6,8	6,76	0,57	0,84	6,76	0,57	0,84
REF 0,367	3	4,47	4,98	4,27	4,57	0,30	6,54	4,57	0,30	6,54
	7	5,34	5,3	5,47	5,37	0,07	1,35	5,37	0,07	1,35
	28	6,63	5,82	5,48	5,98	0,48	8,07	5,98	0,48	8,07
	91	6,55	6,6	5,53	6,23	0,49	7,92	6,23	0,49	7,92
	182	6,7	6,39	6,95	6,68	0,23	3,43	6,68	0,23	3,43
SAP(0,30+0,045)	3	3,88	4,68	5,68	4,75	0,74	15,51	5,18	0,71	13,65
	7	6,71	6,12	5,91	6,25	0,34	5,42	6,25	0,34	5,42
	28	6,4	7,32	6,34	6,69	0,45	6,71	6,69	0,45	6,71
	91	6,98	7,35	7,41	7,25	0,19	2,62	7,25	0,19	2,62
	182	7,42	7,81	7,82	7,68	0,19	2,42	7,68	0,19	2,42
SAP(0,30+0,067)	3	5,04	4,75	5,2	5,00	0,19	3,73	5,00	0,19	3,73
	7	6,24	4,92	6,34	5,83	0,65	11,09	6,29	0,07	1,12
	28	6,24	6,09	6,69	6,34	0,25	4,02	6,34	0,25	4,02
	91	6,81	6,82	7,47	7,03	0,31	4,39	7,03	0,31	4,39
	182	5,34	7,23	7,13	6,57	0,87	13,22	7,18	0,07	0,98
0,30 INS	3	5,04	5,08	5,01	5,04	0,03	0,57	5,04	0,03	0,57
	7	5,92	5,82	5,44	5,73	0,21	3,61	5,73	0,21	3,61
	28	5,99	6,49	6,18	6,22	0,21	3,31	6,22	0,21	3,31
	91	6,85	7,10	6,65	6,87	0,18	2,68	6,87	0,18	2,68
	182	7,29	7,04	6,2	6,84	0,47	6,81	6,84	0,47	6,81
0,30 2NS	3	4,57	5,57	5,3	5,15	0,42	8,21	5,15	0,42	8,21
	7	5,70	5,73	5,8	5,74	0,04	0,73	5,74	0,04	0,73
	28	6,33	7,27	5,17	6,26	0,86	13,73	6,80	0,47	6,91
	91	6,84	6,81	7,33	6,99	0,24	3,41	6,99	0,24	3,41
	182	7,43	7,3	6,71	7,15	0,31	4,38	7,15	0,31	4,38

Traço	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)								
		CP1	CP2	CP3	Média 1	Desvio Padrão	CV (%)	Média 2	Desvio Padrão	CV (%)
SAP(0,30+0,045)1NS	3	4,16	4,32	5,12	4,53	0,42	9,26	4,53	0,42	9,26
	7	6,34	6,18	6,17	6,23	0,08	1,25	6,23	0,08	1,25
	28	5,67	5,7	6,63	6,00	0,45	7,43	6,00	0,45	7,43
	91	6,6	4,71	6,39	5,90	0,85	14,34	6,50	0,15	2,29
	182	7,82	6,96	6,87	7,22	0,43	5,93	7,22	0,43	5,93
SAP(0,30+0,045)2NS	3	6,59	5,98	6,56	6,38	0,28	4,40	6,38	0,28	4,40
	7	6,46	5,66	5,93	6,02	0,33	5,52	6,02	0,33	5,52
	28	6,38	6,36	6,63	6,46	0,12	1,90	6,46	0,12	1,90
	91	7,26	7,24	7,44	7,31	0,09	1,23	7,31	0,09	1,23
	182	7,65	7,55	5,75	6,98	0,87	12,50	7,60	0,07	0,93
SAP(0,30+0,067)1NS	3	5,12	5,23	4,27	4,87	0,43	8,80	4,87	0,43	8,80
	7	5,82	5,81	5,69	5,77	0,06	1,02	5,77	0,06	1,02
	28	6,07	3,87	6,21	5,38	1,07	19,91	6,14	0,10	1,61
	91	6,51	6,53	6,69	6,58	0,08	1,22	6,58	0,08	1,22
	182	7,49	6,47	7,2	7,05	0,43	6,08	7,05	0,43	6,08
SAP(0,30+0,067)2NS	3	4,99	4,98	4,13	4,70	0,40	8,58	4,70	0,40	8,58
	7	5,08	5,31	5,05	5,15	0,12	2,26	5,15	0,12	2,26
	28	5,65	5,68	5,61	5,65	0,03	0,51	5,65	0,03	0,51
	91	5,98	5,99	5,89	5,95	0,04	0,76	5,95	0,04	0,76
	182	6,52	6,56	6,35	6,48	0,09	1,41	6,48	0,09	1,41

Tabela B4 - Resultados individuais de módulo de deformação dos concretos

Traço	Idade (dias)	Módulo de deformação (GPa)									
		CP1	CP2	CP3	Média 1	Desvio Padrão	CV (%)	Média 2	Média	Desvio Padrão	CV (%)
0,30 INS	3	33,6	34,8	35,3	34,57	0,71	2,06		34,57	0,71	2,06
	7	35,5	36,6	38	36,70	1,02	2,79		36,70	1,02	2,79
	28	37,1	38,5	38,5	38,03	0,66	1,74		38,03	0,66	1,74
	91	38,3	37	38,7	38,00	0,73	1,91		38,00	0,73	1,91
	182	38	38,7	38,4	38,37	0,29	0,75		38,37	0,29	0,75
0,30 2 NS	3	35	36,1	34,4	35,17	0,70	2,00		35,17	0,70	2,00
	7	35,6	37,5	37,7	36,93	0,95	2,56		36,93	0,95	2,56
	28	36,9	37,2	37,5	37,20	0,24	0,66		37,20	0,24	0,66
	91	38,5	41,5	39	39,67	1,31	3,31		39,67	1,31	3,31
	182	39,4	38,5	39	38,97	0,37	0,94		38,97	0,37	0,94
REF 0,30	3	33,6	32,5	32,9	33,00	0,45	1,38		33,00	0,45	1,38
	7	37,1	36,4	35,8	36,43	0,53	1,46		36,43	0,53	1,46
	28	36,8	35,3	36,5	36,20	0,65	1,79		36,20	0,65	1,79
	91	38,6	45,3	38,3	40,73	3,23	7,93	38,45	38,45	0,15	0,39
	182	37	38	38	37,53	0,69	1,85		37,53	0,69	1,85
SAP(0,30 + 0,045)	3	30,2	30,5	30,1	30,27	0,17	0,56		30,27	0,17	0,56
	7	33,3	32,5	33,6	33,13	0,46	1,40		33,13	0,46	1,40
	28	35,3	35,4	34,8	35,17	0,26	0,75		35,17	0,26	0,75
	91	36,8	36,9	37,2	36,97	0,17	0,46		36,97	0,17	0,46
	182	36,8	35,5	37,8	36,70	0,94	2,57		36,70	0,94	2,57
SAP(0,30+0,045)1NS	3	30,6	31	31,8	31,13	0,50	1,60		31,13	0,50	1,60
	7	32,4	31,5	30,8	31,57	0,65	2,07		31,57	0,65	2,07
	28	34,4	34	33,9	34,10	0,22	0,63		34,10	0,22	0,63
	91	37,8	35,5	36,8	36,70	0,94	2,57		36,70	0,94	2,57
	182	35,1	34,3	35,5	34,97	0,50	1,43		34,97	0,50	1,43
SAP(0,30+0,045)2NS	3	31	31,7	30,5	31,07	0,49	1,58		31,07	0,49	1,58
	7	33,6	32,7	33,9	33,40	0,51	1,53		33,40	0,51	1,53
	28	35,3	38,1	44,0	39,13	3,63	9,27	38,62	38,62	1,40	3,62
	91	36,5	36,6	38,4	37,17	0,87	2,35		37,17	0,87	2,35
	182	35,8	36,5	38,4	36,90	1,10	2,98		36,90	1,10	2,98
REF 0,345	3	33,1	32,6	32,8	32,83	0,21	0,63		32,83	0,21	0,63
	7	33,1	34,8	35	34,30	0,85	2,49		34,30	0,85	2,49
	28	35,4	36,5	36,8	36,23	0,60	1,66		36,23	0,60	1,66
	91	38,1	36,4	37,5	37,33	0,70	1,89		37,33	0,70	1,89
	182	36,3	35,6	36,5	36,13	0,39	1,07		36,13	0,39	1,07

Traço	Idade (dias)	Módulo de deformação (GPa)									
		CP1	CP2	CP3	Média 1	Desvio Padrão	CV (%)	Média 2	Média	Desvio Padrão	CV (%)
SAP(0,30±0,067)	3	27,4	28	29,2	28,20	0,75	2,65		28,20	0,75	2,65
	7	31,2	31,1	31	31,10	0,08	0,26		31,10	0,08	0,26
	28	34	31,3	32,6	32,63	1,10	3,38		32,63	1,10	3,38
	91	32,7	33	34,7	33,47	0,88	2,63		33,47	0,88	2,63
	182	34,2	34	34,2	34,13	0,09	0,28		34,13	0,09	0,28
SAP(0,30±0,067)INS	3	29,6	30	28	29,20	0,86	2,96		29,20	0,86	2,96
	7	31	33,9	31,6	32,17	1,25	3,89		32,17	1,25	3,89
	28	33,1	32,9	34	33,33	0,48	1,44		33,33	0,48	1,44
	91	34,3	32,1	32,8	33,07	0,92	2,78		33,07	0,92	2,78
	182	32,8	32,7	32,8	32,77	0,05	0,14		32,77	0,05	0,14
SAP(0,30±0,067)2NS	3	29,1	29,3	29,8	29,40	0,29	1,00		29,40	0,29	1,00
	7	30	28,8	30,4	29,73	0,68	2,29		29,73	0,68	2,29
	28	31,8	30	31,2	31,00	0,75	2,41		31,00	0,75	2,41
	91	32,3	32,6	33,9	32,93	0,69	2,11		32,93	0,69	2,11
	182	33	32,4	33,4	32,93	0,41	1,25		32,93	0,41	1,25
REF 0,367	3	32,3	31,4	32,3	32,00	0,42	1,33		32,00	0,42	1,33
	7	36,7	33,7	34,4	34,93	1,28	3,67		34,93	1,28	3,67
	28	37,2	36,2	36,7	36,70	0,41	1,11		36,70	0,41	1,11
	91	37,4	37,2	37,6	37,40	0,16	0,44		37,40	0,16	0,44
	182	36,2	38,1	35,9	36,73	0,97	2,65		36,73	0,97	2,65

B.11 – Resultados de deformação lenta (fluência)

Tabela B5 - Resultados de fluência à compressão do concreto REF 0,30

AJUSTE FLUÊNCIA REF 0,30								
z (dias)		1,00	z (dias)		3,00	z (dias)		7,00
t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)
1,000	0,000	37,07	3,000	0,000	31,05	7,000	0,000	30,45
1,003	0,003	43,13	3,003	0,003	33,93	7,003	0,003	31,15
1,007	0,007	44,37	3,007	0,007	34,51	7,007	0,007	31,38
1,021	0,021	46,86	3,021	0,021	35,70	7,021	0,021	31,89
1,042	0,042	48,84	3,042	0,042	36,64	7,042	0,042	32,35
1,083	0,083	51,22	3,083	0,083	37,77	7,083	0,083	32,95
1,208	0,208	55,05	3,208	0,208	39,59	7,208	0,208	34,02
2	1,000	63,49	4	1,000	43,60	8	1,000	36,80
3	2,000	67,67	5	2,000	45,58	9	2,000	38,35
4	3,000	70,03	6	3,000	46,71	10	3,000	39,28
5	4,000	71,61	7	4,000	47,46	11	4,000	39,92
6	5,000	72,76	8	5,000	48,00	12	5,000	40,39
7	6,000	73,63	9	6,000	48,42	13	6,000	40,76
8	7,000	74,32	10	7,000	48,75	17	10,000	41,66
9	8,000	74,89	11	8,000	49,01	20	13,000	42,04
10	9,000	75,35	12	9,000	49,23	24	17,000	42,37
13	12,000	76,37	13	10,000	49,42	27	20,000	42,55
17	16,000	77,23	17	14,000	49,94	29	22,000	42,64
20	19,000	77,66	20	17,000	50,20	34	27,000	42,83
24	23,000	78,09	24	21,000	50,44	42	35,000	43,02
27	26,000	78,33	27	24,000	50,58	45	38,000	43,07
29	28,000	78,47	29	26,000	50,65	52	45,000	43,17
34	33,000	78,74	34	31,000	50,80	55	48,000	43,20
42	41,000	79,05	42	39,000	50,96	59	52,000	43,24
45	44,000	79,14	45	42,000	51,01	62	55,000	43,27
48	47,000	79,22	48	45,000	51,05	66	59,000	43,30
52	51,000	79,31	52	49,000	51,09	69	62,000	43,32
55	54,000	79,37	55	52,000	51,13	76	69,000	43,36
59	58,000	79,44	59	56,000	51,16	80	73,000	43,38
62	61,000	79,49	62	59,000	51,19	83	76,000	43,40
66	65,000	79,55	66	63,000	51,21	87	80,000	43,41
69	68,000	79,59	69	66,000	51,23	90	83,000	43,43
76	75,000	79,66	76	73,000	51,27	94	87,000	43,44
80	79,000	79,70	80	77,000	51,29	97	90,000	43,45
83	82,000	79,73	83	80,000	51,31			
87	86,000	79,76	87	84,000	51,32			
90	89,000	79,79	90	87,000	51,33			
91	90,000	79,79	93	90,000	51,34			

Tabela B6 - Resultados de fluência à compressão do concreto REF 0,345

AJUSTE FLUÊNCIA REF 0,345								
z (dias)		1,00	z (dias)		3,00	z (dias)		7,00
t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)
1,000	0,000	44,62	3,000	0,000	34,63	7,000	0,000	31,83
1,003	0,003	48,14	3,003	0,003	37,42	7,003	0,003	32,44
1,007	0,007	48,91	3,007	0,007	38,03	7,007	0,007	32,64
1,021	0,021	50,49	3,021	0,021	39,27	7,021	0,021	33,08
1,042	0,042	51,77	3,042	0,042	40,29	7,042	0,042	33,48
1,083	0,083	53,33	3,083	0,083	41,52	7,083	0,083	34,00
1,208	0,208	55,90	3,208	0,208	43,56	7,208	0,208	34,95
2	1,000	62,00	4	1,000	48,38	8	1,000	37,55
3	2,000	65,42	5	2,000	51,09	9	2,000	39,19
4	3,000	67,57	6	3,000	52,79	10	3,000	40,27
5	4,000	69,13	7	4,000	54,02	11	4,000	41,09
6	5,000	70,34	8	5,000	54,98	12	5,000	41,74
7	6,000	71,32	9	6,000	55,76	13	6,000	42,27
8	7,000	72,13	10	7,000	56,40	17	10,000	43,73
9	8,000	72,82	11	8,000	56,95	20	13,000	44,44
10	9,000	73,42	12	9,000	57,42	24	17,000	45,11
13	12,000	74,80	13	10,000	57,83	27	20,000	45,49
17	16,000	76,07	17	14,000	59,07	29	22,000	45,70
20	19,000	76,77	20	17,000	59,72	34	27,000	46,11
24	23,000	77,48	24	21,000	60,37	42	35,000	46,59
27	26,000	77,90	27	24,000	60,75	45	38,000	46,72
29	28,000	78,14	29	26,000	60,96	52	45,000	46,98
34	33,000	78,64	34	31,000	61,40	55	48,000	47,07
42	41,000	79,22	42	39,000	61,91	59	52,000	47,17
45	44,000	79,39	45	42,000	62,06	62	55,000	47,24
48	47,000	79,55	48	45,000	62,19	66	59,000	47,33
52	51,000	79,73	52	49,000	62,34	69	62,000	47,39
55	54,000	79,85	55	52,000	62,45	76	69,000	47,51
59	58,000	79,99	59	56,000	62,57	80	73,000	47,56
62	61,000	80,09	62	59,000	62,65	83	76,000	47,60
66	65,000	80,21	66	63,000	62,75	87	80,000	47,65
69	68,000	80,29	69	66,000	62,81	90	83,000	47,69
76	75,000	80,45	76	73,000	62,95	94	87,000	47,73
80	79,000	80,53	80	77,000	63,02	97	90,000	47,76
83	82,000	80,59	83	80,000	63,06			
87	86,000	80,66	87	84,000	63,12			
90	89,000	80,71	90	87,000	63,16			
91	90,000	80,72	93	90,000	63,20			

Tabela B7 - Resultados de fluência à compressão do concreto REF 0,367

AJUSTE FLUÊNCIA REF 0,367								
z (dias)		1,00	z (dias)		3,00	z (dias)		7,00
t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)
1,000	0,000	43,17	3,000	0,000	36,59	7,000	0,000	32,27
1,003	0,003	45,05	3,003	0,003	38,18	7,003	0,003	32,82
1,007	0,007	45,47	3,007	0,007	38,54	7,007	0,007	32,99
1,021	0,021	46,34	3,021	0,021	39,27	7,021	0,021	33,39
1,042	0,042	47,05	3,042	0,042	39,88	7,042	0,042	33,75
1,083	0,083	47,92	3,083	0,083	40,62	7,083	0,083	34,22
1,208	0,208	49,38	3,208	0,208	41,85	7,208	0,208	35,07
2	1,000	52,90	4	1,000	44,83	8	1,000	37,45
3	2,000	54,95	5	2,000	46,57	9	2,000	38,99
4	3,000	56,28	6	3,000	47,70	10	3,000	40,05
5	4,000	57,27	7	4,000	48,54	11	4,000	40,87
6	5,000	58,07	8	5,000	49,21	12	5,000	41,53
7	6,000	58,72	9	6,000	49,77	13	6,000	42,09
8	7,000	59,28	10	7,000	50,24	14	7,000	42,58
9	8,000	59,76	13	10,000	51,32	18	11,000	44,01
10	9,000	60,18	17	14,000	52,31	21	14,000	44,77
13	12,000	61,19	20	17,000	52,85	25	18,000	45,53
17	16,000	62,16	24	21,000	53,41	28	21,000	45,98
20	19,000	62,71	27	24,000	53,74	36	29,000	46,86
24	23,000	63,29	35	32,000	54,41	39	32,000	47,11
27	26,000	63,64	38	35,000	54,60	42	35,000	47,32
35	34,000	64,35	41	38,000	54,77	46	39,000	47,57
38	37,000	64,56	45	42,000	54,96	49	42,000	47,74
41	40,000	64,74	48	45,000	55,09	53	46,000	47,93
45	44,000	64,95	52	49,000	55,24	56	49,000	48,06
48	47,000	65,09	55	52,000	55,34	60	53,000	48,21
52	51,000	65,26	59	56,000	55,46	63	56,000	48,32
55	54,000	65,37	62	59,000	55,55	67	60,000	48,44
59	58,000	65,51	66	63,000	55,65	70	63,000	48,53
62	61,000	65,60	69	66,000	55,71	74	67,000	48,63
66	65,000	65,71	73	70,000	55,80	77	70,000	48,71
69	68,000	65,79	76	73,000	55,85	81	74,000	48,79
73	72,000	65,88	80	77,000	55,92	84	77,000	48,86
76	75,000	65,95	83	80,000	55,97	88	81,000	48,93
80	79,000	66,02	87	84,000	56,03	91	84,000	48,98
83	82,000	66,08	90	87,000	56,08	95	88,000	49,05
87	86,000	66,15	94	91,000	56,13	98	91,000	49,09
90	89,000	66,20						



Tabela B8 - Resultados de fluência à compressão do concreto SAP(0,30+0,045)

AJUSTE FLUÊNCIA SAP(0,30+0,045)								
z (dias)		1,00	z (dias)		3,00	z (dias)		7,00
t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)
1,000	0,000	38,87	3,000	0,000	34,71	7,000	0,000	33,20
1,003	0,003	43,09	3,003	0,003	37,59	7,003	0,003	35,49
1,007	0,007	43,89	3,007	0,007	38,13	7,007	0,007	35,93
1,021	0,021	45,48	3,021	0,021	39,22	7,021	0,021	36,79
1,042	0,042	46,73	3,042	0,042	40,07	7,042	0,042	37,47
1,083	0,083	48,22	3,083	0,083	41,09	7,083	0,083	38,28
1,208	0,208	50,62	3,208	0,208	42,73	7,208	0,208	39,59
2	1,000	56,15	4	1,000	46,51	8	1,000	42,60
3	2,000	59,25	5	2,000	48,62	9	2,000	44,29
4	3,000	61,25	6	3,000	49,98	10	3,000	45,38
5	4,000	62,73	7	4,000	50,99	11	4,000	46,18
6	5,000	63,90	8	5,000	51,79	12	5,000	46,82
7	6,000	64,87	9	6,000	52,46	13	6,000	47,35
8	7,000	65,70	10	7,000	53,02	14	7,000	47,80
9	8,000	66,41	13	10,000	54,32	15	8,000	48,19
14	13,000	68,96	15	12,000	54,97	20	13,000	49,57
15	14,000	69,34	20	17,000	56,16	21	14,000	49,78
22	21,000	71,30	28	25,000	57,38	28	21,000	50,85
25	24,000	71,90	31	28,000	57,71	31	24,000	51,17
28	27,000	72,41	34	31,000	57,99	34	27,000	51,45
32	31,000	72,98	38	35,000	58,31	38	31,000	51,76
35	34,000	73,34	41	38,000	58,52	41	34,000	51,96
39	38,000	73,76	45	42,000	58,77	45	38,000	52,19
42	41,000	74,03	48	45,000	58,93	48	41,000	52,34
46	45,000	74,35	52	49,000	59,12	52	45,000	52,51
49	48,000	74,57	55	52,000	59,25	55	48,000	52,63
56	55,000	74,99	62	59,000	59,51	62	55,000	52,86
60	59,000	75,20	66	63,000	59,63	66	59,000	52,97
63	62,000	75,34	69	66,000	59,72	69	62,000	53,05
67	66,000	75,51	73	70,000	59,83	73	66,000	53,14
70	69,000	75,63	76	73,000	59,90	76	69,000	53,20
74	73,000	75,78	80	77,000	59,99	80	73,000	53,28
77	76,000	75,88	83	80,000	60,05	83	76,000	53,34
81	80,000	76,00	87	84,000	60,13	87	80,000	53,41
84	83,000	76,09	90	87,000	60,18	90	83,000	53,45
88	87,000	76,19	93	90,000	60,24	94	87,000	53,51
91	90,000	76,27	94	91,000	60,25	97	90,000	53,55
90	89,000	76,24						

Tabela B9 - Resultados de fluência à compressão do concreto SAP(0,30+0,067)

AJUSTE FLUÊNCIA SAP(0,30+0,067)								
z (dias)		1,00	z (dias)		3,00	z (dias)		7,00
t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)
1,000	0,000	39,36	3,000	0,000	35,30	7,000	0,000	32,32
1,003	0,003	42,62	3,003	0,003	37,65	7,003	0,003	33,01
1,007	0,007	43,39	3,007	0,007	38,21	7,007	0,007	33,23
1,021	0,021	45,00	3,021	0,021	39,37	7,021	0,021	33,72
1,042	0,042	46,33	3,042	0,042	40,32	7,042	0,042	34,17
1,083	0,083	47,96	3,083	0,083	41,50	7,083	0,083	34,76
1,208	0,208	50,69	3,208	0,208	43,47	7,208	0,208	35,82
2	1,000	57,21	4	1,000	48,16	8	1,000	38,65
3	2,000	60,78	5	2,000	50,74	9	2,000	40,36
4	3,000	62,97	6	3,000	52,32	10	3,000	41,46
5	4,000	64,52	7	4,000	53,44	11	4,000	42,25
6	5,000	65,69	8	5,000	54,28	12	5,000	42,86
7	6,000	66,62	9	6,000	54,95	13	6,000	43,35
8	7,000	67,38	10	7,000	55,50	14	7,000	43,75
13	12,000	69,76	11	8,000	55,95	17	10,000	44,62
17	16,000	70,83	12	9,000	56,34	20	13,000	45,21
20	19,000	71,40	13	10,000	56,67	24	17,000	45,74
24	23,000	71,97	17	14,000	57,64	27	20,000	46,03
27	26,000	72,30	20	17,000	58,13	31	24,000	46,32
31	30,000	72,65	24	21,000	58,62	35	28,000	46,55
35	34,000	72,93	27	24,000	58,89	41	34,000	46,80
41	40,000	73,26	31	28,000	59,18	45	38,000	46,93
45	44,000	73,43	35	32,000	59,40	48	41,000	47,01
48	47,000	73,55	41	38,000	59,67	52	45,000	47,11
52	51,000	73,68	45	42,000	59,80	55	48,000	47,17
55	54,000	73,77	48	45,000	59,89	59	52,000	47,24
59	58,000	73,87	52	49,000	60,00	62	55,000	47,29
62	61,000	73,94	55	52,000	60,06	66	59,000	47,35
66	65,000	74,03	59	56,000	60,14	69	62,000	47,39
69	68,000	74,08	62	59,000	60,20	76	69,000	47,47
76	75,000	74,20	66	63,000	60,26	80	73,000	47,51
80	79,000	74,26	69	66,000	60,30	83	76,000	47,53
83	82,000	74,30	76	73,000	60,39	87	80,000	47,56
87	86,000	74,35	80	77,000	60,44	90	83,000	47,59
90	89,000	74,38	83	80,000	60,47	94	87,000	47,61
94	93,000	74,43	87	84,000	60,50	97	90,000	47,63
97	96,000	74,45	90	87,000	60,53	98	91,000	47,64
			94	91,000	60,56			
			97	94,000	60,58			

Tabela B10 - Resultados de fluência à compressão do concreto 0,30 1NS

AJUSTE FLUÊNCIA 0,30 1NS								
z (dias)		1,00	z (dias)		3,00	z (dias)		7,00
t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)
1,000	0,000	36,62	3,000	0,000	33,38	7,000	0,000	28,46
1,003	0,003	41,12	3,003	0,003	36,91	7,003	0,003	29,11
1,007	0,007	42,00	3,007	0,007	37,60	7,007	0,007	29,32
1,021	0,021	43,74	3,021	0,021	38,97	7,021	0,021	29,79
1,042	0,042	45,12	3,042	0,042	40,05	7,042	0,042	30,21
1,083	0,083	46,76	3,083	0,083	41,34	7,083	0,083	30,76
1,208	0,208	49,39	3,208	0,208	43,40	7,208	0,208	31,75
2	1,000	55,21	4	1,000	47,96	8	1,000	34,37
3	2,000	58,17	5	2,000	50,28	9	2,000	35,90
4	3,000	59,89	6	3,000	51,63	10	3,000	36,85
5	4,000	61,06	7	4,000	52,55	11	4,000	37,52
6	5,000	61,93	8	5,000	53,23	12	5,000	38,02
7	6,000	62,60	9	6,000	53,75	13	6,000	38,42
8	7,000	63,13	10	7,000	54,17	14	7,000	38,75
10	9,000	63,95	13	10,000	55,06	17	10,000	39,44
13	12,000	64,77	17	14,000	55,76	20	13,000	39,88
17	16,000	65,47	21	18,000	56,20	24	17,000	40,28
21	20,000	65,94	24	21,000	56,44	27	20,000	40,49
24	23,000	66,20	27	24,000	56,63	31	24,000	40,70
27	26,000	66,40	31	28,000	56,83	35	28,000	40,87
31	30,000	66,62	34	31,000	56,94	41	34,000	41,04
34	33,000	66,75	38	35,000	57,07	45	38,000	41,14
38	37,000	66,90	41	38,000	57,15	48	41,000	41,19
41	40,000	66,99	45	42,000	57,24	52	45,000	41,26
45	44,000	67,10	48	45,000	57,30	55	48,000	41,30
48	47,000	67,17	52	49,000	57,37	59	52,000	41,35
52	51,000	67,25	55	52,000	57,41	62	55,000	41,39
55	54,000	67,30	59	56,000	57,47	66	59,000	41,43
59	58,000	67,36	62	59,000	57,50	69	62,000	41,45
62	61,000	67,41	66	63,000	57,54	76	69,000	41,51
66	65,000	67,46	69	66,000	57,57	80	73,000	41,53
69	68,000	67,49	73	70,000	57,60	83	76,000	41,55
73	72,000	67,53	76	73,000	57,63	87	80,000	41,57
76	75,000	67,56	83	80,000	57,68	90	83,000	41,59
83	82,000	67,62	90	87,000	57,72	94	87,000	41,61
90	89,000	67,67	93	90,000	57,73	97	90,000	41,62
91	90,000	67,67						

Tabela B11 - Resultados de fluência à compressão do concreto SAP(0,30+0,045)1NS

AJUSTE FLUÊNCIA SAP(0,30+0,045)1NS								
z (dias)		1,00	z (dias)		3,00	z (dias)		7,00
t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)	t (dias)	t-z (dias)	J (10 <sup>-6</sup> /MPa)
1,000	0,000	39,20	3,000	0,000	37,19	7,000	0,000	33,17
1,003	0,003	43,98	3,003	0,003	41,18	7,003	0,003	33,84
1,007	0,007	44,92	3,007	0,007	41,96	7,007	0,007	34,06
1,021	0,021	46,82	3,021	0,021	43,54	7,021	0,021	34,55
1,042	0,042	48,32	3,042	0,042	44,80	7,042	0,042	34,99
1,083	0,083	50,12	3,083	0,083	46,29	7,083	0,083	35,57
1,208	0,208	53,03	3,208	0,208	48,72	7,208	0,208	36,62
2	1,000	59,75	4	1,000	54,32	8	1,000	39,50
3	2,000	63,44	5	2,000	57,39	9	2,000	41,32
4	3,000	65,74	6	3,000	59,31	10	3,000	42,54
5	4,000	67,41	7	4,000	60,70	11	4,000	43,46
6	5,000	68,71	8	5,000	61,78	12	5,000	44,20
7	6,000	69,76	9	6,000	62,66	13	6,000	44,80
8	7,000	70,63	10	7,000	63,38	14	7,000	45,32
10	9,000	72,02	13	10,000	65,00	17	10,000	46,49
13	12,000	73,51	17	14,000	66,41	20	13,000	47,31
17	16,000	74,88	20	17,000	67,15	24	17,000	48,10
20	19,000	75,64	24	21,000	67,90	27	20,000	48,55
24	23,000	76,41	27	24,000	68,33	31	24,000	49,02
27	26,000	76,87	31	28,000	68,80	35	28,000	49,38
31	30,000	77,37	34	31,000	69,09	41	34,000	49,80
34	33,000	77,68	38	35,000	69,41	45	38,000	50,02
38	37,000	78,03	44	41,000	69,79	48	41,000	50,17
44	43,000	78,45	48	45,000	70,00	52	45,000	50,33
48	47,000	78,68	52	49,000	70,18	55	48,000	50,44
52	51,000	78,88	55	52,000	70,29	59	52,000	50,57
55	54,000	79,01	59	56,000	70,43	62	55,000	50,66
59	58,000	79,17	63	60,000	70,56	66	59,000	50,76
63	62,000	79,31	66	63,000	70,64	69	62,000	50,83
66	65,000	79,41	69	66,000	70,72	76	69,000	50,98
69	68,000	79,50	73	70,000	70,82	80	73,000	51,05
73	72,000	79,60	76	73,000	70,88	83	76,000	51,10
76	75,000	79,68	80	77,000	70,96	87	80,000	51,16
80	79,000	79,77	83	80,000	71,01	90	83,000	51,20
83	82,000	79,83	90	87,000	71,13	94	87,000	51,25
91	90,000	79,98	93	90,000	71,17	97	90,000	51,29

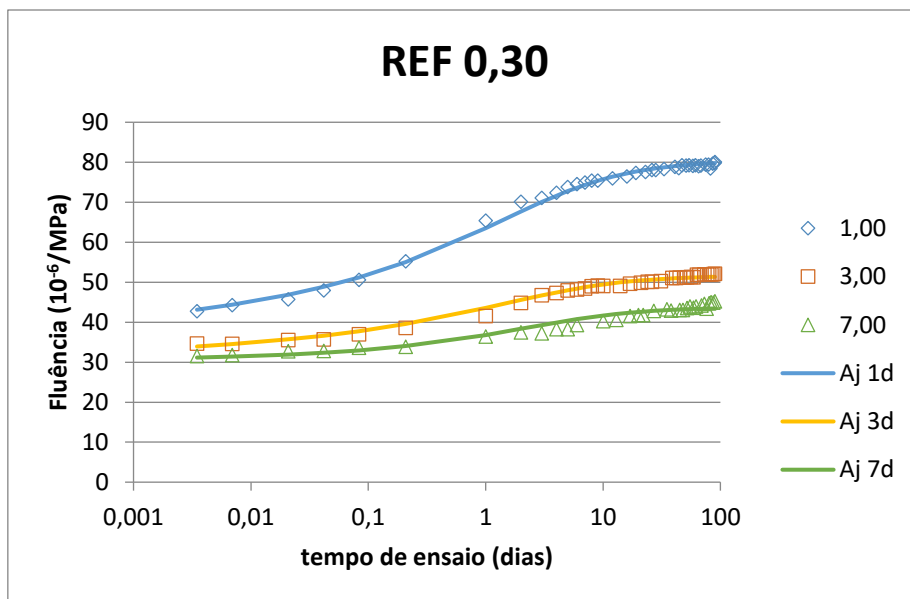


Figura B86 – Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes para o concreto REF 0,30 nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

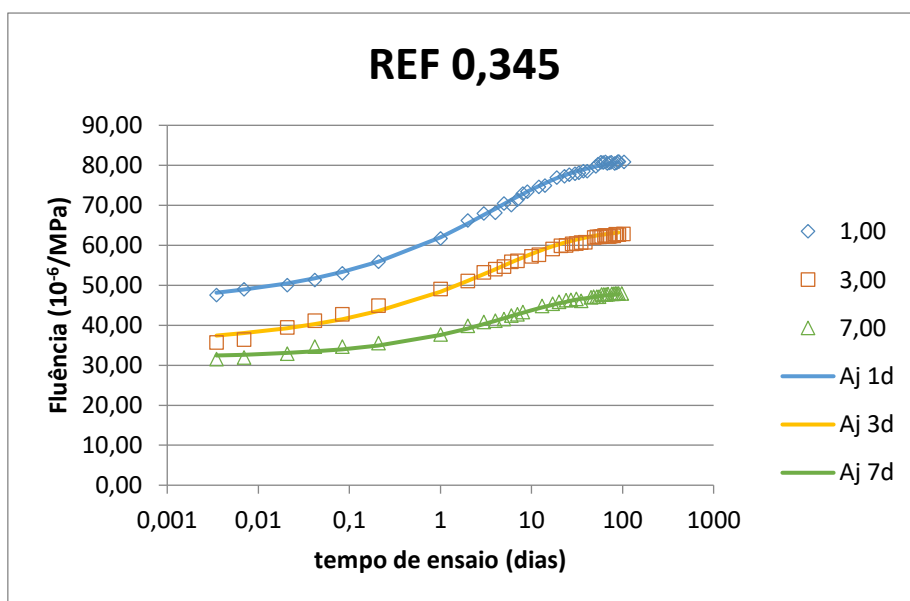


Figura B87 – Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes para o concreto REF 0,345 nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

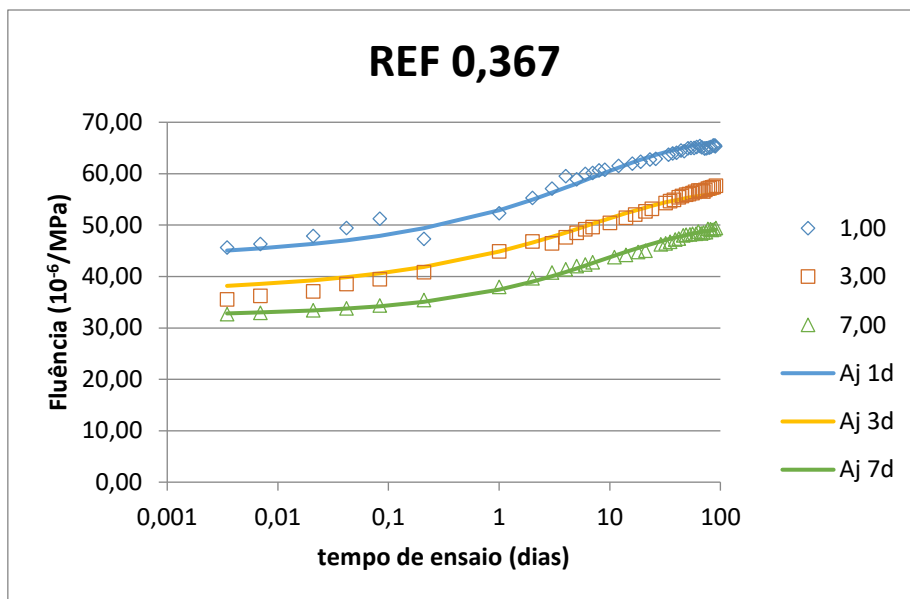


Figura B88 – Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes para o concreto REF 0,367 nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

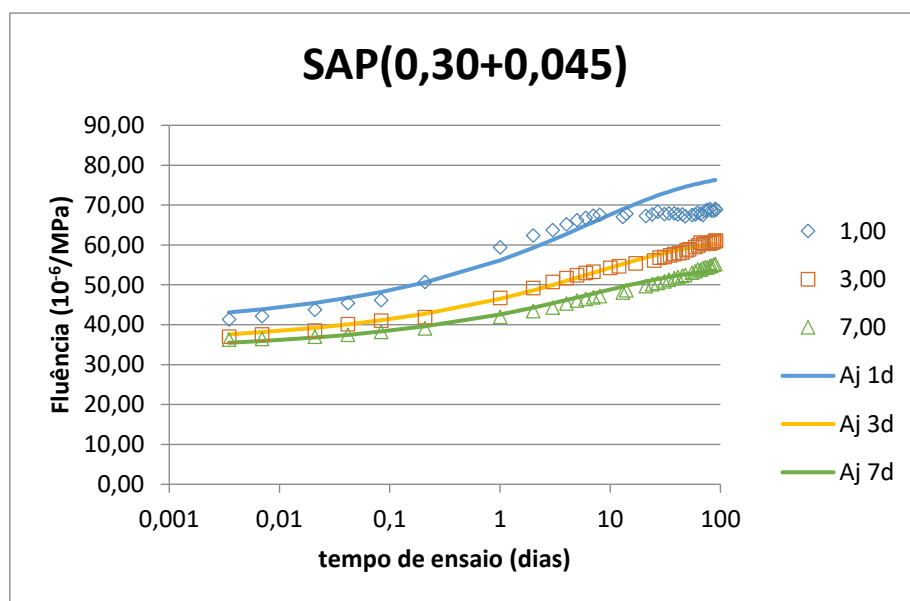


Figura B89 – Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes para o concreto SAP(0,30+0,045) nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

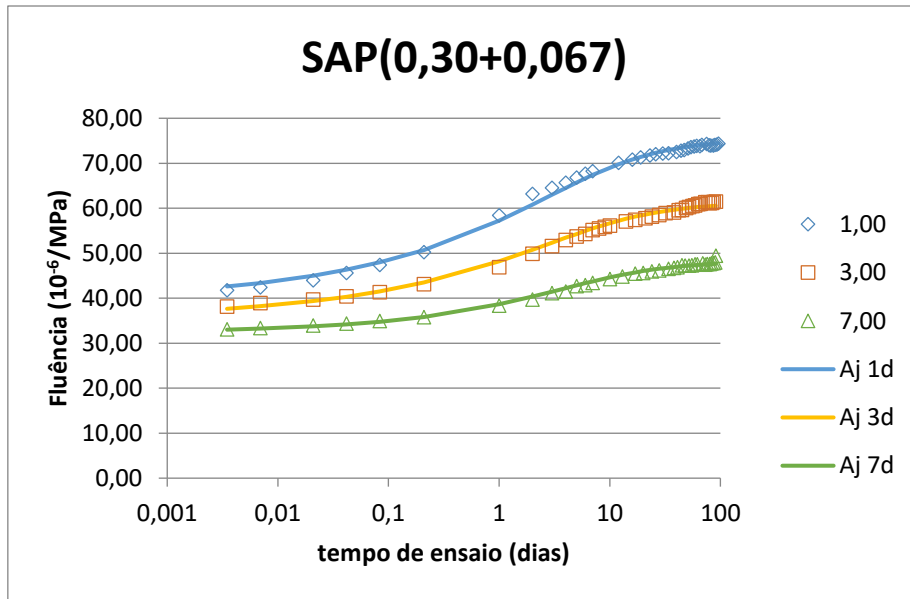


Figura B90 – Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes para o concreto SAP(0,30+0,067) nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

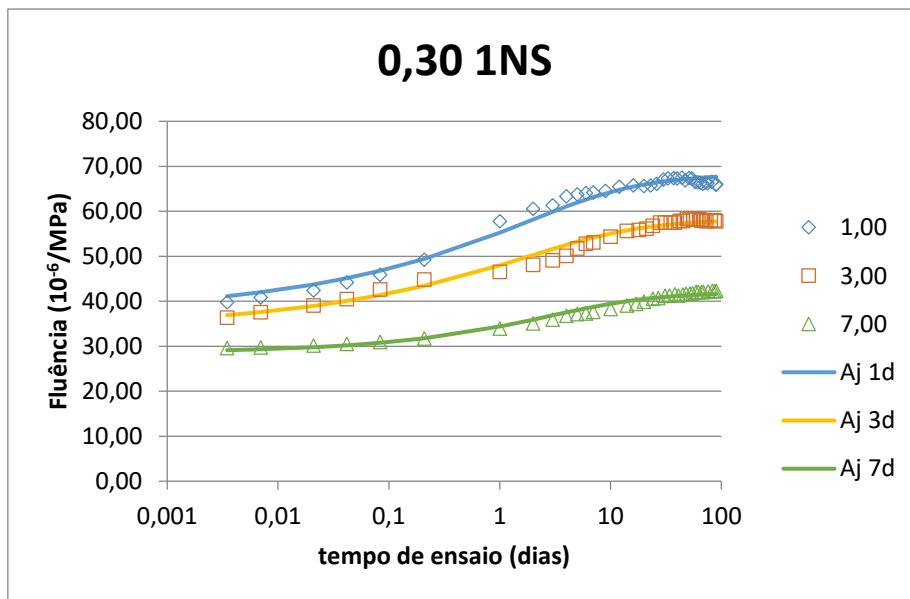


Figura B91 – Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes para o concreto 0,30 1NS nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias

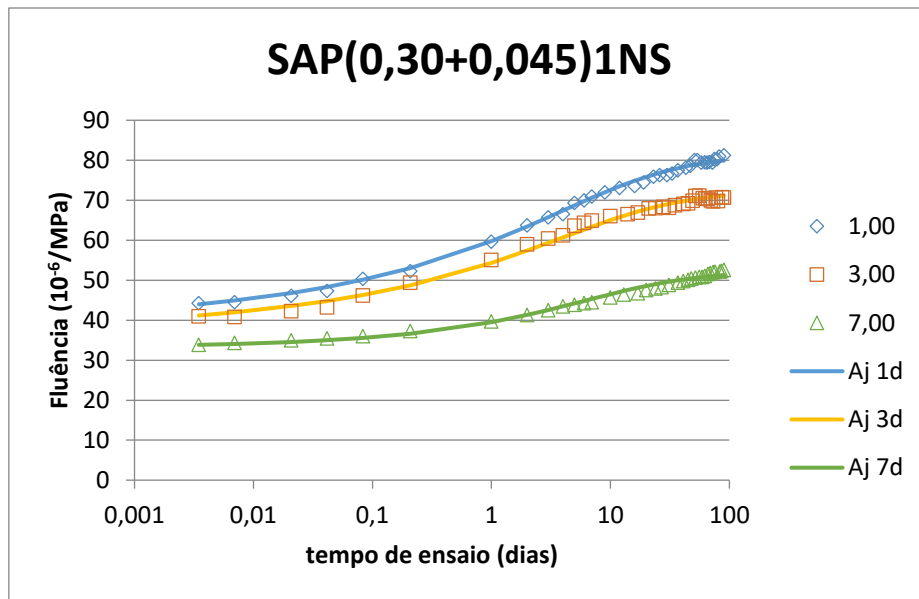


Figura B91 – Resultados de ensaios de fluência e curvas de ajustes para o concreto SAP(0,30+0,045)1NS nas idades de carregamento de 1, 3 e 7 dias