



**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRUNO HENRIQUE CARDOSO**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES  
RESIDUAIS COM FIBRA CEULÓSICA COMO AGENTE DE CURA INTERNA EM  
CONCRETOS: ENSAIOS LABORATORIAIS E APLICAÇÃO EM ESCALA REAL**

São Leopoldo

2023

BRUNO HENRIQUE CARDOSO

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES  
RESIDUAIS COM FIBRA CEULÓSICA COMO AGENTE DE CURA INTERNA EM  
CONCRETOS: ENSAIOS LABORATORIAIS E APLICAÇÃO EM ESCALA REAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo

2023

C268a      Cardoso, Bruno Henrique.  
Avaliação da utilização de polímeros superabsorventes residuais com fibra celulósica como agente de cura interna em concretos : ensaios laboratoriais e aplicação em escala real / Bruno Henrique Cardoso. – 2023.  
178 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.  
“Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio  
Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlova Piva Kulakowski”.

1. Concreto. 2. Polímero superabsorvente. 3. Retração. 4. Cura interna. I. Título.

CDU 624.012.4

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

BRUNO HENRIQUE CARDOSO

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES  
RESIDUAIS COM FIBRA CEULÓSICA COMO AGENTE DE CURA INTERNA EM  
CONCRETOS: ENSAIOS LABORATORIAIS E APLICAÇÃO EM ESCALA REAL**

Esta dissertação de Mestrado foi julgada e aprovada pela banca examinadora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovado por:

---

Prof. Dr. Mauricio Mancio  
Orientador

---

Prof. Dr. Mauricio Mancio  
Coordenador do PPGEC/UNISINOS

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlova Piva Kulakowski  
Co-Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Feliciane Andrade Brehm

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Angela Borges Masuero

SÃO LEOPOLDO, RS – BRASIL  
Novembro/2023

## RESUMO

CARDOSO, B. H. **Avaliação da utilização de polímeros superabsorventes residuais com fibra celulósica como agente de cura interna em concretos: ensaios laboratoriais e aplicação em escala real.** São Leopoldo, 2023.180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNISINOS, São Leopoldo, 2023.

O concreto armado pode sofrer diversos tipos de manifestações patológicas, entre elas, diferentes tipos de fissuras. Este tipo de manifestação é tão prejudicial quanto as demais, podendo ser a que mais necessita de observação, pois no momento que ocorre uma fissura, uma porta se abre para o aparecimento das outras formas de deterioração. No estado fresco, a fim de minimizar a ocorrência de fissuras de dessecação superficial e de retração por secagem, logo após a concretagem deve ser iniciada a cura do concreto, normalmente aspergindo água para de manter o concreto úmido e evitar que a água no interior do mesmo evapore. Neste trabalho, foi utilizado um polímero superabsorvente residual (PSAR), tendo sua origem na produção de produtos higiênicos. Junto a este material há também a presença de fibras celulósicas, que fazem parte do produto original, e que podem auxiliar na diminuição da retração. O PSAR possui grande potencial para utilização como agente de cura interna, como visto em estudos anteriores, onde foi aplicado em pastas e argamassas. Tendo como objetivo a transformação deste resíduo sólido em coproduto, este trabalho avalia seu comportamento no concreto, avaliando os efeitos da cura interna tanto no estado fresco (dessecação superficial), utilizando o método de Giroto, Barbosa e Maciel (2014), adaptado de Turcry (2004) e de Saliba *et al.* (2011), quanto no endurecido (resistência mecânica e retração livre), através da NBR 5739:2007 e da norma americana ASTM C157, e por fim sua absorção de água através da norma RILEM TC 116 PCD (1999). Esta pesquisa também apresenta o primeiro estudo em escala piloto industrial, onde é verificado o comportamento do material em um piso de concreto na parte externa de um concreteira. Os resultados mostram que o material contribui de forma positiva, chegando a uma redução de até 2,7 vezes em ensaios de retração plástica. Nos ensaios de absorção de água, é visto que em condições de cura com pouca umidade o agente de cura interna demonstra uma melhor eficiência. Nos testes em campo é também perceptível essa diferença de valores, onde o traço com a adição do material polimérico não apresentou fissuras, enquanto o traço de referência apresentou fissuras com uma média de 9 cm de comprimento espalhadas em toda sua superfície.

**Palavras-chave:** concreto; polímero superabsorvente; retração; cura interna.

## ABSTRACT

CARDOSO, B. H.. **Processing waste of superabsorbent polymers residue for incorporation into concrete and internal curing agent**. São Leopoldo, 2023. 180p. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) -- Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo, 2023.

Reinforced concrete can suffer different types of pathological manifestations, including different types of cracks. This type of manifestation is as harmful as the others, and may be the one that most needs observation, because the moment a fissure occurs, a door opens for the appearance of other forms of pathological manifestations. In the fresh state, in order to minimize the occurrence of surface desiccation cracks and drying shrinkage, curing of the concrete must be started immediately after concreting, normally spraying water in order to keep the concrete moist and prevent water from entering the interior. of the same evaporate. . In this work, a residual superabsorbent polymer (PSAR) was used, having its origin in the production of hygiene products. Along with this material there is also the presence of cellulosic fibers, which are part of the original product, and which can help to reduce shrinkage. PSAR has great potential for use as an internal curing agent, as seen in previous studies, where it was applied in pastes and mortars. Having as objective the practical use of the material, this work evaluates its behavior in concrete, evaluating the effects of internal curing both in the fresh state (superficial desiccation), using tests by Giroto, Barbosa and Maciel (2014), where they performed an adaptation of Turcry ( 2004) and by Saliba et al. (2011), as for the hardened (mechanical strength and free retraction), through the NBR 5739:2007 and the American standard the ASTM C157 standard, and finally its porosity verifies through the RILEM TC 116 PCD standard (1999). This research also presents the first real-scale field study carried out, where the behavior of the material on a concrete floor on the outside of a concrete mixer is verified. The results show that the material contributes positively, reaching a reduction of approximately 2.7 times in plastic shrinkage tests. The mechanical strengths, on the other hand, obtained lower values compared to the reference mix for poor mixes, however, in rich mixes. In the porosity tests it is seen that in curing conditions with low humidity the internal curing agent demonstrates a better efficiency. In field tests, this difference in values is also very noticeable, where the trace with the addition of polymeric material almost does not show cracks, however, in the reference trace, it has an average of 9 cm in length spread throughout its area.

**Key-words:** concrete; superabsorbent polymer; retraction; internal curing

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de óxidos do cimento após sua elaboração .....	18
Tabela 2: Potencial de fissuração .....	61
Tabela 3: Fatores de controle e níveis de estudo .....	<b>Er</b>
<b>ro! Indicador não definido.</b>	
Tabela 4: Características agregado miúdo natural Tabela 5: Tabela de caracterização da cal CH I.....	67
Tabela 5: Características agregado miúdo natural.....	70
Tabela 6: Caracterização do agregado graúdo.....	71
Tabela 7: Absorção do PSA segundo a ISSO 17190-6/2001 .....	73
Tabela 8: Traço unitário .....	75
Tabela 9: Traçado da concreteira.....	75
Tabela 10: Absorção de água aos 7 dias.....	89
Tabela 11: Absorção de água aos 28 dias.....	91
Tabela 12: Consumo de água e água presente no polímero .....	95
Tabela 13: Análise de variância do consumo de água relacionado ao slump.....	96
Tabela 14: Absorção dos concretos moldados em campo.....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Microestrutura de concreto .....	16
Figura 2: Representação esquemática dos tempos de pega e endurecimento da pasta de cimento .....	21
Figura 3: Representação esquemática da relação entre a retração química e a retração autógena. (a) sem exsudação. (b) com exsudação .....	25
Figura 4: Fissura de assentamento plástico e/ou movimentação de fôrmas .....	27
Figura 5: Fissurações decorrentes de fenômenos químicos deletérios .....	29
Figura 6: Exemplo de caso de retração térmica do concreto .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 7: Representação esquemática da difusão do CO <sub>2</sub> .....	32
Figura 8: Relações entre a perda de água (em massa) e a retração por secagem .....	32
Figura 9: Baixas relações água/cimento x resistência à compressão de concretos. ....	36
Figura 10: Porosidade do SAP no concreto.....	37
Figura 11: SAP comercial visto em MEV .....	39
Figura 12: Pavilhão construído na Alemanha.....	40
Figura 13: Estrutura do pavimento: (a) Modelo tridimensional; (b) Forma dos pilares; (c) Dimensões dos pilares em cm .....	40
Figura 14: Cura convencional x Cura interna.....	41
Figura 15: Representações Esquemáticas das estruturas moleculares: (a) lineares, (b) ramificadas, (c) cruzadas, e (d) em rede (tridimensional). Círculos designam unidades de mero individuais. ....	43
Figura 16: Hidratação do polímero.....	45
Figura 17: Forma das partículas de polímeros produzidos por: a) polimerização de gel; b) polimerização por suspensão inversa; c) poro seco deixado por partículas de PSA polimerizada em gel numa pasta de cimento endurecida após a secagem; d) poro seco deixado por uma partícula de PSA polimerizado via polimerização por suspensão inversa numa pasta de cimento endurecido .....	47
Figura 18: Imagem com uma seção de materiais secos misturados, antes da adição da água .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 19: Imagem da microestrutura de um concreto de alta resistência (100 µm x 100 µm), no período de hidratação inicial (minutos após da adição da água). ....	55
Figura 20: Imagem da microestrutura do concreto, no período final de hidratação (dias após da adição da água). ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

Figura 21: TGA do polímero superabsorvente residual (PSAR).....	
Figura 22: Fluxograma dos ensaios em laboratório.....	65
Figura 23: Fluxograma dos prazos dos ensaios em laboratório.....	66
Figura 24: Granulometria agregado natural.....	67
Figura 25: Granulometria agregado miúdo artificial.....	68
Figura 26: Granulometria agregado miúdo composto.....	69
Figura 27: Granulometria do agregado graúdo.....	70
Figura 28: (A) PSAR no estado seco; (B) PSAR hidratado formando um gel.....	71
Figura 29: Forma de retração plástica .....	76
Figura 30: (a) Regulagem do equipamento; (b) medição de uma amostra.....	77
Figura 31: Esquema para absorção de água .....	78
Figura 32: (a) Britasinos Concretos, filial de Gravataí; (b) Área selecionada para a realização do teste piloto .....	80
Figura 33: Adição de material polimérico já hidratado no caminhão betoneira .....	80
Figura 34: Nivelamento do piso .....	81
Figura 35: Processo de moldagem dos corpos de prova.....	82
Figura 36: Esquema de concretagem em campo .....	83
Figura 37: Pisos já concretados nas primeiras horas .....	83
Figura 38: Resistência a compressão x idade .....	84
Figura 39: Resistência à compressão x traço.....	85
Figura 40: Retração plástica nas primeiras 24 horas .....	87
Figura 41: Condição de cura de 100%, comparativo 7 e 28 dias .....	91
Figura 42: Retração com adição de PSAR.. .....	92
Figura 43: Resistência à compressão x idade (Concreteira).....	99
Figura 44: Retração livre ao longo do tempo .....	101
Figura 45: Absorção de água x Resistência a Compressão aos 7 dias .....	105
Figura 46: Absorção de água x Resistência a compressão aos 28 dias .....	106
Figura 47: Registro com foco na fissura.....	109

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 <i>Justificativa</i> .....	12
1.2 <i>Objetivos</i> .....	12
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	12
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	13
1.3 <i>Estrutura da Pesquisa</i> .....	13
1.4 <i>Delimitações do Trabalho</i> .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 <i>Cimento Portland</i> .....	15
2.2 <i>Enrijecimento, Pega e Endurecimento</i> .....	18
2.3 <i>Retração do concreto</i> .....	21
2.3.1 <i>Tipos de retração</i> .....	26
2.3.2 <i>Procedimentos de cura do concreto</i> .....	35
2.4 <i>Cura interna</i> .....	35
2.4.1 <i>Conceito</i> .....	36
2.5 <i>Agentes de cura interna</i> .....	36
2.5.1 <i>Dosagem de agentes de cura interna</i> .....	38
2.5.2 <i>Estudos em concreto com agentes de cura interna</i> .....	39
2.6 <i>Polímero superabsorvente residual (PSAR)</i> .....	45
2.6.1 <i>Fibra Celulósica</i> .....	61
2.7 <i>Métodos de ensaios de retração</i> .....	63
2.7.1 <i>Retração plástica</i> .....	63
2.7.2 <i>Retração livre</i> .....	64
2.7.3 <i>Retração restringida</i> .....	65
<b>3 Materiais e Métodos</b> .....	<b>67</b>
3.1 <i>Ensaio piloto</i> .....	67
3.2 <i>Planejamento dos experimentos</i> .....	67
3.2.1 <i>Fatores de controle</i> .....	69

3.2.2	Variáveis de resposta .....	70
3.3	<i>Materiais</i> .....	71
3.3.1	Cimento.....	71
3.3.2	Agregado Miúdo Natural .....	71
3.3.3	Agregado Miúdo Artificial .....	72
3.3.4	Agregado Graúdo Natural.....	74
3.3.5	Polímero superabsorvente residual (PSAR) .....	75
3.3.6	Água.....	77
3.4	<i>Dosagem, ensaios e produção dos corpos-de-prova</i> .....	77
3.4.1	Resistência à compressão .....	79
3.4.2	Retração plástica.....	79
3.4.3	Retração livre.....	80
3.4.4	Absorção de água.....	81
3.4.5	Análise Estatística.....	82
3.4.6	Ensaio de campo .....	82
	<b>4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>87</b>
4.1	<i>Resultados do laboratório</i> .....	87
4.1.1	Resistência à compressão .....	87
4.1.2	Retração plástica.....	90
4.1.3	Absorção de água.....	91
4.1.4	Consumo de água adicional do polímero.....	93
4.2	<i>Dados da pesquisa em escala piloto industrial</i> .....	96
4.2.1	Resistência à compressão do traço da concreteira.....	96
4.2.2	Retração por secagem .....	97
4.2.3	Absorção de água.....	98
4.2.4	Análise do piso .....	99
	<b>5 Considerações finais</b> .....	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>104</b>
	<b>7 Apêndice a – Ensaio de Absorção</b> .....	<b>117</b>
	<b>8 Anexo A – Características Físico-químicas do cimento utilizado na pesquisa</b> .....	<b>153</b>
	<b>9 Anexo B – Relatório da FEPAM</b> .....	<b>154</b>
	<b>10 Anexo C – Quadro de CLIMA do período do ensaio em campo</b> .....	<b>173</b>
	<b>11 Anexo D – Autorização da FEPAM</b> .....	<b>174</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil mundialmente, sendo utilizado de modo mais expressivo que todos os outros materiais de construção combinados (PATEL; PITRODA, 2013) e em quase todos os ambientes construídos: pontes, edifícios, infraestruturas urbanas e sanitárias, barragens, ferrovias, aeroportos, píeres, etc. Seu uso se dá devido a razões como baixo custo de construção e manutenção, praticidade na execução e na moldagem de variados formatos (CHEMROUK, 2015; CARMONA; CARMONA FILHO, 2013; AGOPYAN; JOHN, 2011).

Hussein *et al.* (2012), relatam que a indústria do concreto consome grande quantidade de recursos naturais, resultando diretamente em dois grandes impactos. O primeiro é na escassez de matéria-prima natural e o segundo é a elevada quantidade de resíduos gerados por essa indústria.

A composição básica do concreto de cimento Portland apresenta cerca de 12% de cimento, 80% de agregado e 12% de água de amassamento. Em números anuais, essas porcentagens representam um consumo em torno de 4,4 bilhões de toneladas de cimento e aproximadamente 29 bilhões de toneladas de agregados naturais (METHA; MONTEIRO, 2014, DASH, PATRO; RATH, 2016; USGS, 2022). Por outra perspectiva, as atividades industriais, de mineração, domésticas e agrícolas geram resíduos sólidos em grandes quantidades, e que podem ser utilizados como materiais sustentáveis na construção civil (MOHAMADALI, 2017). As incorporações de resíduos industriais são realizadas com materiais alternativos que podem substituir tipicamente o cimento e/ou os agregados na mistura do concreto (BARROS, 2016; BREITENBACH *et al.*, 2017).

De forma geral, a utilização de resíduos sólidos é aplicável em praticamente todos os setores da construção civil, e os resultados de pesquisas com esta finalidade têm mostrado satisfação em relação à qualidade de concretos mais sustentáveis (FERNANDES; AMORIM, 2014; ASSI *et al.*, 2018).

As vendas de cimento no Brasil em 2021 somaram um total de 65 milhões de toneladas de cimento vendidas, um aumento de 6,5% sobre o ano anterior (USGS, 2022).

O concreto não é o material mais resistente que possa ser incorporado na construção civil, mas é altamente difundido por uma série de aspectos que o tornam popular pelo mundo inteiro. Primeiro pela sua resistência à água, comparado com a madeira e o aço que são mais sensíveis a presença de água, torna o concreto um material de excelente qualidade para a criação das mais diversas obras de engenharia. Outra característica importante do concreto é sua capacidade de se moldar em uma infinidade de formas em seu estado fresco, o que facilita a sua

aplicação em diversas variedades e formas que possam ser criadas na arquitetura e engenharia. Por último e talvez a mais importante característica, é o baixo custo em sua produção, tanto do cimento em si, como nos agregados. Existem outras características como resistência ao fogo, baixa manutenção e a capacidade de união com o aço, o que eleva a resistência do concreto. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Chemrouk (2015) e Van Tittelboom e De Belie (2013) apresentam que o concreto, por apresentar reduzida resistência aos esforços de tração, tem seu uso frequentemente vinculado à inserção de barras de aço em seu interior, sendo então a qualidade final do material – agora denominado concreto armado – associada a qualidade individual desses dois materiais. Existem muitos fatores que atestam a compatibilidade entre o aço e o concreto (CHEMROUK, 2015), devendo ser destacada a proteção que o concreto proporciona ao aço dos agentes corrosivos presentes na atmosfera.

## **1.1 Justificativa**

Uma das diversas formas de manifestações patológicas que podem ocorrer em estruturas de concreto é a retração e consequente fissuração do concreto, facilitando a entrada de agentes agressivos e a deterioração da estrutura. A retração plástica, principalmente por dessecação superficial, ocorre quando o concreto se encontra fresco e nas primeiras idades de endurecimento. Um dos principais problemas ligados a estes efeitos é a ausência de um procedimento de cura adequada do concreto, o que pode gerar grandes prejuízos futuros.

Visando melhorar a cura e diminuir a presença de fissuras, nos últimos anos vem se estudando formas de diminuir estes impactos; uma delas é a cura interna onde o material incorporado no concreto, normalmente pré-saturado, hidrata o concreto do seu interior para o exterior, diferente da cura convencional, onde só é criando uma fina camada de água na superfície para a água do concreto não se dissipar.

## **1.2 Objetivos**

A seguir serão apresentados os objetivos gerais e específicos desta pesquisa.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a incorporação de polímeros superabsorventes residuais (PSAR) contendo fibras celulósicas, proveniente da indústria de

produtos higiênicos, como agente de cura interna no concreto, em escala laboratório e em escala piloto industrial.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar a resistência mecânica de diferentes traços de concreto com e sem incorporação de PSAR, em distintas condições de cura;
- b) analisar a absorção de água do concreto com PSAR;
- c) avaliar o efeito da incorporação de PSAR na retração (plástica e por secagem);
- d) realizar teste piloto de aplicação em campo, na execução de um piso industrial,
- e) monitorar a retração, fissuração *in-loco*, ganho de resistência e absorção de água.

## 1.3 Estrutura da Pesquisa

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução ao tema da pesquisa, assim como também serão demonstrados os objetivos gerais e específicos do trabalho.

No capítulo 2 é feito uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto, onde visa encontrar lacunas a serem exploradas na pesquisa. São vistos desafios a serem vencidos neste campo de forma a embasar este trabalho.

No capítulo 3 é são apresentados os materiais que foram utilizados nesta pesquisa, assim como os ensaios que foram realizados para desenvolvimento do trabalho.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos, assim como a análise dos dados coletados e uma discussão dos mesmos.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e fecha o trabalho respondendo os objetivos propostos nesta pesquisa.

## 1.4 Delimitações do Trabalho

Este trabalho foi delimitado em função da caracterização do material residual obtido, composto por aproximadamente 70% fibra de celulose, 10% de polímero superabsorvente e 20% de polietileno de baixa densidade, polipropileno e outros materiais em menor quantidade.

Outro fator é a utilização de areia de britagem para substituir 40% do agregado miúdo natural. Essa substituição tem dois motivos: primeiro neste trabalho busca-se utilizar os materiais que vêm sendo utilizados pelas concreteiras na região do Vale do Rio dos Sinos/RS,

o segundo motivo é para auxiliar a diminuir os impactos causados pela construção civil no meio ambiente.

A partir da heterogeneidade verificada no material recebido inicialmente, foi necessário ampliar os estudos em concretos com a adição o PSAR, realizando-se diversos testes a fim de encontrar uma forma de homogeneizar o material, antes de sua utilização nesta pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo consiste na revisão bibliográfica de temas relacionados ao presente trabalho, iniciando com uma breve revisão sobre a composição e tipos atuais de cimento Portland no Brasil, seguida de itens sobre enrijecimento, pega e endurecimento da pasta de cimento; retração do concreto; cura interna; polímero superabsorvente residual; e métodos de ensaio de retração.

### 2.1 Cimento Portland

Sabe-se que a utilização do cimento no setor da construção civil é considerada um marco da civilização moderna, pois é um material de baixo custo, sendo um recurso econômico para a construção de moradias e grandes obras de engenharia. Isto se deve ao fato de sua matéria prima principal (calcário e argila) ser abundante e barata. Entretanto, a produção de cimento gera impactos ambientais, através da: 1) extração de matérias primas; e 2) grande emissão de gases de efeito estufa, principalmente o CO<sub>2</sub>, decorrente da decomposição do calcário e uso de combustíveis durante a produção. (MAURY; BLUMENSCHNEIN, 2012).

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer e com adição de gesso. O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado até a temperatura de 70°C para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó. O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade (PETRUCCI; PAULON, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Durante a fase de moagem são efetuadas as adições de outras matérias primas que, misturadas ao clínquer, possibilitam a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland, disponíveis hoje no mercado. Essas outras matérias primas são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos. O gesso tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído, quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria

seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, cerca de 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa (PETRUCCI; PAULON, 1993). Após o processo de produção o cimento obtém os compostos químicos citados abaixo.

A influência dos compostos químicos resultantes sobre as propriedades do cimento pode ser observada sob duas formas. A primeira delas, a resistência à compressão, pode ser observada nas seguintes formas:

- a)  $C_3S$  – garante a resistência nos primeiros dias de idade;
- b)  $C_2S$  – é responsável pelo aumento gradativo da resistência;
- c)  $C_3A$  e  $C_4AF$  – apresentam pouca influência na resistência à compressão.

A segunda, a durabilidade, que é influenciada por:

- a)  $C_3A$  e  $C_4AF$  – quanto maior o teor, menor a durabilidade perante agentes nocivos.
- b)  $C_3A$  – quanto maior o teor, menor a resistência às águas sulfatadas e do mar.
- c)  $C_2S$  – quanto maior o teor, maior a resistência às águas sulfatadas e do mar.
- d)  $C_3A$  ou  $C_3S$  – quanto maior, maior o aumento do calor de hidratação.

Tabela 1: Quantidade de óxidos do cimento após sua elaboração.

<b>Compostos químicos</b>	<b>Composição %</b>
CaO	61 a 67
SiO <sub>2</sub>	20 a 23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5 a 7,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 a 3,5
MgO	0,8 a 6,0
SO <sub>3</sub>	1,0 a 2,3
Álcalis	0,3 a 1,5

Fonte: Petrucci e Paulon (1993, p. 89).

Quando trata-se do cimento Portland, a porosidade total da pasta de cimento varia entre 25 e 30% em volume, em relação água/cimento de 0,5. Neste sentido, a porosidade se decompõe em dois tipos de cavidades e/ou vazios: “poros entre os cristais C-S-H, de alguns nanômetros de comprimento, poros capilares entre os compostos hidratados, bolhas e fissuras”, com tamanho variando entre 100nm e alguns milímetros. (KAEFER, 2016, p. 19).

Vários estudos demonstram que diversos fatores influenciam a reologia de materiais à base cimento, entre eles a relação água/cimento, a sua composição química e tempo de

hidratação do cimento, a reatividade química do filer, a distribuição granulométrica, a massa específica, a textura superficial e a geometria das partículas, as propriedades do aditivo químico, a temperatura e a umidade do meio onde o material é preparado e aplicado, as condições de mistura e o procedimento de ensaio adotado. (HELENE; ANDRADE, 2007; CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Atualmente no Brasil, o mercado de cimentos conta com seis principais tipos de produtos normatizados e livres para a comercialização. Há, ainda, derivações destes cimentos – é o que ocorre com os cimentos compostos, por exemplo, que possuem subdivisão, relativa ao grau e à natureza do composto adicionado. Por possuírem composições variáveis, cada tipo de cimento recebe normatização adequada ao seu funcionamento (Quadro 1).

Quadro 1: Diferentes tipos de cimentos e suas respectivas composições.

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
		CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno		CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V <sup>a</sup>			ARI		90 – 100	0
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40		75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural		–	–	50 – 74	–	–	26 – 50
<sup>a</sup> No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.								

Fonte: NBR 16697 (2018, p. 5).

Segundo Pedroso (2009), o concreto é uma pedra artificial que pode ser moldada. Em seu estado fresco, é um composto plástico e, em estado endurecido, apresenta propriedades similares às de rochas naturais. Duas características corroboram para a disseminação de seu uso na construção civil: resistência à água e plasticidade.

Antes de tratar da retração, se faz necessário trazer a definição correta dos termos enrijecimento, pega e endurecimento são extremamente relevantes. Estes termos designam a evolução dos processos químicos de hidratação das matrizes cimentícias.

## 2.2 Enrijecimento, Pega e Endurecimento

O processo de enrijecimento do concreto é definido pela perda de consistência da pasta plástica de cimento e está, diretamente, associado à perda gradual de água do concreto. Esta perda de água ocorre, principalmente, durante as reações iniciais de hidratação do cimento, na adsorção superficial dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade, como a etringita e o C-S-H, e no seu processo de evaporação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De uma forma geral, durante as reações iniciais de hidratação, as partículas de cimento reagem com a água, formando produtos como a etringita, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (CH ou  $\text{Ca(OH)}_2$ ). O  $\text{Ca(OH)}_2$  ocupa cerca de 20%, em massa, da matriz cimentícia, estando normalmente localizado na interface da pasta com o agregado. Já o C-S-H é um material que possui características similares a um gel rígido, sendo o principal responsável pelas propriedades relacionadas à resistência e à resistência à água nos compósitos cimentícios (LAM, 2005).

O processo de pega do concreto implica na solidificação da pasta plástica de cimento, ou seja, o termo pega está diretamente relacionado à mudança de estado físico da pasta, passando de um fluido para um sólido poroso. Conjuntamente, neste momento propriedades elásticas do compósito cimentício se desenvolvem (NEVILLE; BROOKS, 2013; SANT, FERRARIS, WEISS, 2008).

Neville e Brooks (2013) mencionam que o intervalo de tempo transcorrido, desde a adição de água ao cimento até o momento em que se inicia a solidificação do concreto, é denominado como o início de pega, e é neste instante que a pasta de cimento começa a perder sua trabalhabilidade. O início de pega pode ser determinado por diferentes técnicas, tais como: pelo método de resistência à penetração mecânica, propagação de onda ultrassônica, condutividade elétrica, retração química, variação da pressão hidráulica, pela evolução das propriedades reológicas da matriz cimentícia, pela curva calorimétrica, a qual utiliza termopares embutidos no concreto, e pela emissão acústica, que detecta o fenômeno da cavitação quando ocorre à saída de água dos poros (SILVA, 2007; GARCIA; CASTRO-FRESNO; POLANCO, 2008; SANT; FERRARIS; WEISS, 2008).

Segundo García, Castro-Fresno e Polanco (2008), o processo de pega depende não somente da resistência à penetração no concreto fresco em determinado período, mas, também, de fatores que afetam a conectividade entre as partículas e os vazios. Contudo, tal processo não ocorre repentinamente, sendo necessário algum tempo até que o concreto torne-se uma matriz totalmente rígida. O tempo necessário para esta total solidificação do concreto, denominado

como fim de pega, varia conforme alguns fatores externos, como por exemplo, a temperatura. Segundo Silva (2007), usualmente, os termos início e fim de pega são utilizados para descrever arbitrariamente estados escolhidos do tempo total deste processo.

Na literatura, comumente é sugerido que o período de pega corresponde ao final da etapa de dormência do processo de hidratação do cimento (SUN; VOIGT; SHAH, 2006; SANT; FERRARIS; WEISS, 2008).

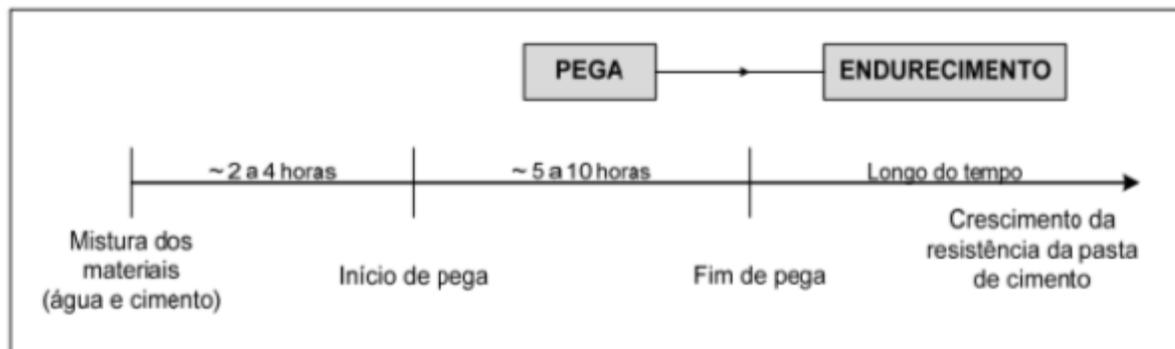
Neste período de dormência, as reações iniciais de hidratação afetam propriedades como a área específica e o teor de água livre, logo, exercem influência direta na espessura do filme de água, o qual envolve os grãos de cimento, sendo este um fator contribuinte para as características de fluidez da pasta de cimento (AMZIANE, 2006).

A duração do período de dormência varia de acordo com a composição da matriz cimentícia. A adição de pozolanas, como a sílica ativa, ou de aditivos redutores de retração (ARR), bem como o valor da relação a/c, modificam significativamente este período.

Inúmeros pesquisadores avaliaram a duração do estado de dormência dos materiais cimentícios, sendo encontrados na bibliografia períodos entre 0,5 a 8 horas (KRAUB; HARIRI, 2006; SANT; FERRARIS; WEISS, 2008; ROBEYST; GROSSE; DE BELIE, 2009). Durante o processo de pega, a pasta adquire certa resistência. Entretanto, em termos práticos, o desenvolvimento real de sua resistência acontece depois do tempo de fim de pega, na etapa denominada de endurecimento (NEVILLE, 1997). A fase de endurecimento envolve um aumento na resistência do material cimentício, todavia, esta etapa também depende de alguns parâmetros físico-químicos, como o grau de hidratação, a relação a/c e as condições de cura (NONAT, 1994).

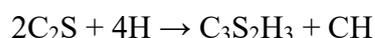
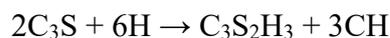
A Figura 2 demonstra, de forma esquemática, os estágios de enrijecimento, pega e endurecimento da pasta de cimento. Para a NBR NM 9 (2002), o período de início e fim de pega correspondem ao tempo necessário para uma argamassa atingir resistências à penetração igual a 3,4 MPa e 27,6 MPa, respectivamente, após o contato inicial do cimento com a água de amassamento.

Figura 2: Representação esquemática dos tempos de pega e endurecimento da pasta de cimento.



Fonte: Silva (2007, p. 39).

Na etapa de endurecimento do concreto, a resistência mecânica desenvolve-se devido ao rápido avanço das reações de hidratação, principalmente do  $C_3S$ , as quais ocorrem por muitas semanas. Conseqüentemente, os produtos destas reações preenchem, progressivamente, os espaços vazios na pasta, havendo um decréscimo da porosidade e da permeabilidade do concreto, resultando em um aumento da resistência. As reações de hidratação dos silicatos de cálcio presentes no cimento podem ser expressas pelas seguintes equações (MEHTA; MONTEIRO, 2014):



Onde:

$C_3S$  é Alita

$C_2S$  é Belita

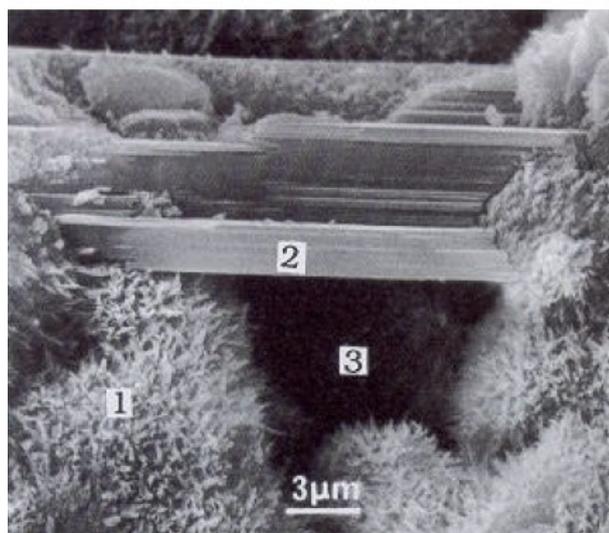
H é Água

$C_3S_2H_3$  é Silicato de Cálcio Hidratado

CH é Hidróxido de Cálcio

De acordo com Kaefer (2016), denominamos de matriz a pasta de cimento hidratada que envolve os grãos de areia e o agregado graúdo. A pasta é constituída por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento. Cita como os mais importantes os silicatos hidratados C-S-H que podem parecer como estruturas fibrosas, hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$  que cristaliza em grandes placas hexagonais superpostas e a etringita, que cristaliza no início da pega na forma de agulhas. A Figura 1 ilustra a microestrutura da pasta de cimento hidratada, destacando a presença do C-S-H, principal responsável pela resistência mecânica, do hidróxido de cálcio e dos vazios capilares.

Figura 1: Microestrutura da pasta de cimento hidratada.



- 1: C-S-H
- 2:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou (C-H)
- 3: Vazio Capilar

Fonte: Moranville (1992 apud KAEFER, 2016, p. 5).

No item seguinte, é apresentada uma revisão sobre as principais causas de retração no concreto, incluindo um classificação dos principais tipos de retração, focando nas idades iniciais.

### 2.3 Retração do concreto

A retração nas idades iniciais pode ser originada por diferentes fatores, como a evaporação de água para o ambiente externo, as variações de temperatura externas, as reações iniciais de hidratação do cimento e/ou pelo calor gerado por estas reações químicas. A definição exata do momento em que ocorre a retração nas primeiras idades do concreto e a sua intensidade são extremamente variáveis, uma vez que existe uma grande variedade de materiais, os quais constituem o traço do concreto. Entretanto, ela pode ser definida como sendo a retração que ocorre no período das primeiras 24h após a moldagem do material, desde o momento em que o concreto está iniciando o seu processo de endurecimento (HOLT; LEIVO, 2004; SULE; BREUGEL, 2004; HOLT, 2005; BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005).

Nesta etapa inicial, a retração possui elevada importância, mesmo com sua pequena magnitude, principalmente, em concretos de alta resistência (CAR) e concretos de alto desempenho (CAD), onde o calor gerado pelas reações iniciais de hidratação do cimento é mais elevado, devido a determinadas características do traço do concreto, como a baixa relação a/c, o maior consumo de cimento e a presença de adições minerais (sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno, entre outros). Neste momento, o concreto tem menor capacidade de resistir às altas tensões de tração geradas pelas deformações provenientes da retração e,

consequentemente, está mais vulnerável à ocorrência de fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SILVA, 2007).

Normalmente, as fissuras ocorridas nesta etapa são denominadas de microfissuras. Estas pequenas fissuras podem se interligar com o passar do tempo, formando fissuras contínuas, as quais prejudicam, consideravelmente, a qualidade do concreto e a durabilidade das estruturas ao longo do tempo (JENSEN; HANSEN, 2001; AKKAYA; OUYANG; SHAH, 2007; CHANG-WEN; QIAN; JIA-PING, 2007; BOGHOSSIAN; WEGNER, 2008). Durante a etapa inicial, a matriz cimentícia sofre deformações devido aos diferentes tipos de retração, sendo estas: a retração plástica, a retração química, a retração autógena e a retração ou deformação térmica.

A retração plástica ocorre em um primeiro momento, onde a matriz cimentícia está transformando-se de fluído para sólido poroso, contudo, estando em estado plástico, sem ter atingido significativa resistência. A perda de água por evaporação para o ambiente externo, através da água livre ou da água exsudada, e a absorção de água pela sub-base, no caso de piso, ou pelas fôrmas, são as principais causas para a ocorrência deste tipo de retração (TOLEDO FILHO *et al.*, 2005; NUNES; FIGUEIREDO, 2007; ALY; SANJAYAN; COLLINS, 2008; BENTZ, 2008).

Como consequência da evaporação inicial da água, é formada uma rede complexa de meniscos, a qual origina pressões negativas, devido ao aumento na tensão superficial dos capilares, assim, levando a contração do volume da pasta de cimento. Geralmente para pisos e pavimentos de concreto é considerada adequada uma taxa de evaporação igual ou menor a  $0,5\text{kg/m}^2/\text{h}$  (VAN DAM *et al.*, 2005).

Da mesma forma, a retração química ocorre quando a matriz cimentícia está em estado plástico. As mudanças de volume ocorrem em decorrência das reações químicas entre os grãos anidros de cimento e as moléculas de água. Como resultado, eles geram produtos hidratados com um volume absoluto menor, ou seja, ocorre uma redução do volume interno (LAM, 2005; SALES, 2006; BENTZ, 2008).

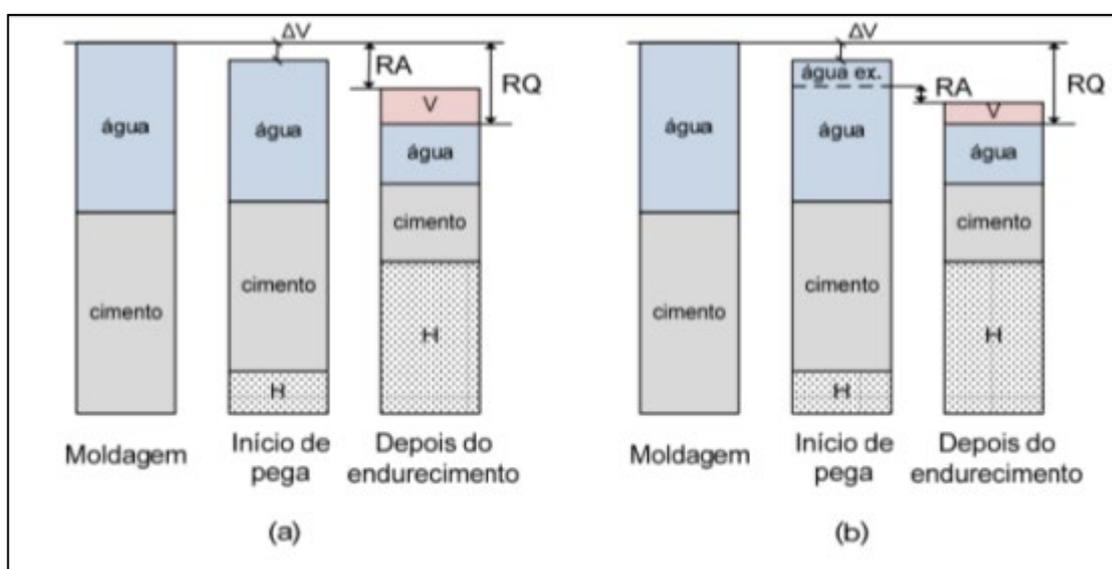
Segundo Holt e Leivo (2004), a retração autógena é definida como a mudança macroscópica do volume da pasta de cimento, ocorrida sem transferência de umidade para o ambiente externo. Tal mudança volumétrica não inclui deformações devido às variações de temperatura, ingresso de substâncias, forças externas e restrições. Usualmente, este tipo de retração é uma preocupação em concretos de alta resistência (CAR) ou alto desempenho (CAD), pois a sua magnitude é afetada diretamente pelas propriedades dos materiais reativos (cimento e pozolanas), constituintes do traço de concreto, e pela baixa relação a/c do compósito (HOLT;

LEIVO, 2004; NUNES, 2006; MELO NETO, 2008). Normalmente, o período do início de pega corresponde ao momento em que se inicia a retração autógena (LAM, 2005).

A figura 3 representa de forma ilustrativa a relação entre o fenômeno da retração química e da retração autógena, segundo Lam (2005). Nesta figura, o autor demonstra a influência do processo de exsudação na relação entre a retração química e a retração autógena. Percebe-se que quando ocorre exsudação, Figura 3 (b), a retração autógena é reduzida, assim modificando a relação existente entre os dois fenômenos.

Figura 3: Representação esquemática da relação entre a retração química e a retração autógena.

(a) sem exsudação. (b) com exsudação.



Fonte: Lam (2005, p. 61).

Onde:

H – produtos hidratados;

$\Delta V$  – variação de comprimento dos materiais cimentícios antes do início de pega, proveniente de exsudação, retração química, entre outros.

V – vazios de ar gerados pela hidratação;

Água ex. – quantidade de água exsudada;

RA – retração autógena;

RQ – retração química.

A retração autógena é semelhante à retração por secagem. Contudo, o mecanismo gerador do fenômeno é a principal diferença entre elas, sendo a retração autógena gerada pela autodessecação do material cimentício, e a retração por secagem pelo processo de secagem do material (SILVA, 2007). A deformação térmica presente nas idades iniciais do concreto está

associada à dissipação do calor gerado nas reações de hidratação do cimento, causando restrições internas; ou pela contração do elemento devido às variações de temperatura, caracterizado por uma restrição externa (BALTHAR, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SALES, 2006; BAMFORTH, 2007; BENTZ; WEISS, 2008). Normalmente, as deformações devido às variações de temperatura do ambiente são mínimas. Porém, em situações específicas, onde é utilizado calor no processo de cura ou se o ambiente tem um fluxo de calor intenso, as deformações térmicas podem ser significantes (LAM, 2005).

Devido às características dos concretos de alta resistência (CAR) e de alto desempenho (CAD), além da ocorrência da retração autógena, o fenômeno da retração térmica também pode estar fortemente presente. (HOSSAIN; WEISS, 2006; SILVA, 2007).

Sabe-se que as manifestações patológicas decorrentes do fenômeno da retração em estruturas de pisos de concreto são uma grande preocupação. Esta problemática está associada com diferentes fatores, agravado devido ao fato do elemento apresentar uma elevada área superficial; ou com fatores correspondentes às características de dosagem do compósito cimentício. Contudo, cabe ressaltar que existem outros tipos de variações volumétricas presentes nas primeiras idades, como por exemplo, a fluência, sendo definida como as deformações presentes no material, com o tempo, sob tensão constante. Segundo Neville (1997), este fenômeno pode ser diferenciado em fluência básica, sendo aquela que ocorre sem troca de umidade com o meio externo, e fluência na secagem, sendo aquela que ocorre quando há secagem simultânea.

Já Melo (2009), em seu estudo, observou que a presença do resíduo de fibras de poliéster aumenta a absorção por capilaridade, devido à maior quantidade de finos, interação entre eles e a matriz de cimento, e ao alto teor de vazios.

Manzano (2016) verificou que o refinamento da porosidade de cada mistura, evidenciada pela redução da intensidade dos picos e pela diminuição dos diâmetros de poro representativos ao longo do tempo. Assim, observou-se que a adição de PSA altera claramente o desenvolvimento da matriz porosa do cimento, podendo provocar um aumento da porosidade total, mas com um refinamento ou densificação da estrutura porosa. Esse fato também ficou evidenciado pelas medidas de diâmetro crítico dos poros, já que a pasta contendo polímero atingiu os menores valores ao longo do tempo. O mesmo autor destaca que, para a análise do efeito do PSA em materiais cimentícios, é fundamental conhecer a cinética de liberação de água, que está ligada com o comportamento da isoterma de dessorção do polímero, tendo observado em seus estudos que 99% da massa absorvida de água foi liberada com 90% de UR

interna. Isso mostra a sensibilidade do polímero às mudanças de gradiente de umidade no interior da matriz cimentícia.

Monnig (2009) determinou a taxa de desorção das partículas de PSA por monitoramento da perda de massa em diferentes níveis de UR, de camadas saturadas de PSA com a espessura de uma partícula. De acordo com autor, a água próxima da superfície dos polímeros é perdida rapidamente, mas a água mais perto ao núcleo das partículas precisa ultrapassar mais cadeias laterais no polímero, os quais interagem com as moléculas de água pelas forças de *Van der Waals*, regulando a liberação de água ao longo do tempo.

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

Ordoñez *et al.* (2013) realizaram pesquisa com microconcretos de alta resistência, com traço de referência com  $a/c = 0,30$  e mais três misturas contendo PSA de partículas esféricas constituído de acrilamida, nos teores de 0,3% - 0,4% e 0,6%, em relação à massa de cimento. Os resultados mostraram que as adições de PSA proporcionaram uma redução na retração autógena da ordem de 80%, aos 2-3 dias de idade, em relação à mistura de referência, e de 65% e 50%, aos 7 e 28 dias, respectivamente. A mistura contendo PSA no teor de 0,6% foi a mais eficaz na mitigação da retração autógena.

Suarez (2015) observou que a eficiência da adição de polímeros superabsorventes para mitigar a retração autógena diminui à medida que aumenta a idade dos microconcretos. Esse comportamento ocorreu para todas as misturas. O microconcreto com relação  $a/c = 0,30$  e adição de PSA de 0,3% apresentou uma redução da retração autógena de 80% no primeiro dia de idade e de 70% aos 28 dias de idade.

No estudo de Santos (2016) a autora observou que a mistura contendo 0,3% de PSA proporcionou a melhor eficiência na redução da retração autógena em todas as idades. O efeito da expansão inicial foi neutralizado aproximadamente aos 15 dias de idade, ao contrário das demais misturas, onde o gráfico atinge a parte negativa do eixo antes dos 3 dias. Para este traço, o valor final da retração foi de  $-41 \mu\text{m/m}$ , aos 28 dias o que representa uma redução de 70% da retração autógena observada para o traço de referência. Este comportamento é similar ao observado por Traldi *et al.* (2014), cujo valor encontrado foi de  $6 \mu\text{m/m}$ , que significa 21% da

retração determinada mistura de referência, para o mesmo traço e utilizando o mesmo polímero, porém com aditivo superplastificante de outro fabricante e materiais de lotes diferentes.

### 2.3.1 Tipos de retração

A água faz parte da mistura de concreto, além de ser necessária para as reações de hidratação do cimento, como explicado em Isaia, Helene e Tutikian (2011), a água propicia uma diminuição do atrito dos grãos por envolvê-los, havendo assim a possibilidade de aglutinação do agregado na pasta de cimento. Também fornece a consistência necessária para que o concreto fresco possa ser transportado e aplicado nos devidos locais, proporcionando uma maior homogeneidade do concreto. Valores altos de relação água/cimento ( $a/c$ ), entretanto, aumentam a porosidade do concreto, o que além de reduzir a resistência mecânica do material, contribui para que ocorra uma maior retração do concreto.

A perda excessiva de água por falta de cura, por outro lado, também resulta em um decréscimo de resistência e de durabilidade, como dito anteriormente. As fissuras superficiais são problemas normalmente relacionados com a falta da cura do concreto, e esta manifestação contribui negativamente para a estrutura pois aumenta a permeabilidade, facilitando assim a penetração de agentes agressivos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A fissuração por retração pode estar relacionada a diversos fatores, e pode acontecer tanto no estado fresco do concreto, quanto após seu endurecimento (GIROTTI; BARBOSA; MACIEL, 2014).

A retração pode ser dividida em cinco tipos diferentes, sendo: retração plástica, retração química, retração hidráulica, retração térmica e retração por carbonatação. Cada um ocorre em idades particulares e apresentam magnitudes distintas, dependendo dos materiais utilizados e suas proporções, além das condições ambientais de exposição. Desta maneira, para se prevenir a retração, para cada uma existem diferentes maneiras de combate, já que seus mecanismos atuantes também não são os mesmo. Mehta e Monteiro (2014) descrevem os seguintes tipos de retração no concreto:

- a) plástica;
- b) devida à contração química;
- c) retração hidráulica;
- d) retração térmica;
- e) retração por carbonatação.

O concreto pode sofrer também outros tipos de manifestações patológicas. Um exemplo são fissuras que podem ser causadas por diversos fatores, como variações térmicas, reações químicas, excesso de carregamento ou retração autógena. Estes tipos de manifestações podem ser a porta para outras manifestações ou até levar a estrutura ao colapso. A retração está associada a deformação em pastas de cimento, argamassa e concretos e está também relacionado com perda de água (DINIZ; FERNANDES; KUPERMAN, 2011).

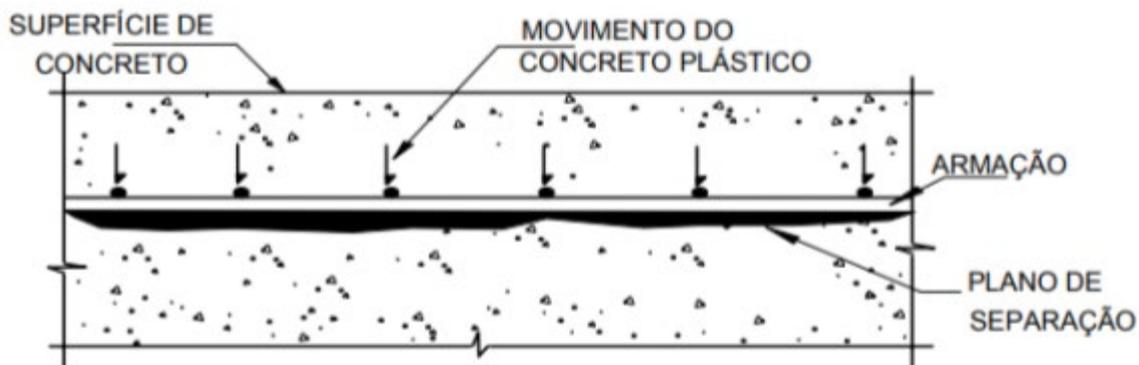
A retração plástica está relacionada com a perda de água na superfície do concreto, isso pode acontecer caso não haja uma cura adequada. Caso a velocidade de evaporação da água for maior que a taxa de água que sai do seu interior por efeito de exsudação tem chances de ocorrer este tipo de manifestação patológica (GIROTTI; BARBOSA; MACIEL, 2014).

Caso não ocorra uma cura adequada, provavelmente ocorrerá uma dessas manifestações patológicas. Normalmente na obra, após a concretagem, quando o concreto começa o processo de endurecimento é molhado para efetuar a cura úmida. Este tipo de cura tem uma função de criar uma película de água na superfície do concreto a fim de evitar a evaporação da água interna do concreto. Costa Junior (2010) observa que a cura nas primeiras idades é fundamental para o ganho de resistência logo após o endurecimento; através de ensaios em vigas ele pôde comprovar a importância do procedimento para a qualidade da estrutura.

A retração plástica ocorre nos primeiros momentos do concreto, em torno de 24 horas, esse momento o concreto ainda está fresco e isso ocorre, pois, a evaporação da água cria espaços para pode se dissipar no ar. Este tipo de retração cria fissuras de aproximadamente 0,5mm ou menores e com angulação de 45° ou 60° de forma espalhada no concreto e possuem pouco comprimento. (DNIT 061:2004-TER).

A contração plástica nas estruturas de concreto armado é comumente uma das primeiras causas a provocar fissuras no componente estrutural. Este procedimento consiste na redução de volume devido à elevada perda de água na superfície por meio de evaporação, antes mesmo do endurecimento do concreto. Geralmente esse fato se dá em estruturas com grande área superficial, como as lajes. Nesse caso são erros na forma de escorar as estruturas, retirar escoramentos em ordem incorreta entre outros, que provocam fissuras e/ou o próprio adensamento do concreto decorrente de excessiva exsudação no estado plástico do concreto. (CARMONA FILHO; CARMONA, 2013) (Figura 4).

Figura 4: Fissura de assentamento plástico e/ou movimentação de fôrmas.



Fonte: Dal Molin (1988, p. 6).

As fissuras provocadas por assentamento plástico em sua maioria podem ser causadas por (SAHADE; MACHADO; CAVANI, 2013):

- a) exsudação do concreto fresco;
- b) escolha inadequada do traço de concreto;
- c) contaminação dos agregados com material pulverulento para o amassamento do concreto;
- d) excesso de água na fabricação do concreto;
- e) utilização de cimentos mais finos;
- f) não-saturação das fôrmas de madeira antes da concretagem;
- g) execução da concretagem com temperaturas baixas;
- h) excesso de utilização de aditivos retardadores de pega;
- i) utilização de grandes cobrimentos das armações sem os cuidados necessários;
- j) utilização de barras de aço mais grossas;
- k) utilização de fôrmas inadequadas e não estanques.

Na prática alguns destes efeitos possuem dificuldades de serem controlados, como a ação do vento ou a temperatura, que contribui para o aparecimento de fissuras originadas da retração. Alguns efeitos estão relacionados com a retração plástica como a exsudação de água ou sedimentação dos agregados, onde cria pontos frágeis e acúmulos de água; deformação da forma, o concreto no estado fresco possui baixíssima resistência a esforços o que pode gerar uma fragilidade; uma velocidade alta da evaporação de água, cria vazios onde podem gerar fissuras e a redução do volume da pasta de cimento que está relacionada com a reação cimento com a água. (METHA; MONTEIRO, 2014).

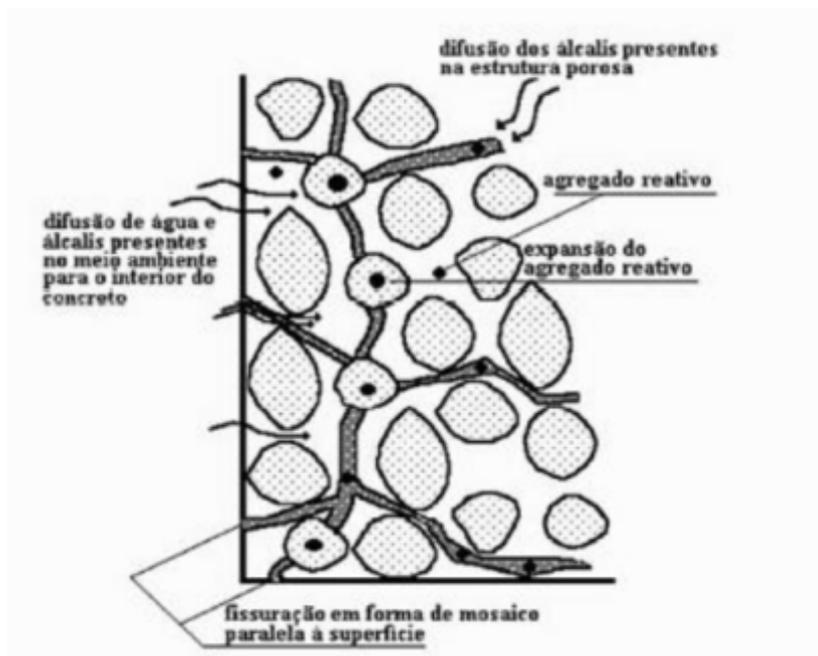
No que se refere a retração química, são provocadas em função de esforços gerados por expansões do concreto endurecido relacionado a existência em excesso na massa e/ou por

penetração de sulfatos, ainda pela utilização de agregados reativos com os álcalis do cimento. (CASOTTI, 2007).

O aparecimento deste tipo de fissuras caracteriza de imediato um problema patológico importante e as fissuras não podem ser encaradas como sendo inerentes às estruturas de concreto armado. (CARMONA FILHO; CARMONA, 2013). Tais fissuras geralmente ocorrem em elementos de fundação devido aos constituintes mineralógicos do agregado reagirem com hidróxidos alcalinos presentes no cimento gerando um gel expansivo que afeta a estrutura.

Um dos tipos de fissuras decorrentes de processos químicos, a reação Álcali-Agregado foi um problema bastante relatado no Brasil nos últimos anos. Infere-se que também pode ocorrer a abertura de fissuras por corrosão de armadura. Se por algum motivo o caráter alcalino da estrutura do concreto armado for alterado, a estrutura fica exposta a um processo de corrosão de armadura que será desencadeado principalmente por meio da umidade presente no local, como verifica-se na Figura 5 (TAUIL; NESE, 2010).

Figura 5: Fissurações decorrentes de fenômenos químicos deletérios.



Fonte: Souza e Ripper (1998).

Já a retração hidráulica trata do cimento após hidratação que sofrem retração por secagem, uma vez que a água evapora com o evoluir do enrijecimento da pasta, diminuindo o volume da mesma, o que provoca fissuras e rachaduras. É desejável eliminar este efeito, visto que ele pode representar, principalmente, perda de resistência ao elemento moldado.

Outro tipo de retração que também deve ser analisado com cuidado é por secagem; Bissonette, Pierre e Pigeon (1999) consideram que a retração por secagem é a principal forma

de deterioração das edificações em concreto. No que se refere a retração por secagem está ocorre pela saída da água da pasta do concreto, provocando retração volumétrica. A fissuração só ocorrerá se o elemento retraído estiver impedido de tal movimentação.

O principal mecanismo de retração é a perda de água por evaporação em estado fresco ou endurecido. Água em excesso é normalmente adicionada à massa de concreto para lhe conferir trabalhabilidade, essa água não é consumida na reação de hidratação do cimento. Ao evaporar-se deve vencer as forças capilares gerando assim forças de contração na massa. (CARMONA FILHO; CARMONA, 2013).

A restrição do encurtamento por uma série de fatores como, por exemplo, o atrito com a base, retração diferencial, rigidez da estrutura etc. provoca as tensões de tração que levam ao aparecimento ou aumento da abertura de fissuras. Durante a formação da pasta de cimento hidratada, ocorre uma redução do volume dos elementos constituintes, cimento e água. Essa redução é da ordem de 18%, levando ao surgimento de vazios nos interiores das pastas de cimento e também o aparecimento de forças de tração nos capilares. (RIBEIRO *et al.*, 2018).

A retração térmica ocorre quando as condições climáticas (frio, calor e umidade) alteram as características geométricas dos elementos de concreto, estejam eles endurecidos ou não. As variações volumétricas são função da alteração da temperatura e também das propriedades do concreto, a saber: do calor específico, da massa aparente, da condutividade térmica do material e da absorvância ou emitância da superfície do elemento. (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Observa-se que tais variações volumétricas ocorrem tanto em estado fresco em função das altas temperaturas que incidem durante as reações exotérmicas na hidratação do cimento e ainda, na posterior contração diferencial pelo resfriamento.

No que se refere ao estado endurecido os deslocamentos estão relacionados às variações de temperatura a que a estrutura está sujeita. Observa-se neste cenário que do mesmo modo que no caso da retração é a restrição de movimento que provoca os esforços de tração. Em relação a ação do frio sobre o concreto no início de seu endurecimento atua de forma a atrasar o final da pega, diminuindo a velocidade de hidratação do cimento. Ou seja, quando a água se congela, ocorre anulação do processo de hidratação. (RIBEIRO *et al.*, 2018).

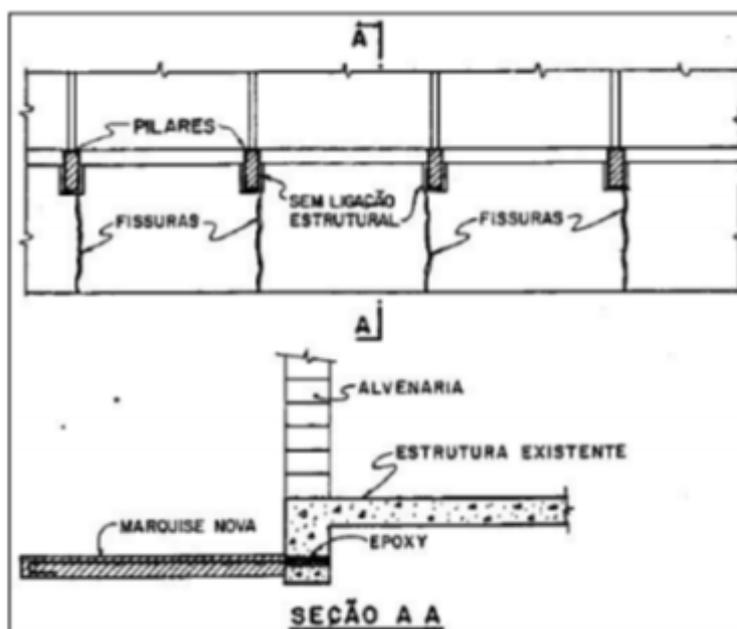
No que se refere ao aumento da temperatura, sem umidade suficiente, pode trazer os seguintes inconvenientes:

- a) alterações dimensionais;
- b) aumento da retração;
- c) tendência à fissuração;
- d) redução da durabilidade;

- e) diminuição da aderência às armaduras;
- f) aumento do risco de corrosão, pelo fato de o concreto apresentar fissuras.

A variação volumétrica do concreto está ligada ao coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ). Este coeficiente varia com o tipo de agregado, com o teor da pasta de cimento, com a relação água/cimento e com a idade do concreto (Figura 6) (TAUIL, 2010).

Figura 6: Exemplo de caso de retração térmica do concreto.



Fonte: Thomaz (2014, p. 17).

Vários estudos já foram realizados no sentido de prever analiticamente a fissuração de elementos de concreto na fase de cura.

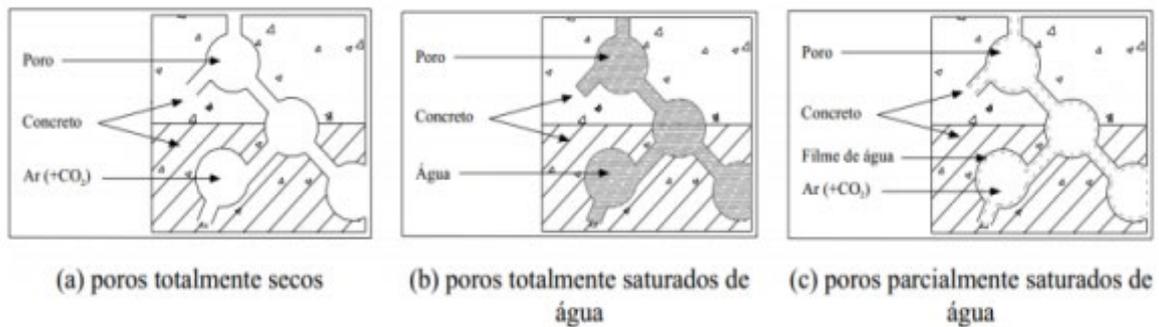
De acordo com Possan (2010), um dos principais fatores responsáveis pela limitação da vida útil das estruturas de concreto é o fenômeno da carbonatação. Ocorre naturalmente em estruturas de concreto expostas ao ambiente, sujeitas à ação de intempéries em determinada condição de umidade (SILVA, 2007).

A carbonatação é um fenômeno natural que resulta de um processo físico-químico que ocorre quando gases ácidos presentes no ambiente, como o gás sulfídrico ( $H_2S$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e principalmente o gás carbônico ( $CO_2$ ), entram em contato com os produtos alcalinos do concreto, gerados durante o processo de hidratação (KULAKOWSKI, 2002), através de um processo de dissolução/precipitação que forma um produto final à base de carbonato e gel de sílica (JUNIOR, 2014).

O processo de carbonatação recebe esse nome devido à ocorrência de uma reação de neutralização do hidróxido de cálcio (CH) pelo  $\text{CO}_2$  que resulta no carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como produto final, isto é, transformação de um hidróxido alcalino em um sal de baixa solubilidade. Ainda neste processo, ressalta-se que os produtos consumidos pelos gases, responsáveis por esse fenômeno, são o sódio (Na), potássio (K), silicatos alcalinos e principalmente o cálcio (Ca), que após processo de hidratação se tornam hidróxidos de: sódio (NaOH), potássio (KOH) e cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) respectivamente (CADORE, 2008).

Salienta-se que as reações de carbonatação só ocorrerão em presença de umidade. Como a difusão de gases em meio aquoso é muito mais lenta que no ar, nos poros saturados essa difusão será desprezível (Figura 7).

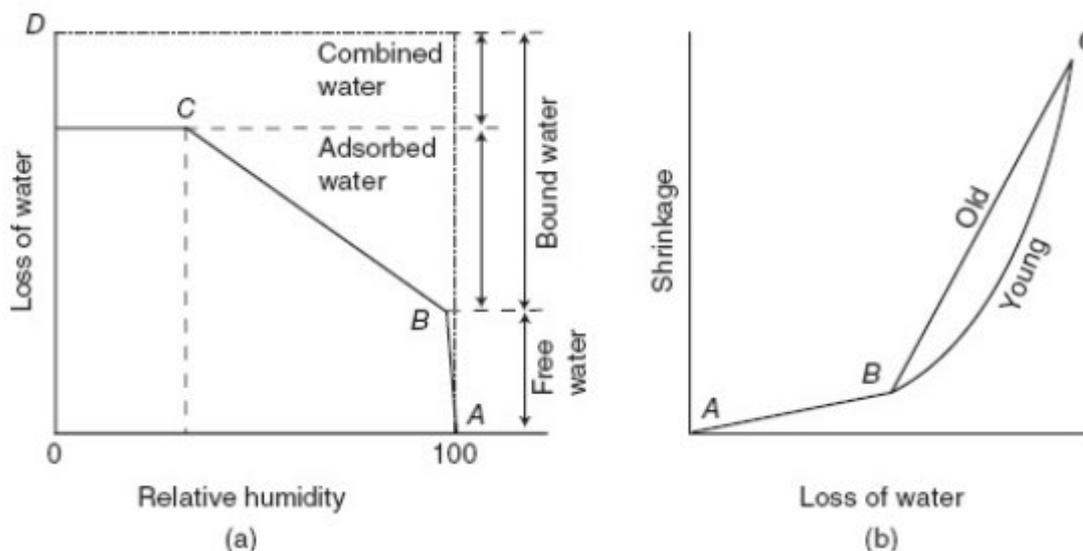
Figura 7: Representação esquemática da difusão do  $\text{CO}_2$ .



Fonte: Bakker (1988, p.29).

Mindess e Young (1981 apud EHRENBRING; TUTIKIAN; QUININO, 2016), mostram que existem 5 estágios em que acontece o fenômeno de retração. Nos estágios 1 e 2 ocorre perda de água dos vazios capilares, isso ocorre em função das primeiras reações do concreto que acabam deixando estes vazios; no estágio 3 ocorre uma perda de água adsorvida fisicamente aos cristais de C-S-H. No estágio 4, acontece a perda de água interlamelar, e no último estágio ocorre a perda de água quimicamente combinada. Na Figura 8 é possível observar a perda de massa destes diferentes estágios.

Figura 8: Relações entre a perda de água (em massa) e a retração por secagem



Fonte: Metha e Monteiro (2014).

Dong, Zhou e Wu (2014) explicam que a retração ocorre principalmente em formatos em que o concreto é mais suscetível, como em lajes, pois quanto mais plano e maior a área de contato com o ar maior será a tendência a retração.

Também há a retração autógena, que significa a presença de um estado termodinâmico, ou seja, um sistema está sob condições autógenas quando não perde ou ganha massa, não sofre variações térmicas e nem está submetido a forças externas. Portanto, o conceito de retração autógena não está em momento algum relacionado ao tempo de pega do concreto. (KUMM, 2009).

Os fatores influentes na ocorrência da retração autógena é a diferença de módulo de elasticidade entre a pasta e os agregados; a quantidade e a dimensão dos agregados utilizados, sendo que quanto maior, menor será a deformação por retração; o consumo de cimento e de água na mistura; a utilização de adições booleanas e escórias de alto forno; utilização de aditivos superplastificantes e a espessura da peça concretada (METHA; MONTEIRO, 2014).

A retração autógena é um processo, sem influências externas, que ocorre devido a hidratação do cimento Portland, não sendo resultado de cargas externas, e sem ganho ou perda de massa e sem desenvolvimento de gradientes de umidade ou temperatura. Ela é uma redução macroscópica dos materiais cimentícios, que ocorre em condições específicas de isolamento, após o início da pega, sem mudanças de volume decorrentes de perda ou ingresso de substâncias, variação da temperatura ou aplicações de forças externas (HASPARYK *et al.*, 2007). Em outras palavras, pode-se dizer que a retração autógena é um processo de redução que ocorre em corpos cimentícios, intrínseco às próprias reações de formação de C-S-H, sem que haja alguma forma de contribuição externa. A retração autógena deve ser evitada devido aos

problemas, como microfissuras ou macro fissuras, que ela pode causar, prejudicando a qualidade do concreto (LURA; VAN BREUGEL, 2002).

Segundo Balthar (2004), a retração autógena pode ser dividida em três fases:

- ⇒ Contração Inicial;
- ⇒ Período de Expansão;
- ⇒ Retração Final.

A primeira etapa, Contração Inicial, ocorre de duas a três horas após a mistura, ainda no estado fluido. É nesta etapa que ocorre o início das reações de hidratação e a contração de Le Chatelier, originária do menor volume dos hidratos formados pelas reações, em comparação com o volume dos reagentes iniciais mais a água.

Essa contração não é prejudicial às estruturas de concreto, pois o concreto nessa etapa ainda não apresenta comportamento sólido e logo não sofre fissuração. Entre quatro a dez horas, podendo ser prolongada até vinte horas, ocorre a segunda etapa, chamada de Período de Expansão.

Esta fase está relacionada à formação de grandes cristais de etringita durante a pega, e a uma considerável dilatação térmica proveniente das reações exotérmicas existentes. Por fim, tem-se a fase da Retração Final ou Autossecagem.

Esta fase se inicia após a pega e somente termina quando todo o processo de hidratação do cimento é concluído. É nessa fase que ocorre o maior percentual da retração autógena, onde a hidratação do cimento succiona a água adsorvida, provocando uma tensão capilar no interior dos poros, que gera a aproximação das partículas. O mecanismo responsável pela retração autógena é a autodessecação, que corresponde a uma diminuição da umidade relativa interna do material (SILVA, 2007).

A uma dada temperatura, a retração autógena depende da composição da mistura (BENTZ; JENSEN, 2004). Logo, a retração autógena se altera devido a diferentes fatores, como, à exposição a temperatura, à composição, teor e finura do cimento, ao teor de sílica ativa, ao conteúdo de agregado e à presença de escória (JENSEN; HANSEN, 2001; LURA; VAN BREUGEL; MARUYAMA, 2001). Portanto, depende também de certos parâmetros de mistura, entre eles, relação a/c (ou água/material cimentante, no caso de CAR) e consumo de cimento (SILVA, 2007).

### 2.3.2 Procedimentos de cura do concreto

A cura é uma maneira adequada de manter o concreto hidratado nos seus primeiros dias, para que possa alcançar a resistência à compressão característica de projeto bem como excelente durabilidade. O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível dessa condição até que os espaços inicialmente ocupados pela água sejam ocupados pelos produtos da hidratação do aglomerante (BARDELLA; BARBOSA; CAMARINI, 2005).

A cura deve iniciar imediatamente após a concretagem. A reação de hidratação do cimento só acontece na presença de água, e sem a cura ou o controle adequado da hidratação do material cimentício, essa água pode ser evaporada ou perdida e conseqüentemente o concreto não terá as características físicas e mecânicas desejadas (DANTAS, 2013).

Quando se fala em cura do concreto, a temperatura é um fator importante. Um aumento de temperatura age sobre as velocidades das reações químicas, que envolvem a pega e endurecimento do concreto exercendo uma função de catalisador na hidratação do cimento, mas também facilita a perda de água para o meio. Outros fatores importantes são a velocidade do vento e a umidade do ar, elas contribuem diretamente na taxa de evaporação e perda de água do concreto, podendo resultar em fissuras e perda da durabilidade (DANTAS, 2013).

Cura do concreto são procedimentos que consistem em oferecer ao mesmo um ambiente favorável através da retenção e/ou fornecimento de umidade em temperaturas ideais ao desenvolvimento das reações de hidratação.

Há muito se sabe da necessidade de se aplicar cura em concretos a fim de manter uma umidade relativa interna elevada para proporcionar uma hidratação eficiente e também para evitar a retração nas idades iniciais. Os tipos de cura podem ser divididos em dois: cura interna e externa, sendo mais eficiente a cura interna para mitigar a retração autógena, pois o cimento apresenta uma microestrutura mais densa e, assim, dificulta a entrada de água tornando a cura externa praticamente ineficiente (RILEM, 2005).

## 2.4 Cura interna

Os agentes de cura interna podem ser agregados leves, tais como argilas expandidas, pedras pomes, agregados reciclados, entre outros, bem como polímeros superabsorventes. Cada um desses elementos tem uma capacidade distinta de absorção, variando conforme sua massa específica e sua porosidade acessível.

### 2.4.1 Conceito

O conceito de cura interna foi inicialmente discutido por Klieger (1958), considerando a possível deficiência da hidratação do cimento oriunda da redução de umidade interna, o autor analisou concretos com quatro relações água/cimento: 0,29; 0,32; 0,35 e 0,42, comparando suas resistências à compressão nas idades de 1 e 28 dias. A conclusão obtida pelo autor é que a utilização de agregados leves pré-saturados – agentes de cura interna – influenciam significativamente no comportamento mecânico dos concretos; no entanto, em idades avançadas, existe uma relação água/cimento (a/c) crítica, a partir da qual uma acentuada perda de resistência é constatada.

A movimentação da água na matriz cimentícia, dotada de agentes de cura interna, pode ocorrer, como observado por Lura *et al.* (2004), desde que haja uma pressão de sucção interna necessária, ou baixa umidade relativa no mesmo local.

A cura externa permite que a solução percorra para o interior do maciço de concreto apenas pelos seus capilares; a segunda forma de cura, interna, disponibiliza ao interior da matriz, acessível ou não por capilares, uma reserva de água disponível à sua necessidade de uso.

## 2.5 Agentes de cura interna

A cura interna é uma técnica onde é incorporado alguns produtos saturados em água, com capacidades de retenção e liberação no concreto conforme a estrutura solicita. Desta forma a cura é feita do interior para exterior. Esta técnica aumenta positivamente as propriedades do concreto, diminuindo suas fissuras e aumentando consequentemente a durabilidade destas estruturas, pois não há porta de entrada para os agentes agressivos. (SCHLITTER; BARRETT; WEISS, 2010).

A cura interna pode ser classificada em duas categorias: água de cura interna (ou água incorporada) e vedação interna. O agente de cura interna é o material que armazena água no concreto e libera-a ao longo do tempo, a fim de evitar a autodessecação no material cimentício. Na vedação interna, o agente de cura é destinado para atrasar ou prevenir a perda de água a partir do endurecimento do concreto. Como citado por Assmann (2013) o princípio básico da cura interna é o fornecimento de fontes de água para evitar no concreto a autodessecação, por um lado, e por outro lado, para promover a hidratação.

A autodessecação pode ser mitigada pela movimentação da água de reserva interna para o espaço dos poros, criado pela retração química. Desta forma, a formação de meniscos ar-água

é minimizada e a queda de UR é reduzida ou até mesmo evitada. Conseqüentemente, o risco de fissuras em idades precoces provocado pela retração por autodessecação é reduzido drasticamente. Uma vez que a água de cura interna é considerada como água extra, que é acessível para a hidratação, a cura interna leva a um aumento do grau de hidratação.

Diferente da forma tradicional, Jensen (2014) ressalta que a utilização de polímeros superabsorventes (PSA) tem dois principais efeitos, um positivo e outro negativo. A aplicação deste material aumenta a resistência do concreto, pois melhora a hidratação do concreto; mas estes mesmos elementos que auxiliam neste importante aspecto, podem criar vazios no concreto.

A partir deste aspecto é importante verificar o quanto o material se torna poroso, pois no momento da hidratação pela cura interna, o material deixa vazios que podem contribuir de forma negativa para a estrutura. Esta observação é representada na Figura 10 a seguir, que em um primeiro estágio mostra o processo de saturação, em seguida o material com água em seu interior é misturado no concreto. Logo após no momento da hidratação do concreto a água presente no polímero é liberada gradativamente, contudo esta água que é consumida, força o material a voltar para um tamanho próximo ao original e assim causando um espaço vazio no concreto. (DENG *et al.*, 2016).

Figura 10: Porosidade do SAP no concreto.



Fonte: Adaptado de Deng *et al.* (2016).

Por outro lado, estes mesmos vazios podem auxiliar para dispensar as tensões atuantes no concreto. Neste mesmo trabalho de Dent *et al.* (2016), é possível observar que os vazios contribuíram para diminuir a tensão interna do concreto, desta forma auxiliando na diminuição de fissuras.

Em uma análise microestrutural, é possível perceber que o concreto com cura interna se apresenta mais denso e com uma quantidade de microfissuras menores. El-Dieb, El-Maaddawy e Mahmoud (2012) compararam um concreto convencional com concretos onde foi realizado cura interna com adição de polietilenoglicol (PEG) combinado com poliacrilamida (PAM) e também com a adição de 8% de sílica ativa (SA). Os concretos produzidos com cura interna,

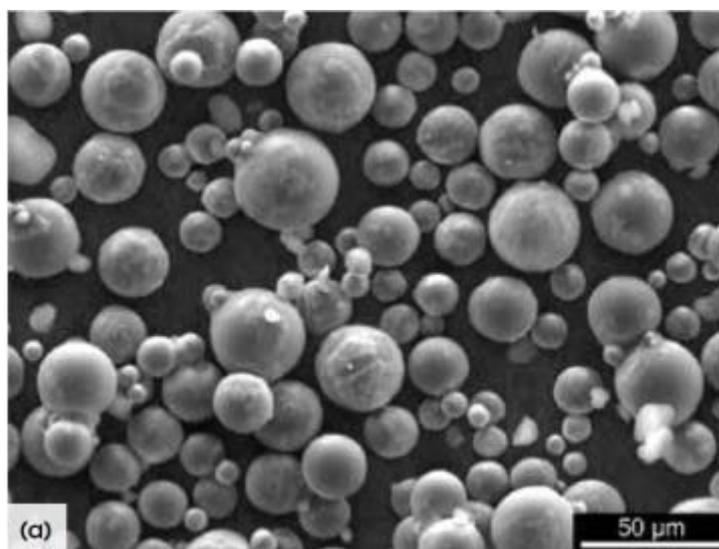
tanto PEG quanto PEG + PAM com sílica, obtiveram resultados superiores ao concreto convencional. Comparando os dois métodos de cura interna, as amostras contendo SA obtiveram resultados superiores, pois a incorporação do material pozzolânico contribuiu para a diminuição destas fissuras, já que a sílica começou a reagir com produtos da hidratação do concreto, principalmente com o passar do tempo.

### 2.5.1 Dosagem de agentes de cura interna

Philleo (1991 apud BENTZ; WEISS, 2010) foi um dos primeiros pesquisadores a sugerir que os agregados finos leves fossem saturados em água a fim de auxiliar na cura do concreto visando diminuir o efeito de retração. A partir deste trabalho começou-se a buscar formas e materiais que pudessem ser utilizados para este feito. Mais adiante Bentz e Snyder (1999) propuseram uma fórmula para que fosse possível estipular a quantidade de material necessária a ser incorporado em concreto de alto desempenho (CAD) em função da capacidade de absorção do material, grau de saturação do agregado, densidade de água e consumo de cimento.

Jensen e Hansen (2001) mais tarde utilizaram um polímero superabsorvente para conseguir o efeito da cura interna, este material vem sendo muito utilizado nos últimos anos para se obter as características desejadas. Na Figura 11, é demonstrado o polímero comercial utilizado por Jensen (2014), analisando a imagem obtida por um microscópio eletrônico de varredura, o material é composto diversas esferas de diâmetros máximos de aproximadamente 25  $\mu\text{m}$ . Como estas esferas são muito pequenas, a olho nu não é possível distinguir elas e acabam ficando similar ao um pó branco.

Figura 11: SAP comercial visto em MEV



Fonte: Jensen (2014).

Outro material, utilizado por Jordani (2016) como agente de cura interna, é o agregado graúdo de concreto reciclado, mas este autor ainda não obteve êxito com este material.

De acordo com Assmann (2013), num sistema aberto, a hidratação completa é possível, mesmo na faixa de  $0,36 < a/c < 0,42$  desde que a água de cura externa esteja disponível e a amostra seja o suficiente pequena para facilitar o consumo de água. Ao fazê-lo, o espaço cheio de ar criado a partir da retração química é substituído por água.

Gomes (2014), estudou a potencialidade de aplicação de um material oriundo de uma empresa que realiza o trabalho de reciclagem de produtos de higiene que não passaram pelo controle de qualidade, na aplicação de argamassas de revestimento. Neste trabalho obteve importantes resultados para o conhecimento geral do material. A partir deste trabalho, Koppe (2016) estudou este material em argamassas, onde obteve importantes resultados para o ganho de resistência a compressão.

#### 2.5.2 Estudos em concreto com agentes de cura interna

Após Jensen e Hansen (2001) iniciarem os estudos na utilização de polímeros superabsorventes para aplicações na construção civil, uma das obras envolvendo cura interna e PSA, foi a construção de pavilhões para sediar a Copa do mundo de 2006 em Kaiserslautern – Alemanha (MECHTCHERINE; REINHARDT, 2012). Na Figura 12 é demonstrado o pavilhão com estruturas feitas em concreto com cura interna.

Figura 12: Pavilhão construído na Alemanha

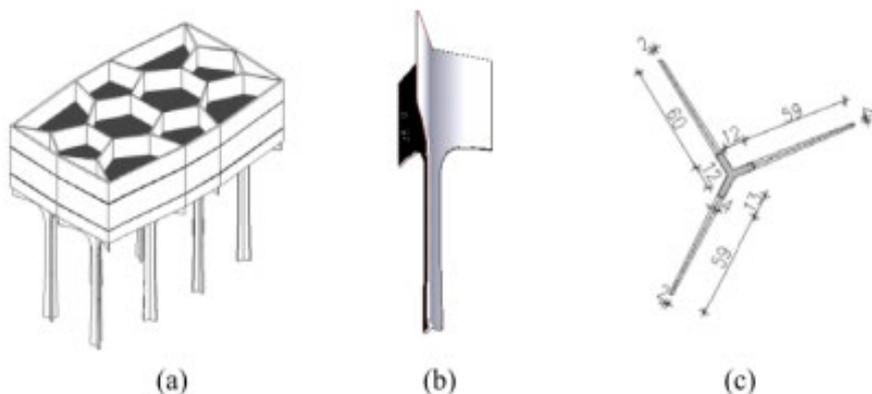


Fonte: Mechtcherine e Reinhardt (2012).

Para que melhorasse o desempenho da estrutura em relação a retração autógena, durabilidade, tenacidade e fluidez, e garantisse um acabamento de alta qualidade, foi sugerido a aplicação deste material.

A Figura 13 demonstra os elementos utilizados na estrutura. É possível analisar que estes pilares que foram moldados são extremamente estreitos em suas extremidades, já que a largura deles era de 20mm apenas, por isso houve uma grande necessidade de cuidados quanto a sua estrutura (MECHTCHERINE; REINHARDT, 2012).

Figura 13: Estrutura do pavimento: (a) Modelo tridimensional; (b) Forma dos pilares; (c) Dimensões dos pilares em cm.

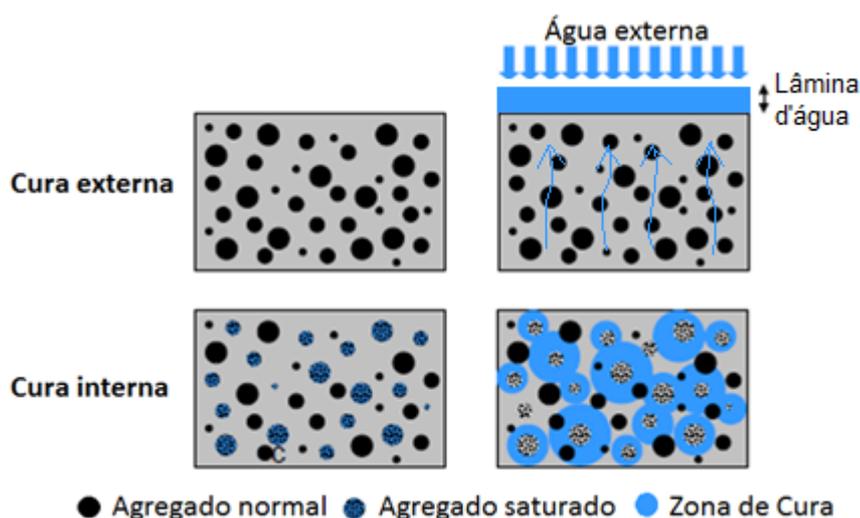


Fonte: Mechtcherine e Reinhardt (2012).

A utilização de materiais para auxiliar na cura interna já foi utilizada em grandes obras como, por exemplo, a pavimentação do pátio ferroviário em Huthins – Texas, EUA. Villarreal e Crocker (2007) demonstram que foi utilizado um total de 190.000 m<sup>3</sup> de concreto, e para esta obra o material utilizado para a obtenção da cura interna foi a substituição do agregado médio por agregado fino pré-molhado. Visando obter conhecimento necessário antes de uma aplicação em campo, foram realizados diversos ensaios em laboratório para que não ocorresse nenhum problema durante a execução em grande escala. No trabalho destes autores, foram utilizadas duas formas de cura dos corpos de prova, uma úmida e outra seca com agregados pré-molhados. Foi realizado um acompanhamento destes pisos desde 2007 até 2010 e apenas duas fissuras foram registradas, demonstrando a eficiência da cura interna. Um outro fato relevante relatado nesta pesquisa de Villarreal e Crocker (2007), foi a resistência à tração, que aos 7 dias chegou em torno de 90 à 100% da resistência prevista para os 28 dias.

Conforme Bentz e Weiss (2010), na cura interna o material incorporado cria zonas que auxiliam o concreto protegendo da evaporação d'água, diferente da cura convencional onde é preciso criar uma película de água para evitar que a água presente no concreto evapore devido a fatores já abordados neste trabalho. Na Figura 14 é possível visualizar o comparativo destas duas técnicas de cura.

Figura 14: Cura convencional x Cura interna.



Fonte: Adaptado de Bentz e Weiss (2010).

Mechtcherine *et al.* (2018) realizaram um teste *round-robin* por 13 grupos de pesquisa internacionais no âmbito das atividades do Comitê Técnico RILEM 260 RSC “Recomendações para uso de polímeros superabsorventes na construção de concreto”. Dois polímeros

superabsorventes (SAP) comercialmente disponíveis com diferentes composições químicas e classificações foram testados em termos de sua cinética de absorção em diferentes meios; água desmineralizada, solução de filtrado de cimento com um cimento particular distribuído a cada participante e um cimento local escolhido pelo participante. Dois métodos de teste de absorção foram considerados; o método do saquinho de chá e o método de filtração. A capacidade de absorção foi avaliada em função do tempo. Os resultados mostraram correspondência no comportamento dos SAPs entre todos os participantes, mas também entre os dois métodos de teste, embora uma alta dispersão tenha sido observada nos primeiros minutos do teste após a imersão. O método do saquinho de chá mostrou-se mais prático em termos de estudo dependente do tempo, sendo que o método de filtração apresentou menor variação na capacidade de absorção após 24 h. No entanto, a absorção seguida por dessorção mediada por íons intrínseca de uma amostra SAP específica ao longo do tempo não foi detectada pelo método de filtração. Essa característica específica do SAP foi exibida apenas pelo método do saquinho de chá. Isso demonstra a aplicabilidade prática de ambos os métodos de teste, cada um com seus próprios pontos fortes e fracos em momentos de teste distintos.

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

Claro e Saraiva (2013) realizaram ensaios com o uso de PSA em concretos de alto desempenho, seguindo as prescrições da RILEM TC 225 – PSA Round Robin Test. Eles ensaiaram dois traços, um com 0,3% e outro com 0,6% de PSA em relação a massa de cimento. Os resultados obtidos para a retração autógena para esses traços foram comparados com um traço de referência com relação a/c de 0,3. Foram encontradas reduções na retração autógena de 58% e 78% para os traços com 0,3% e 0,6% de PSA, respectivamente.

Manzano (2016) cita que o desempenho do traço 0,30-PSA 0,3 também pode ser comparado com a mistura PSA\_0,6 avaliada por Ordoñez *et al.* (2013), pois possuem a mesma relação a/c básica. Manzano usou o PSA B num teor de 0,6%, e a mesma quantidade de água de cura interna de  $(a/c)_i \approx 0,05$ . O traço PSA\_0,6 atingiu uma magnitude de retração aos 28 dias de  $-207 \mu\text{m/m}$ , além disso, a expansão inicial foi neutralizada com 5 dias de idade. Os resultados mostram um desempenho inferior do PSA B, quando comparado com o PSA A. Portanto, conclui-se que a ação de cada polímero como agente mitigador da retração, muda em função

das suas propriedades, dependendo principalmente da sua composição química (densidade aniônica e grau de reticulação) e, portanto, da cinética de liberação da água de cura ao longo do tempo.

Zhutovsky e Kovler (2013) avaliaram a eficiência de diferentes tipos de cura por meio da calorimetria isotérmica. Foram estudadas pastas com quatro diferentes relações a/c (0,21, 0,25, 0,33 e 0,45) e foi utilizado o PSA como agente de cura interna. As medições começaram após 40 min da adição da água, e terminaram com 160 h. A incorporação de PSA e água de cura interna causou um ligeiro desvio para a direita (retardamento) do pico principal da taxa de calor, e uma redução notável, exceto para a pasta com relação a/c de 0,21, onde o pico da mistura com polímero foi maior. Finalmente, os autores concluíram que quanto menor é a relação a/c das pastas, maior foi a eficiência dos diferentes tipos de cura na promoção da hidratação do cimento, incluindo o uso de PSA e água de cura interna.

Justs *et al.* (2014) avaliaram o efeito da adição de PSA na cinética de hidratação de pastas com baixa relação a/c. Foram estudadas nove pastas com relações a/c entre 0,20 e 0,30, sendo cinco de referência e quatro contendo PSA e água de cura interna. O teor de aditivo superplastificante foi constante em todas as misturas (1,0 % da massa de cimento). O fluxo de calor foi medido num Calorímetro de condução isotérmica Thermometric TAM AIR, as leituras começaram uma hora depois da adição da água. O aumento da relação a/c nas pastas de referência levou a um retardamento do pico calorimétrico principal, assim como um incremento no seu valor. Além disso, nota-se que a adição de PSA modifica radicalmente a cinética de hidratação de pastas de cimento, especialmente nas primeiras 30 h. O calor acumulado aumentou com o incremento da relação a/c das pastas de referência. Todas as misturas contendo PSA alcançaram maiores valores de calor de hidratação, se comparadas com a referência. O calor acumulado dessas pastas só excedeu o valor da mistura de referência após 24 h.

Os autores concluíram que os picos principais de hidratação das pastas contendo polímero são inferiores e aparecem antes, se comparados com as misturas de referência, que possuem a mesma relação a/c total. Esse comportamento é causado pela liberação gradual da água de cura interna do PSA. Por outro lado, os picos principais das pastas com PSA foram ligeiramente retardados em comparação com a mistura de referência, que contém a mesma quantidade de água livre ou a mesma relação a/c básica. Duas possíveis explicações para isso são: a lixiviação da fração solúvel do PSA que pode interferir na hidratação, e a absorção de íons alcalinos dentro do polímero (JUSTS *et al.*, 2014).

Manzano (2016) cita que a magnitude do efeito na tensão de escoamento muda em função do tipo de polímero, e em consequência, das suas propriedades. A pasta contendo PSA

C foi a que obteve maiores valores quando comparada com a referência. Esse polímero tem um formato granular, além de apresentar o maior tamanho quando inchado. O segundo PSA que mais influencia neste parâmetro é o A, neste caso o polímero possui o menor diâmetro médio inchado e a sua forma é esférica. Assim, pode-se inferir que o efeito do diâmetro das partículas inchadas vai depender da forma, ou seja, quando esféricas, o menor diâmetro inchado, maiores valores de tensão de escoamento. Pelo contrário, quando as partículas inchadas são granulares, menores diâmetros diminuem esse parâmetro reológico.

É importante mencionar que a cinética de desorção de água vai depender do tipo de PSA. Schroefl *et al.* (2015) determinaram, pela técnica de radiografia de nêutrons, que um PSA do tipo não retentivo iniciou a liberação da água para a matriz cimentícia, quase imediatamente depois da preparação da pasta. Por outro lado, um PSA do tipo retentivo começou a liberar a água no início do período de aceleração.

Laustsen, Hasholt, e Jensen (2015) investigaram a causa desse efeito em concretos utilizando o mesmo PSA desta pesquisa, mas de diferentes lotes de fabricação. Uma vez que esse polímero é produzido por suspensão inversa, os resíduos da suspensão auxiliar (agente tensoativo) podem se precipitar sobre a superfície das partículas do PSA. Os autores concluem que ar aprisionado adicional parece ser causado por um contaminante nas partículas de PSA no processo de polimerização por suspensão. O agente tensoativo contaminante funciona como um aditivo incorporador de ar.

Para Manzano (2016) em sua pesquisa, observou que o período de reação inicial é importante para a análise da cinética de absorção dos polímeros, porque assume-se que os PSAs já alcançaram sua capacidade máxima de inchamento após essa idade. Mediante a comparação do comportamento e da forma das curvas de fluxo de calor, pode-se dizer que o PSA B foi o que absorveu mais rápido a água, pela sua semelhança com a curva da pasta Ref-0,30. A maior velocidade do PSA B pode estar associada ao menor valor de absorção no meio cimentício que apresentou esse polímero. Já os PSAs finos (A e D) aumentaram a amplitude da curva com menores valores de calor de molhagem. A pasta contendo polímero C foi a que apresentou o menor valor, o que indica um maior tempo de absorção pela maior disponibilidade de água de amassamento na mistura, cabe notar que esse polímero apresentou o maior valor de absorção no meio cimentício.

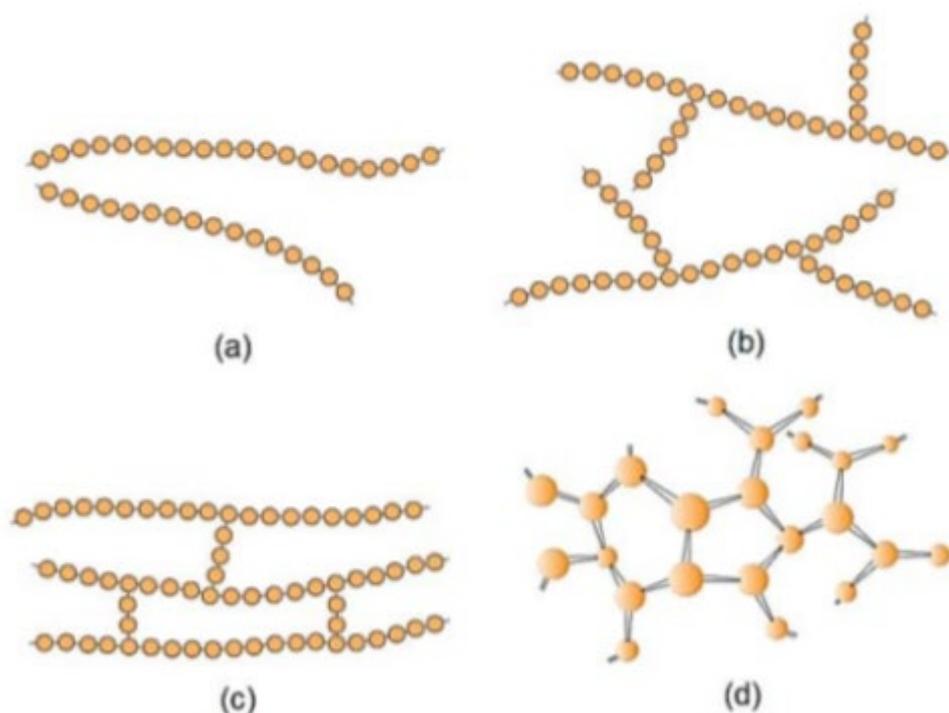
## 2.6 Polímero superabsorvente residual (PSAR)

Segundo Callister (2012), os materiais sólidos podem ser agrupados em três classificações básicas: metais, cerâmicas e polímeros. A palavra polímero vem do grego poli (muitos) + meros (iguais). Os polímeros são um tipo de macromolécula (molécula formada por cadeias de átomos com peso molecular elevado), que tem como característica possuir uma unidade química que se repete ao longo da molécula. As pequenas moléculas, que se combinam na reação de polimerização (ligação covalente) para formar o polímero, são chamadas de monômeros.

Os polímeros podem ser agrupados segundo várias classificações, dentre elas em relação: a sua ocorrência, a sua estrutura molecular, a natureza de sua cadeia, a sua morfologia e a seu comportamento mecânico. Conforme a sua ocorrência, eles podem ser considerados naturais (existem na natureza) e sintéticos (a maioria orgânicos) que são produzidos pelo homem, por exemplo: o nylon, o polietileno, o PVC, entre outros. Os polímeros sintéticos podem se classificar em: elastômeros (possuem alta elasticidade), as fibras (são capazes de se orientar para formar filamentos compridos finos com grande resistência) e os plásticos (podem ser moldados sobre pressão e se transformar em diversos objetos) (CALLISTER, 2012).

Segundo a sua estrutura molecular, os polímeros podem se classificar em: lineares (as unidades de mero se encontram ligadas entre si, terminal a terminal, em cadeias únicas), ramificados (as cadeias com ramificações laterais estão conectadas às cadeias principais), com ligações cruzadas (as cadeias lineares adjacentes se juntam entre si em várias posições por ligações covalentes) e em rede (as unidades de mero têm 3 ligações covalentes ativas, formando redes tridimensionais). A Figura 15 mostra a representação esquemática de cada um dos tipos de polímeros descritos anteriormente (CALLISTER, 2012).

Figura 15: Representações Esquemáticas das estruturas moleculares: (a) lineares, (b) ramificadas, (c) cruzadas, e (d) em rede (tridimensional). Círculos designam unidades de mero individuais.



Fonte: Callister (2012).

Os polímeros superabsorventes (PSAs) são um grupo de materiais poliméricos sintéticos que têm a capacidade de absorver uma grande quantidade de líquido do ambiente e de retê-lo dentro da sua estrutura, sem dissolução (JENSEN; HANSEN, 2001). Este tipo de polímero tem a capacidade de absorver água até 100.000 vezes seu peso próprio.

Segundo Zohuriaan-Mehr e Kabiri (2008), os polímeros superabsorventes podem ser classificados em quatro grupos com base na presença ou ausência de carga elétrica situada nas cadeias reticuladas: (a) não-iônico, (b) iônico (incluindo aniônico e catiônico), (c) eletrólito anfotérico (anfotéricos) contendo ambos os grupos ácidos e básicos e (d) zwitteriônico.

Os PSAs são polieletrólitos reticulados que começam a inchar em contato com água ou soluções aquosas, resultando na formação de um hidrogel. Na prática da engenharia, os PSAs são, na sua maioria, poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas, ou poliacrilatos poliacrilamidas copolimerizados. Na indústria de higiene, apenas PSAs baseados em ácido poliacrilato reticulado são usados, o qual é parcialmente neutralizado com hidróxidos de metais alcalinos, habitualmente de sódio (FRIEDRICH, 2012).

O PSAR (Polímero Superabsorvente Residual), como utilizado nesta pesquisa, é um material obtido através de imperfeições e/ou retalhos de fraldas e absorventes higiênicos. São basicamente formados por fibras celulósicas e polímeros superabsorventes como poliacrilato ácido. Este resíduo é a junção de diversos tipos de fraldas, como noturnas e diurnas, e absorventes femininos, o que dificulta um pouco sua homogeneidade. Para auxiliar o

desempenho positivo e diminuir manifestações patológicas de retração no concreto, é estudada a aplicação deste material superabsorvente como agente de cura interna. O PSAR é o descarte de uma empresa que atua no setor de higiene, proveniente de produtos como fraldas e absorventes femininos, que não passaram pelos padrões mínimos estabelecidos pela empresa.

Este material se torna interessante também pelo fato que em condições de pH elevado, ocorre a liberação da água contida, como observado por Gomes (2014). Em seus estudos, foi observado que este mesmo material possui uma característica que em ambientes ácidos e neutros, o PSAR tinha a capacidade de absorver uma quantidade maior de líquidos, mas em ambientes altamente básicos ocorria a liberação desta água. Estudando sua aplicação em argamassas estruturais, Koppe (2016) obteve ótimos resultados em termos de ganho de resistência e redução da retração.

Em tese, os PSAs utilizados para este fim podem absorver uma quantidade de água de até 1500 vezes o seu próprio peso seco, mas em soluções com grandes quantidades de íons dissolvidos (como no caso do concreto) a capacidade de absorção limita-se a aproximadamente 20 vezes. Para o concreto, praticamente toda a água absorvida pelo PSA pode ser considerada como quimicamente disponível para reagir com o cimento (KOVLER; JENSEN, 2005).

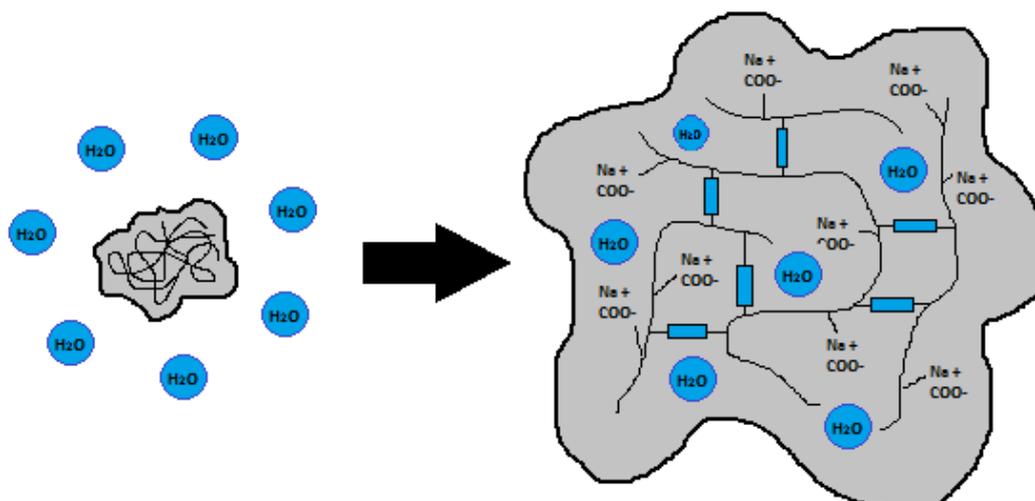
Comumente as dimensões dos grãos de PSA utilizados para cura interna estão entre 125 e 250  $\mu\text{m}$  no estado seco, e crescem aproximadamente 3 vezes quando saturados. Pesquisas indicam que há uma faixa ideal de tamanho de partículas de PSA, aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  no estado seco, para que tenham eficiência otimizada no combate à retração (LURA *et al.*, 2006).

Quando as partículas são maiores, estas podem não suprir todas as partes da pasta de cimento com água durante a hidratação. Partículas grandes podem também ter uma eficiência reduzida pela falta de tempo suficiente para sua plena saturação durante a mistura.

Em contrapartida, partículas extremamente pequenas podem ser também pouco eficientes pelo efeito de absorção de produtos de hidratação do cimento, ou pela menor atividade da superfície do polímero (JENSEN; HANSEN 2002). A distribuição granulométrica dos grãos de PSA influi ainda na reologia do material cimentício.

Visando um melhor comportamento do material polimérico quando adicionado ao concreto, deve-se hidratá-lo antecipadamente, conforme demonstrado em estudos anteriores (BENTZ; JENSEN, 2014; JORDANI, 2016; KOPPE, 2016). No momento da hidratação ocorre a formação de um gel, mas em seu interior ainda há material que não sofreu contato com água. A água no processo de hidratação, fica entre as cadeias do polímero, conforme demonstrado na Figura 16. Esta é a razão do polímero inchar e aumentar de volume.

Figura 16: Hidratação do polímero.



Fonte: Mechtcherine e Reinhardt (2012).

A natureza da porosidade do concreto é significativamente modificada pela adição do PSA: os poros vazios, gerados pela autosecagem numa pasta de cimento sem inclusão de PSA, são irregulares e parcialmente conectados. Ao contrário, os poros vazios gerados em uma pasta modificada pela inclusão de partículas de PSA serão, em sua maioria, esféricos desconectados e de forma definida. Deste modo, espera-se que a durabilidade seja superior nas misturas com PSA.

Onghero, Repette e Pilar (2012) estudaram os efeitos da utilização de polímeros superabsorventes (PSA) com diferentes tamanhos de grãos para o combate à retração de argamassas destinadas à produção de concreto-autoadensável, onde as diversas granulometrias apresentaram boa eficiência ao combate da retração.

De acordo com Assmann (2013), cerca de 95% da produção de PSA é destinada à aplicação em fraldas de bebê. A apresentação de PSA mais comumente disponível é seca, em pó granular e duro, com uma variedade de tamanho de partícula de aproximadamente 100 a 1000  $\mu\text{m}$ . Os PSAs podem ser produzidos por dois processos: por polimerização por solução (também chamado de polimerização em gel) ou polimerização por suspensão inversa.

Segundo Friedrich (2012), a produção de PSA por polimerização em gel inicia-se com uma solução aquosa de monômeros com uma concentração entre 25 a 40% em massa. A solução é arrefecida de 0 a 10°C e transferida para o reator. Este pode ser de correia sem fim ou um amassador. No caso do reator de correia, a solução de monômero é derramada no início da correia e a polimerização é realizada adiabaticamente, formando um gel semelhante à uma

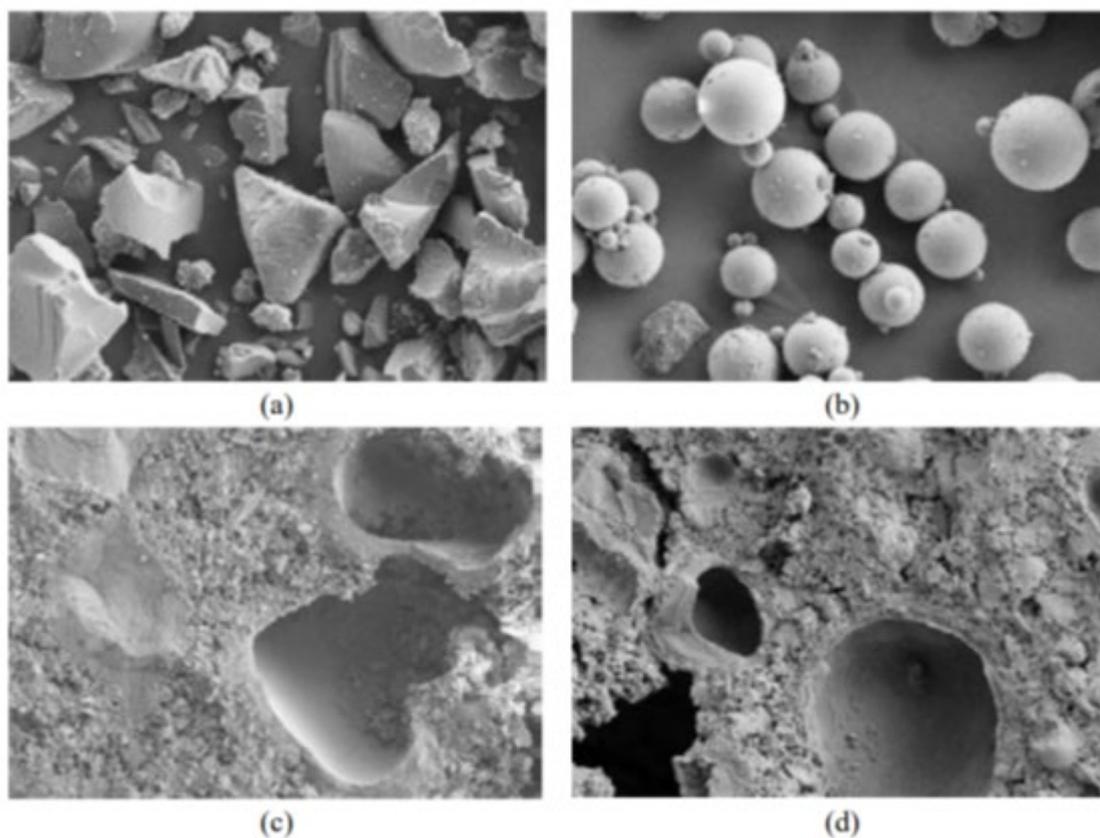
borracha dura. No final da correia uma máquina de extrusão corta o gel em partes pequenas, que são secas posteriormente. As partículas secas são moídas ao tamanho de partícula desejado.

No caso do amassador, a polimerização e o corte do gel são feitos num único passo. Ambos os processos são usados em larga escala. As partículas feitas via polimerização por solução, têm uma forma irregular e aparecem como vidros quebrados sob um microscópio (Figura 17 – a e c).

No processo de polimerização por suspensão inversa, a solução aquosa de monômeros é suspensa num solvente orgânico, por exemplo o hexano ou o ciclo-hexano. A polimerização é iniciada entre 50 e 70 °C e, após este processo, a água pode ser removida por destilação azeotrópica. O produto é filtrado e seco. Os PSAs que são feitos por esse método são esféricos (Figura 17 – b e d). Eles podem ser partículas esféricas individuais ou em forma de framboesa, como aglomerados de partículas esféricas menores. As variáveis que podem afetar os dois processos de polimerização são as concentrações de monômero e o agente de ligação cruzada, a concentração e o tipo de iniciador utilizado e a temperatura de reação (FRIEDRICH, 2012).

As fibras superabsorventes (FSA) representam uma outra configuração de material de polímero superabsorvente. As FSA podem ser produzidas por fiação a seco a partir essencialmente de um termopolímero de ácido acrílico, acrilato de metilo e hidroxilo, contendo monômeros, como por exemplo, o hidroxietil acrilato (ASSMANN, 2013).

Figura 17: Forma das partículas de polímeros produzidos por: a) polimerização de gel; b) polimerização por suspensão inversa; c) poro seco deixado por partículas de PSA polimerizada em gel numa pasta de cimento endurecida após a secagem; d) poro seco deixado por uma partícula de PSA polimerizado via polimerização por suspensão inversa numa pasta de cimento endurecido.



Fonte: Friedrich (2012).

Os mecanismos de transporte de água para a partícula de PSA são: a pressão osmótica, a interação eletrostática, a entropia, a ação capilar e a interação de Coulomb. Estes mecanismos dependem da natureza química do polímero. Segundo Jensen e Hansen (2001), os polímeros existem na condição seca (colapsada) e na condição inchada (saturada). O processo de transição entre esses dois estados, de fases diferentes, é resultado de um balanço entre forças repulsivas que tendem a expandir a rede polimérica e de forças atrativas que tendem a retrai-la.

Wyrzykowski *et al.* (2012) citam que a mobilidade da água no endurecimento da pasta de cimento é um aspecto importante tendo em vista a eficácia da cura interna. Um modelo numérico do tipo mecânico de materiais cimentícios foi aplicado para a análise da cinética de migração de água de agentes de cura internos quando de polímeros superabsorventes (SAP) em pastas de cimento hidratantes com uma baixa relação água-cimento. Mostra-se que a liberação da água de cura em idade precoce (ou seja, durante aproximadamente o primeiro dia de hidratação) permite uma distribuição uniforme e praticamente instantânea da água em todo o volume da pasta curada, mesmo que as distâncias para migração da água sejam elevadas, como 2-3 mm. A evolução da permeabilidade como resultado do processo de hidratação mostra ter um grande impacto na mobilidade da água na pasta de cimento. A porosidade capilar pode inibir substancialmente o transporte de água. A análise mostra que uma parte da água

inicialmente recebida pela pasta nas proximidades do SAP pode ser posteriormente redistribuída em um grande volume de pasta de endurecimento, mesmo após a permeabilidade ter se tornado muito baixa.

Quando um PSA de ligação cruzada é introduzido num meio aquoso, as unidades iônicas dissociam-se e criam uma densidade de carga ao longo das cadeias que geram repulsões eletrostáticas e tendem a expandir o gel, promovendo o inchamento (Figura 17). Além disso, se produz uma elevada concentração de íons no gel, o que causa uma pressão osmótica que é reduzida pela diluição da carga, isto é, pelo inchamento do gel (KIATKAMJORNWONG, 2007).

Santos, Gonçalves e Crescêncio (2009) utilizaram o PSA extraído de fraldas descartáveis, para medir sua capacidade de absorção e o seu comportamento em condições agressivas. Os autores concluíram que o PSA é uma alternativa à impermeabilização podendo ser utilizado em argamassa para assentamento de blocos cerâmicos, principalmente quando utilizada no capeamento, pois o mesmo formará uma barreira que impedirá a infiltração de água por capilaridade, possibilitando a impermeabilização de elementos construtivos, como embasamento, fundações, etc.

Com o objetivo de avaliar a redução da retração do concreto, Nunes (2012) testou a adição do PSA e chegou ao resultado de que pode ser benéfico na redução da retração total e autógena, sendo mais eficaz na retração autógena. Além disto, verificou que o material não teve grande efeito na retração por secagem, reduziu a perda de massa só nas primeiras idades, aumentando-a a partir dos 42 dias, e diminuiu a resistência à compressão em torno de 30% (aos 7 dias) e 20% (aos 90 dias).

A osmose pode ser definida como um fenômeno físico-químico que ocorre quando duas soluções aquosas, com concentrações diferentes, entram em contato através de uma membrana semipermeável. Esta força determina a movimentação de água de um lado mais diluído para um lado mais concentrado. A capacidade de absorção de um PSA, em termos gerais, depende das propriedades do polímero e do ambiente de exposição. Os principais parâmetros que podem influenciar, positiva ou negativamente, a capacidade de absorção são:

- a) o tipo de PSA: depende do método de polimerização (por solução ou por suspensão inversa), devido ao fato da geometria do PSA influenciar a taxa de troca de água com o ambiente (JENSEN, 2011);
- b) a densidade de grupos aniônicos do PSA: Schrofl *et al.* (2012) avaliaram diferentes tipos de PSAs e concluíram que polímeros com alta densidade de grupo aniônico absorveram o líquido rapidamente e liberaram grande parte dele nas primeira horas.

Contrariamente, o PSA com a densidade aniônica menor armazenou o líquido absorvido ao longo de todo o tempo do experimento;

- c) a densidade da estrutura reticulada do PSA: em princípio, o grau ou densidade de reticulação corresponde ao número de ligações químicas. O maior grau de reticulação indica menor distância entre duas ligações cruzadas (KLEMM; SIKORA, 2011). A densidade de reticulação da rede do polímero é controlada durante a produção do PSA. Um aumento da densidade pode levar a um aumento proporcional no módulo de cisalhamento e a uma redução na capacidade de absorção do polímero (JENSEN, 2011);
- d) o tamanho das partículas de PSA: Vários autores, dentre eles Esteves (2010) e Assmann (2013), pesquisaram esse efeito concluindo que, com o aumento do diâmetro da partícula, incrementa-se a absorção. No entanto, quanto menor for o tamanho de partícula, mais rápido é o processo de absorção. De acordo com Jensen e Hansen (2002), as partículas pequenas absorvem menos porque sua superfície é menos ativa que sua massa;
- e) a composição da solução de poros cimentícia (concentração iônica do líquido): segundo Schrofl *et al.* (2012), a absorção em soluções salinas, dos tipos de PSA estudados, foi muito fraca se comparada com água destilada. A razão é a seleção geral das cargas do PSA pelos íons dissolvidos, reduzindo assim a pressão osmótica que causa o inchamento. Já Esteves e Jensen (2012) encontraram que, até mesmo concentrações iônicas muito baixas, podem reduzir a absorção a um terço do valor medido em água destilada, à temperatura ambiente;
- f) a temperatura do sistema: estudos realizados por Esteves e Jensen (2012) concluíram que, em temperaturas mais baixas, a capacidade de absorção do polímero diminui.

Para o melhor entendimento do exposto anteriormente, a absorção de água “Q” de um polímero com ligações cruzadas pode ser expressa como uma função da densidade de reticulação de gel e na aproximação de uma solução diluída, a partir da teoria da elasticidade de Flory, por meio da Equação abaixo (CHEN *et al.*, 2004):

$$Q_{eq}^{5/3} = \left[ \left( \frac{i}{2 V_u S^{1/2}} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} - x_1 \right) / v_1 \right] / \left( \frac{v_e}{v_0} \right)$$

Onde o primeiro termo,  $i/(2VuS^{1/2})^2$ , indica a pressão osmótica; o segundo termo,  $(1/2 - x1)/v_1$ , indica apetência à água; e o denominador  $v_e/v_0$  indica a densidade de reticulação. Essa formulação mostra que, quanto maior for a concentração do lado de fora da solução, menor é a absorção do PSA. A determinação da absorção de água no meio cimentício pelo PSA é um tema ainda em investigação. Logo após a mistura do material cimentício e o PSA com água, desenvolvem-se altas concentrações iônicas que se mantêm mais ou menos constantes até o tempo de pega.

Segundo Jensen (2011), quando o PSA seco é exposto a este tipo de líquido, ele vai absorver tanto a água quimicamente pura, bem como algumas das substâncias dissolvidas presentes na solução aquosa, podendo até mesmo acumulá-las.

De acordo com Friedrich (2012), existe uma propriedade dos PSAs muito finos (tamanho de partículas inferior a 100  $\mu\text{m}$ ), chamada bloqueio de gel (gel bloking). Se os PSAs são postos em contato com água, em estado puro, pouca absorção ocorre na superfície e as partículas levemente inchadas ficam juntas. Se os PSAs finos incham como partículas individuais, é muito mais efetivo distribuí-los antes do inchamento, por exemplo, pré misturando-os com o cimento antes da mistura.

Segundo Assmann (2013), imediatamente após o PSA entrar em contato com a água, as partículas ficam unidas devido à absorção na superfície. Uma vez que as partículas são misturadas, elas não desagregam mais. O bloqueio de gel é um efeito desejado para a aplicação de material de PSA como vedação. As pesquisas mostram que 30 segundos de pré-mistura do PSA com o cimento seco é suficiente para impedir, com sucesso, o bloqueio de gel no concreto.

No decorrer da absorção de água pelo PSA, as cargas iônicas presentes no seu interior são diluídas, reduzindo a pressão osmótica e expandindo a rede polimérica até seu volume de equilíbrio. Então, as forças de reposição da rede polimérica e a pressão osmótica externa atuam se opondo à pressão osmótica interior, que vai diminuindo, assim como o inchamento do PSA (MANZANO *et al.*, 2014).

Quando a pasta de cimento autodesseca devido à hidratação, é gerado um gradiente de umidade relativa dentro do concreto e a água migra do PSA para a pasta (LURA *et al.*, 2007). Parte deste gradiente é estabelecido pela pressão capilar em desenvolvimento no fluido dos poros, como consequência do esvaziamento dos poros, devido à hidratação ou à secagem externa (LURA *et al.*, 2003). Uma contribuição adicional do desinchamento do polímero, pode ser a pressão osmótica, devido ao fato da composição da solução de poros na pasta de cimento a partir da pega, ser diferente daquela solução absorvida no PSA inicialmente.

O processo de dessorção do polímero pode ser descrito como uma competição pela água entre o PSA e a pasta de cimento (MONNIG, 2009). Assim, na hidratação do cimento, a pressão osmótica externa se torna maior, gerando um fluxo de água para fora do PSA, desinchando-o. Quando a umidade relativa (UR) do PSA é maior do que a UR da pasta, a água migra do PSA para o material cimentício.

Lura *et al.* (2012), quando as partículas secas de PSA entram em contato com a água, durante a mistura do concreto, elas rapidamente a absorvem e formam cavidades cheias de água. A cinética de absorção e a quantidade de líquido absorvido pelo PSA depende tanto da natureza do PSA, quanto da pasta de cimento ou concreto, em especial sobre a composição da solução de poros. Uma vez que o PSA tenha atingido o seu tamanho final, formam-se inclusões estáveis ligadas por forças de Van der Waals, cuja água é subsequentemente liberada para os poros capilares da vizinhança e consumida pela hidratação do cimento.

A distribuição do tamanho das partículas e a absorção de água dos polímeros determinam a porosidade, a conectividade e a durabilidade de um concreto com a adição de PSA. Para concretos com baixa relação a/c, os poros capilares podem ser substituídos por vazios formados pelos polímeros saturados. A dispersão e tamanho desses vazios podem ser estimados pelas propriedades do PSA (MONNIG, 2009).

Wang *et al.* (2015) estudaram o efeito de diversos fatores potenciais sobre o comportamento de dessorção de polímeros superabsorventes saturados no concreto, por meio da simulação com diferentes soluções sintéticas da concentração salina interna, a alcalinidade e a umidade relativa. Eles descreveram o mecanismo de dessorção do PSA em 3 estágios. Como o PSA inchado está em contato direta e completamente com a pasta de cimento fresco numa idade precoce, a pressão osmótica atua e a água é liberada, a partir do PSA, numa velocidade relativamente rápida (Estágio I). Após 7 horas de hidratação, a concentração iônica total aumentou drasticamente, o que foi benéfico para o processo osmótico.

Deste modo, a duração da fase I seria de aproximadamente 12 horas. Ao mesmo tempo, a umidade interna de concreto ainda se situa num nível elevado ( $> 90\%$  de UR) e a força do gradiente de umidade ainda é muito fraca. Como resultado, a dessorção do PSA se transformaria numa fase fraca (Estágio II). A duração desta etapa está relacionada com a dosagem de PSA e as condições ambientais, como por exemplo, a umidade. Quando a dosagem de polímero ou a umidade do ambiente é baixa, a duração desta etapa é conseqüentemente curta. Com a redução de umidade relativa interna (URI) do concreto, o gradiente de umidade entre a pasta de cimento e a cavidade cheia de vapor começa desempenhar um papel importante. A dessorção do PSA é

acelerada novamente e assim retardaria a redução da URI do concreto (Estágio III) (WANG *et al.*, 2015).

Porém, a anterior abordagem não está em concordância com a sensibilidade dos PSAs às mudanças da UR. Segundo ensaios que determinaram as isotermas de adsorção e dessorção de um PSA (JENSEN, 2013) pode-se concluir que 99% da massa de água absorvida pelo polímero foi liberada quando a UR cai para 95%. Mais estudos sobre esses fenômenos são necessários para esclarecer a cinética de dessorção dos PSAs.

Schrofl, Mechtcherine e Gorges (2012) encontraram que a cinética de liberação de líquido ou do seu armazenamento no PSA, como observado nos ensaios de absorção, pode ser bem reconhecida como uma tendência das deformações autógenas dos materiais cimentícios. No entanto, uma compreensão completa do processo de dessorção do PSA, incluindo a determinação da distância de transporte de água na pasta de cimento em endurecimento, ainda precisa ser melhor estudada.

Com o intuito de esclarecer o comportamento da água de cura interna incorporada pelo PSA em um material cimentício de alta resistência, propõe-se um modelo esquemático do mecanismo de atuação do polímero. O modelo proposto toma como referência os conceitos da evolução da microestrutura ao longo do tempo de um concreto com baixa relação a/c (VERNET; CADORET, 1992), associados aos três estágios de hidratação do método da curva calorimétrica (TAYLOR, 1997) e também os resultados da caracterização do PSA utilizado no trabalho de Manzano *et al.* (2015).

Oliveira *et al.* (2005) realizaram ensaios de caracterização térmica TGA, as análises foram executadas em amostra umedecida e obtiveram com essa análise os valores de temperatura de desidratação, assim como a porcentagem de resíduos e teor de água dos PSA analisados. Como resultado foi encontrado 84,9% de água, a uma temperatura de desidratação entre 55 e 225°C e com uma sobra de 8,86% de resíduos.

Ribeiro (2012) ao elevar a temperatura a 180°C, a uma taxa de 10°C/min, observou uma pequena perda de massa, em torno de 15% da massa total, possivelmente devido à presença de água na estrutura do PSA. Segundo essa autora, a cadeia polimérica é degradada a uma temperatura em torno de 410°C.

Lopes (2007) ao fazer esta análise verificou que a primeira etapa de degradação térmica do PSA ocorreu entre 25°C a 100°C, levando a uma perda em torno de 2 a 5% de massa. A segunda etapa teve início à aproximadamente 200°C. Nessa etapa apresentou uma temperatura de decomposição máxima a 288°C. A terceira etapa de degradação térmica foi observada entre 375°C e 500°C, com uma temperatura de decomposição máxima a 430°C. Dessa forma em sua

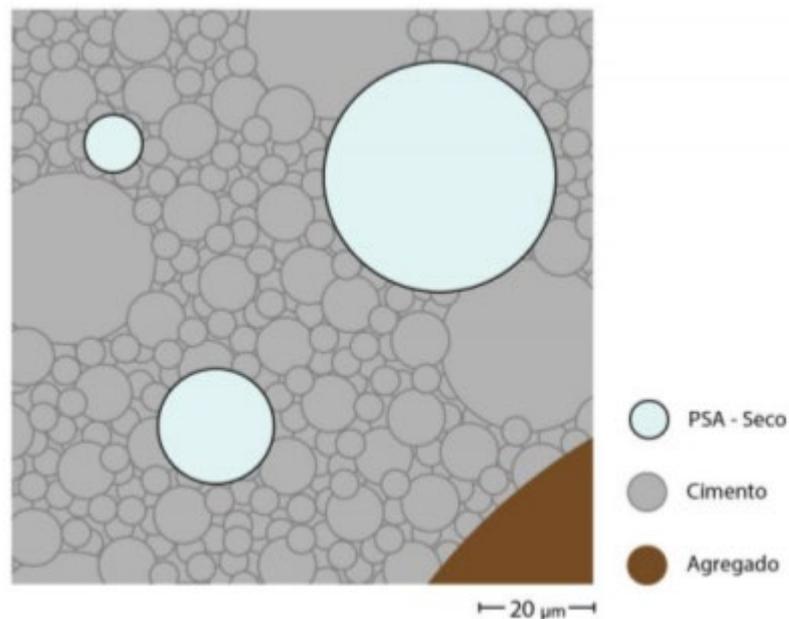
análise de TGA do PSA verificou que a primeira etapa de decomposição térmica foi até 250°C, segundo o autor seria referente à perda de umidade. A segunda etapa iniciou a 250°C e terminou a 408°C, onde foi verificada uma perda de massa de 70%, possivelmente refere-se à degradação do PSA. Nessa etapa, a temperatura máxima de decomposição foi a 366°C. A última etapa de decomposição térmica iniciou a 428°C com a temperatura de decomposição máxima a 440°C.

Brito *et al.* (2013) utilizaram a técnica de FTIR para fazer a caracterização do PSA objetivando a verificação das capacidades de intumescimento dos mesmos. Com isso verificaram a maior eficiência na absorção do PSA sintetizado (adicionando metilenobisacrilamida) na absorção de água.

Wang e Wang (2010) caracterizaram a estrutura e a morfologia do PSA por FTIR. Os autores verificaram, além disso, que a cinética de inchaço e a sensibilidade as soluções com variações de pH são determinantes para a quantidade absorvida. Bajpai e Giri (2003) também verificaram por FTIR, ao estudar o PSA, que a liberação do líquido absorvido é fortemente dependente da estrutura química do PSA, do pH e da temperatura de intumescimento.

Com o objetivo de evitar o bloqueio de gel, assume-se que o polímero foi adicionado seco e que foi realizada uma pré-mistura dos materiais, assim, são observadas três partículas de polímero de diferentes diâmetros (10 µm, 20 µm e 40 µm) homogeneamente distribuídas. A relação  $a/c_{básica}$  do concreto foi 0,30, seguindo as recomendações do modelo de Powers adicionou-se água de cura interna para eliminar a autodessecação ( $a/c_i = 0,054$ ), para uma relação  $a/c_{total}$  de 0,354. Dado que a absorção do PSA no meio cimentício foi 15 g<sub>água</sub>/gPSA, o teor de polímero utilizado foi 0,36% em massa do cimento (Figura 18).

Figura 18: Imagem com uma seção de materiais secos misturados, antes da adição da água.

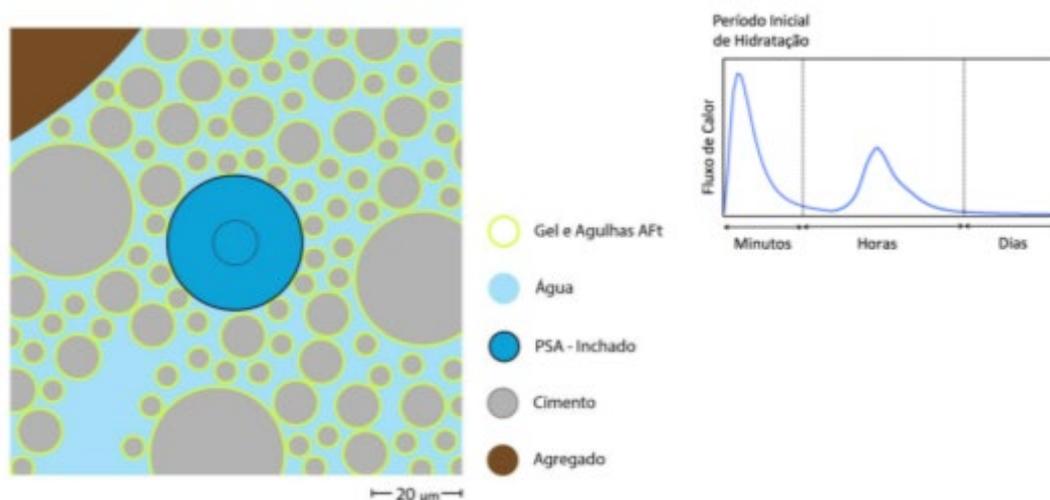


Fonte: Manzano *et al.* (2015).

Além disso, foi tomado como referência um modelo de simulação computacional de hidratação e microestrutura desenvolvido por Dai e Ji (2013). Na Figura 19 é apresentada uma seção quadrada, com dimensões de  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ , que mostra os materiais secos (cimento, agregados e PSA) de um concreto, antes da adição da água. O modelo esquemático pode ser aplicado para cimento Portland puro. Para simplificar a sua apresentação a forma das partículas do cimento foi adotada como esférica. O PSA escolhido foi produzido por polimerização por suspensão inversa e possui uma distribuição granulométrica contínua (MANZANO *et al.*, 2015).

Destaca-se ainda que Na Figura 19 é apresentado o concreto após os primeiros minutos da adição da água (de mistura e de cura). Nesse período inicial de hidratação apresenta-se o primeiro pico da evolução do calor de hidratação. A principal reação responsável deste pico é a dissolução do Aluminato Tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e do Sulfato de Cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), formando Etringita (AFt). Passados 10 minutos, um gel amorfo rico em Alumina e Silicato é formado ao redor da superfície dos grãos de cimento. Este gel é o responsável pelo período, de algumas horas com taxa de hidratação baixa e umidade relativa de 100%, também conhecido como dormente.

Figura 19: Imagem da microestrutura de um concreto de alta resistência ( $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ), no período de hidratação inicial (minutos após da adição da água).



Fonte: Manzano *et al.* (2015).

É importante notar que a absorção do PSA em água destilada é aproximadamente  $100\ \text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{PSA}}$ , porém, a dissolução das partículas de cimento gera uma alta concentração iônica no fluido de poros ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e um elevado ambiente alcalino ( $\text{pH} > 12$ ), o que causa uma diminuição da pressão osmótica, reduzindo a capacidade de absorção do polímero uns 85% ( $15\ \text{g}_{\text{água}}/\text{g}_{\text{PSA}}$ ). Para uma melhor interpretação do efeito do PSA e devido

a sua rápida absorção, uma partícula de polímero com diâmetro seco de 10  $\mu\text{m}$  é isolada e analisada. O diâmetro inchado dessa partícula foi calculado usando a Equação abaixo (REINHARDT *et al.*, 2008).

$$D_{\text{Inch}} = D_{\text{Seco}} \sqrt[3]{\frac{\rho_S}{\rho_I} (1 + \chi)}$$

Onde:

$D_{\text{Seco}}$  é o diâmetro seco da partícula (10  $\mu\text{m}$ ),

$\rho_S$  é a massa específica do polímero seco (1,46 g/ml),

$\rho_I$  é a massa específica do PSA inchado (1,03 g/ml) e,

$\chi$  é a capacidade de absorção no meio cimentício.

Assim, o diâmetro inchado ( $D_{\text{Inch}}$ ) da partícula de PSA foi 28  $\mu\text{m}$ .

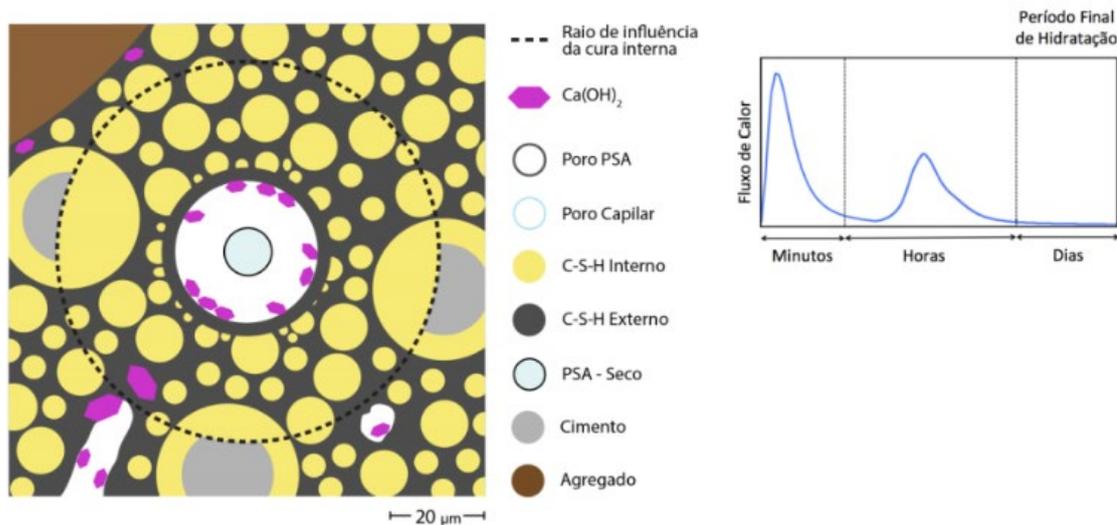
Neste período toma importância o estudo do efeito do PSA nas propriedades reológicas do concreto, dado que o polímero se comporta como um agregado miúdo na mistura. Por outro lado, uma propriedade fundamental dos PSAs é sua composição química e, portanto, a sua estabilidade no ambiente alcalino, dado que se o polímero for do tipo não retentivo, libera água no período dormente antes da autodessecação acontecer, o que não é recomendável para o uso destes como agentes mitigadores da retração autógena. Essa água pode ser considerada como livre e não como de cura interna.

Ao utilizar a técnica de MEV Cabiros, Mahammad, e Zohuriaan (2004) e Wu, Johannesson, e Geiker (2012), verificaram que a parte interna da amostra de PSA tinha uma estrutura porosa. Muitos poros pequenos e uniformes, e poros interconectados foram observados. Esses poros são as regiões de permeação de água, onde a água é facilmente difundida. Havia também grandes poros, o que aumentou a capacidade de absorção de água e percentual de inchamento do PSA. Também Lopes *et al* (2007) verificaram através do MEV que o PSA é constituído por partículas de diferentes tamanhos e formas. Essas partículas podem ser porosas ou densas, onde a quantidade de partículas porosas parece influenciar a capacidade de absorção do PSA.

Após dias, o processo de endurecimento continua e apresenta-se o período final da hidratação (Figura 20). Nele os produtos de hidratação formam uma camada densa em torno aos grãos que age como uma barreira para a difusão de íons, diminuindo a taxa de reação. Assim, a hidratação é controlada pela velocidade de difusão dos íons através da camada de

hidratos, onde é formado o C-S-H interno. Toda a água é consumida nas reações e é formada a porosidade capilar do concreto. Devido à baixa relação a/c, que impossibilitou a hidratação completa, podem ser observadas partículas de cimento anidro na pasta.

Figura 20: Imagem da microestrutura do concreto, no período final de hidratação (dias após da adição da água).



Fonte: Manzano *et al.* (2015).

Após a total liberação da água do PSA foi criado um poro capilar esférico de 28 μm de diâmetro. Observa-se que existe um raio de influência da cura interna ( $\Delta r$ ) a partir da partícula de polímero, onde foi mitigada a autodessecação da matriz cimentícia. Para o cálculo desse parâmetro foi utilizada a Equação abaixo (MONNIG, 2009), sendo que foram assumidas algumas hipóteses simplificadoras: toda a água absorvida pelo PSA estava disponível para cura interna e as mudanças da permeabilidade no tempo e da distribuição de poros da pasta foram desconsideradas.

$$\Delta r = R_1 \left[ \left( \sqrt[3]{\frac{100}{V_{CS}} + 1} \right) - 1 \right]$$

Onde:

$R_1$  é o raio de polímero inchado (14 μm) e  $V_{CS}$  é a retração química em porcentagem para uma pasta com relação a/c de 0,30 segundo o modelo de Powers (5,4%).

Dessa maneira foi encontrada a distância de influência do PSA ( $\Delta r$ ) como 24 μm, marcada na Figura 20 com uma linha tracejada (diâmetro total foi de 76 μm). Essa distância é um parâmetro crítico para a eficiência da cura interna. É importante ressaltar dois efeitos da

incorporação de água de cura interna pelo PSA na microestrutura da matriz cimentícia, apontados pela literatura técnica. Primeiro nota-se o aumento da hidratação no raio de influência da partícula de PSA, ou seja, é promovida a densificação da microestrutura mudando a distribuição de poros (KLEMM; SIKORA, 2013).

Por fim, a porosidade total é incrementada pelos vazios deixados após o desinchamento das partículas de PSA (SNOECK; DE BELIE, 2013). Tal fato pode causar a redução das propriedades mecânicas e elásticas do material cimentício de alta resistência. Embora a microestrutura densa e refinada da pasta possa restringir a formação das fases hidratadas, os vazios deixados pelo PSA promovem a formação de produtos de hidratação como o hidróxido de cálcio, esse efeito pode ser benéfico quando utilizadas adições minerais pozolânicas.

Manzano (2016) verificou que a distribuição do tamanho das partículas do PSA D ( $DS > DC > DN$ ) exibe um efeito considerável sobre os valores da viscosidade plástica. Sob a hipótese de que as partículas de PSA, devido a sua baixa percentagem, não têm qualquer efeito significativo sobre a viscosidade, pode concluir-se que para a mesma dosagem de PSA D, as partículas menores absorvem, nos primeiros 10 min, toda a água extra para a cura interna, mas também alguma parte da água de mistura. O incremento no valor da tensão de escoamento na mistura contendo as maiores partículas de PSA D foi causado pela contínua absorção do polímero ao longo do tempo.

Manzano (2016) em seu estudo verificou que os PSAs polimerizados por gel apresentaram maiores valores de absorção no meio cimentício, o mesmo comportamento foi encontrado para a absorção em meio aquoso, o que constata que o método de produção tem uma grande influência nessa propriedade.

A redução média da capacidade de absorção de água do PSA A, PSA C e PSA D, foi de 85,8%. Esse comportamento foi ocasionado pela composição da solução cimentícia de poros, já que possui maior concentração iônica que a água destilada, prejudicando o principal mecanismo de transporte de líquido para o PSA, a pressão osmótica. Essa diminuição foi mais acentuada no PSA B (95,6%).

Schrofl, Mechtcherine e Gorges (2012) estudaram a absorção do PSA B numa solução sintética de poros de cimento e encontraram que o polímero alcança a absorção máxima (30 gfluido/gPSA) após 10 minutos do contato com o fluido. Em seguida, o PSA sofre uma diminuição nos valores de absorção (dessorção) até atingir um valor de equilíbrio (5 gfluido/gPSA), decorridos 180 minutos. Esse comportamento pode explicar a queda acentuada da absorção no meio cimentício do PSA B.

O estudo de Barth (2021) foca na influência de diversos fatores na absorção de um agente de cura em concretos, destacando a relevância do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade de solução. O modelo desenvolvido para absorção em soluções de  $\text{CaCl}_2$  correlaciona-se fortemente com a absorção em água do sistema de abastecimento público. O estudo ressalta a necessidade de ajustar a estimativa de absorção para otimizar a pré-hidratação do agente de cura, visando aplicações industriais. A absorção da fibra celulósica, no entanto, mostrou-se independente dessas variáveis.

A pesquisa também aborda a determinação do consumo do agente de cura, dependente do consumo de cimento e da absorção do agente. A soma da absorção isolada de seus constituintes surgiu como um método potencialmente aplicável. A determinação do consumo do agente de cura, feita através de equações específicas, mostrou-se facilmente reprodutível, mas a quantidade de água para pré-hidratação requer atenção especial.

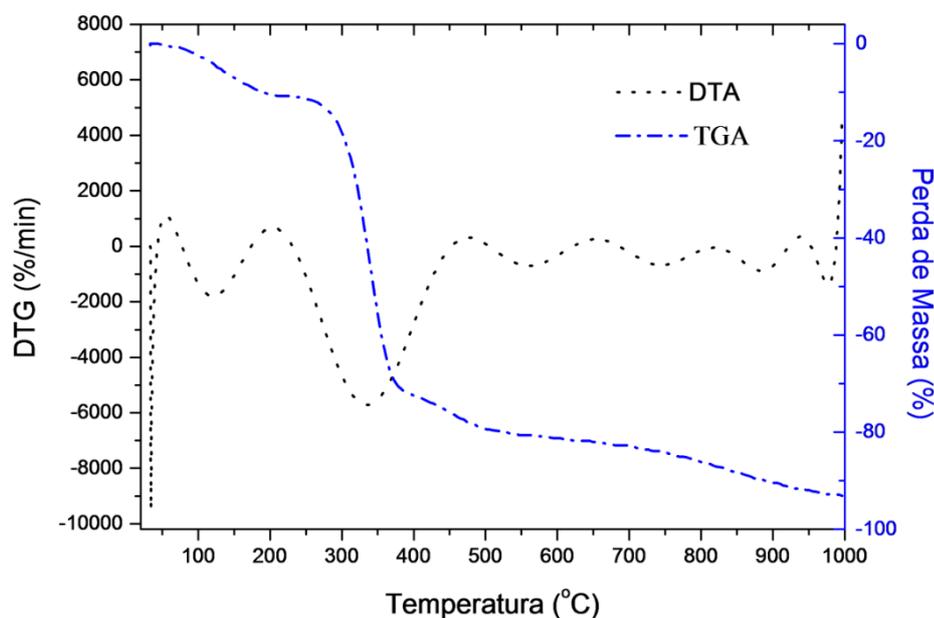
### 2.6.1 Fibra Celulósica

Como citado anteriormente, o material de PSAR utilizado no presente trabalho contém ainda uma fração elevada composta por fibras celulósicas. Este material não tem uma capacidade elevada de absorção de água, e acredita-se, de forma preliminar, que a variação em seu teor pode ser responsável pela grande variação das características de absorção apresentada em alguns casos pelo material residual. Por outro lado, estas fibras podem auxiliar no ganho de resistência à tração e no combate à retração, diminuindo assim a fissuração em materiais cimentícios.

O mesmo material, utilizado por Koppe (2016), possui cerca de 70% de fibras celulósicas, 10% de PSA, 20% de umidade e outros materiais em pouquíssimas quantidades, como polietileno de baixa densidade, polipropileno entre outros elementos (GOMES, 2014).

Gomes (2014) analisou a presença destes materiais através de análise termogravimétrica a seguir, onde é possível observar que nas primeiras temperaturas, de 54°C à 203°C, ocorre uma decomposição do material. Esse fator está relacionado pela presença de umidade, voláteis e de materiais de baixo peso molecular. Mais adiante ocorre uma diminuição de 70% da massa, como visto na figura 21, essa queda é devido a decomposição da fibra de celulose, a temperatura que ocorreu está entre 203°C e 400°C. Em seguida ocorre mais uma queda de massa de aproximadamente 10% que está relacionada com a presença do PSA, a faixa de decomposição é de 400°C à 500°C. O restante do material de 4,07% são aditivos inorgânicos

Figura 21: TGA do polímero superabsorvente residual (PSAR).



Mohamed, Ghorbel e Wardeh (2010) apresentam que as fibras de celulose podem aumentar em até 21% a resistência à tração, o que pode contribuir ainda mais para a diminuição de fissuras, já que estas fibras iriam restringir a propagação das aberturas.

Mehta e Monteiro (2014) explicam que, de modo geral, adicionando fibras à matriz cimentícia, o concreto perde trabalhabilidade, pois este material acaba criando restrições, e desta forma os agregados não conseguem se mover tão facilmente dentro do concreto no estado fresco. Por outro lado, Koppe (2016) observou que o PSAR pode ter efeito plastificante, mesmo com estas fibras de celulose. Esta característica está relacionada aos demais polímeros superabsorventes, que possuem características de melhorar a coesão do concreto. Outros pesquisadores como: Bentz e Stutzman (2008), Cussone e Hoogeveen (2008) Mechtcherine e Reinhardt (2012) e Jensen (2014) relatam as mesmas características com a adição do material polimérico, em que o PSA melhora sua trabalhabilidade. Por outro lado, Mechtcherine e Reinhardt (2012) não encontraram estes efeitos, mesmo comparando com o mesmo traço do concreto sem a presença do PSA.

Adicionando fibra de polipropileno em argamassa de revestimento Silva *et al.* (2003), verificaram que proporciona uma melhoria em suas propriedades, quanto a durabilidade, aumento da vida útil, além de reduzir a fissuração do revestimento durante o processo de aplicação. Segundo Monte, Barros e Figueiredo (2012) há consenso de que o uso de fibras de polipropileno melhora a tenacidade das argamassas e, com isso, pode haver um aumento na capacidade dos revestimentos de reduzir o seu potencial de fissuração. Ao se diminuir o

potencial de fissuração, o risco de desprendimento dos revestimentos é minimizado o que pode aumentar a segurança ao uso da edificação.

Conforme Gomes e Ferreira (2005) concluíram que a adição de fibras de poliamida aumentara a resistência de aderência das argamassas de revestimento, sendo os resultados atribuídos principalmente ao reforço das fibras nas primeiras idades do composto, melhor distribuição das tensões durante a execução dos ensaios e atuação do copolímero na zona de transição interfacial entre a fibra e a matriz.

## **2.7 Métodos de ensaios de retração**

Existem diversos métodos para determinar diferentes formas de retração, entretanto alguns ensaios aparentemente demonstram-se mais condizentes com a realidade ou menos agressivos aos corpos de prova, diminuindo riscos de alteração dos resultados. Neste item, são descritos resumidamente alguns métodos selecionados, visando o desenvolvimento do trabalho experimental.

### **2.7.1 Retração plástica**

A fim de estudar a retração do concreto no estado fresco, Giroto, Barbosa e Maciel (2014) realizaram um estudo de um modelo proposto por Turcry (2004), para isso foram acoplados sensores do tipo LVDT nas extremidades de uma amostra com dimensões de 75x75x305 mm. Também foi feita medições na face exposta e em contato com o ar, além de um sensor interno para se medir a temperatura. Os sensores LVDT são capazes de medir a retração numa altíssima precisão, são compostos por pequenas molas que realizam uma pressão mínima para que não haja uma interferência direta na amostra.

Apesar de não ser normalizado ainda, o ensaio de retração plástica vem sendo utilizado por pesquisadores a fim de se obter estes resultados. O modelo adaptado de Turcry (2004) por Giroto, Barbosa e Maciel, (2014) demonstra grande potencialidade e resultados muito satisfatórios nos diferentes estudos realizados. Não foram encontrados outros tipos de ensaios similares que meçam aspectos encontrados no modelo de Giroto, Barbosa e Maciel, (2014).

Vários pesquisadores apresentaram resultados consistentes, comprovando a eficácia da cura interna utilizando polímeros superabsorventes na redução da retração autógena do concreto, com relação às misturas de referência. Pereira e Matos (2011) obtiveram reduções na retração autógena de 92%, 71% e 40%, aos 3, 7 e 28 dias de idade, respectivamente, para um

teor de PSA de 0,3% da massa do cimento. Claro e Saraiva (2012) e Traldi e Aguirre (2013) apresentaram resultados semelhantes, com reduções de 91%, aos 3 dias de idade, para teores de PSA de 0,3% e 0,6% da massa do cimento e reduções de 84% e 92%, para cada teor de PSA, depois dos 7 dias de idade.

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

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

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

### 2.7.2 Retração livre

Um ensaio muito utilizado para medir os efeitos da retração por secagem é o ASTM C157, esta norma americana consiste, basicamente, em medir corpos de prova em suas extremidades ao longo do tempo. Os corpos de prova possuem dimensões de 75 x 75 x 285 mm e em suas extremidades são fixados pinos para que não ocorra variações que não são do concreto. Na ASTM C157 é realizado um comparativo das medidas realizadas no corpo de

prova com a medida padrão, para isso há um instrumento com tamanho conhecido em que toda vez que é feita uma medição o resto do equipamento deve ser calibrado.

O corpo de prova é inserido em um aparelho capaz de registrar diferenças de comprimento. Após a calibragem a amostra é inserido e o relógio, que pode ser digital, demonstra a diferença de comprimento.

Este método, também utilizado no presente trabalho, é descrito em maior detalhe no item 3.4.3.

### 2.7.3 Retração restringida

Uma outra forma de se medir a retração é em seu estado restringido, ou seja, que exista um elemento capaz de restringir ou direcionar os movimentos de fissuração. De forma aplicada na prática, são a união entre os elementos estruturais como vigas em pilares que podem criar este tipo de restrição.

Nos Estados Unidos possui duas normas que podem ser utilizadas para realizar este tipo de ensaio, AASHTO PP 34-99 (2005) e ASTM C1581/1581M (2009). Ambos são muito similares e foram baseados no estudo de Coutinho (1954), este autor foi o pioneiro para a utilizar este ensaio a fim de se obter dados sobre a retração por secagem.

A AASHTO PP 34-99 (2005), consiste em dois anéis, um com diâmetro de 457 mm (medida interna) e um outro anel com diâmetro de 305 mm (medida externa), este anel deve possuir uma parede de 12,5 mm. São acoplados quatro extensômetros elétricos na parte interna do anel menor, eles são equidistantes e para a aplicação deles é necessário que o local a ser colado deve estar totalmente liso para que a rugosidade da parede do anel não interfira nos resultados desta forma recomenda-se lixar. Estes sensores são ligados em um equipamento de aquisição de dados, para analisar quantitativamente os esforços criados pelo concreto.

O concreto é inserido entre estes dois anéis, em uma base plana. Passado 24 horas, o anel exterior é removido, neste momento se inicia a aquisição de dados captados pelos extensômetros. É realizado diariamente um acompanhamento para poder mapear e quantificar as fissuras.

Senisse (2010) utilizou a norma AASHTO em seu trabalho, mas teve que fazer algumas adaptações, como o anel exterior a autora teve que usar de PVC. Este material apesar de ser apenas para auxiliar na moldagem dos corpos de prova, pode dificultar a sua própria saída, que deverá ser retirado por cima e assim comprometendo o ensaio. Entretanto ela relatou bons resultados em sua pesquisa, e não demonstrou em seu trabalho que a utilização de forma de PVC interferiu diretamente em seus resultados.

Por outro lado, o método proposto pela norma ASTM C1581/1581M (2009) possui poucas diferenças, o diâmetro externo é de 405 mm e interno de 330 mm com parede de 13 mm. A amostra produzida pela AASHTO PP 33-99 tenha uma largura de 76 mm, já a ASTM a largura da amostra é de 37,5 mm. Esta diferença faz com que na ASTM apareça mais rápido as fissuras, o que agiliza a obtenção dos resultados (KRISTIAWAN, 2013).

Na norma americana ASTM também possui uma tabela onde é possível saber quantitativamente, o potencial de fissuração do concreto ensaiado como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2: Potencial de fissuração.

Net Time-to-Cracking $t_{cr}$	Average Stress Rate, S (Mpa/day)	Average Stress Rate, S (psi/day)	Potential for Cracking
$0 < t_{cr} \leq 7$	$S \geq 0.34$	$S \geq 50$	High
$7 < t_{cr} \leq 14$	$0.17 \leq S < 0.34$	$25 \leq S < 50$	Moderate-High
$14 < t_{cr} \leq 28$	$0.10 \leq S < 0.17$	$15 \leq S < 25$	Moderate-Low
$t_{cr} > 28$	$S < 0.10$	$S < 15$	Low

Fonte: C1581/1581M (ASTM, 2016).

A retração nas idades iniciais pode ser originada por diferentes fatores, como a evaporação de água para o ambiente externo, as variações de temperatura externas, as reações iniciais de hidratação do cimento e/ou pelo calor gerado por estas reações químicas. A definição exata do momento em que ocorre a retração nas primeiras idades do concreto e a sua intensidade são extremamente variáveis, uma vez que existe uma grande variedade de materiais, os quais constituem o traço do concreto. Entretanto, ela pode ser definida como sendo a retração que ocorre no período das primeiras 24h após a moldagem do material, desde o momento em que o concreto está iniciando o seu processo de endurecimento de acordo com Senisse (2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Ensaios piloto

Visando a continuação dos trabalhos realizados anteriormente por Gomes (2014) e Koppe (2016), foi realizado um programa experimental para analisar o comportamento do material em concretos. Nos trabalhos anteriores, foram realizados ensaios de caracterização do material e também na aplicação em argamassas, e seus resultados foram muito promissores. A ideia inicial era medir a retração livre, retração plástica e resistência a compressão do concreto com e sem o PSAR, utilizando um traço próximo ao utilizado em concreteiras da região.

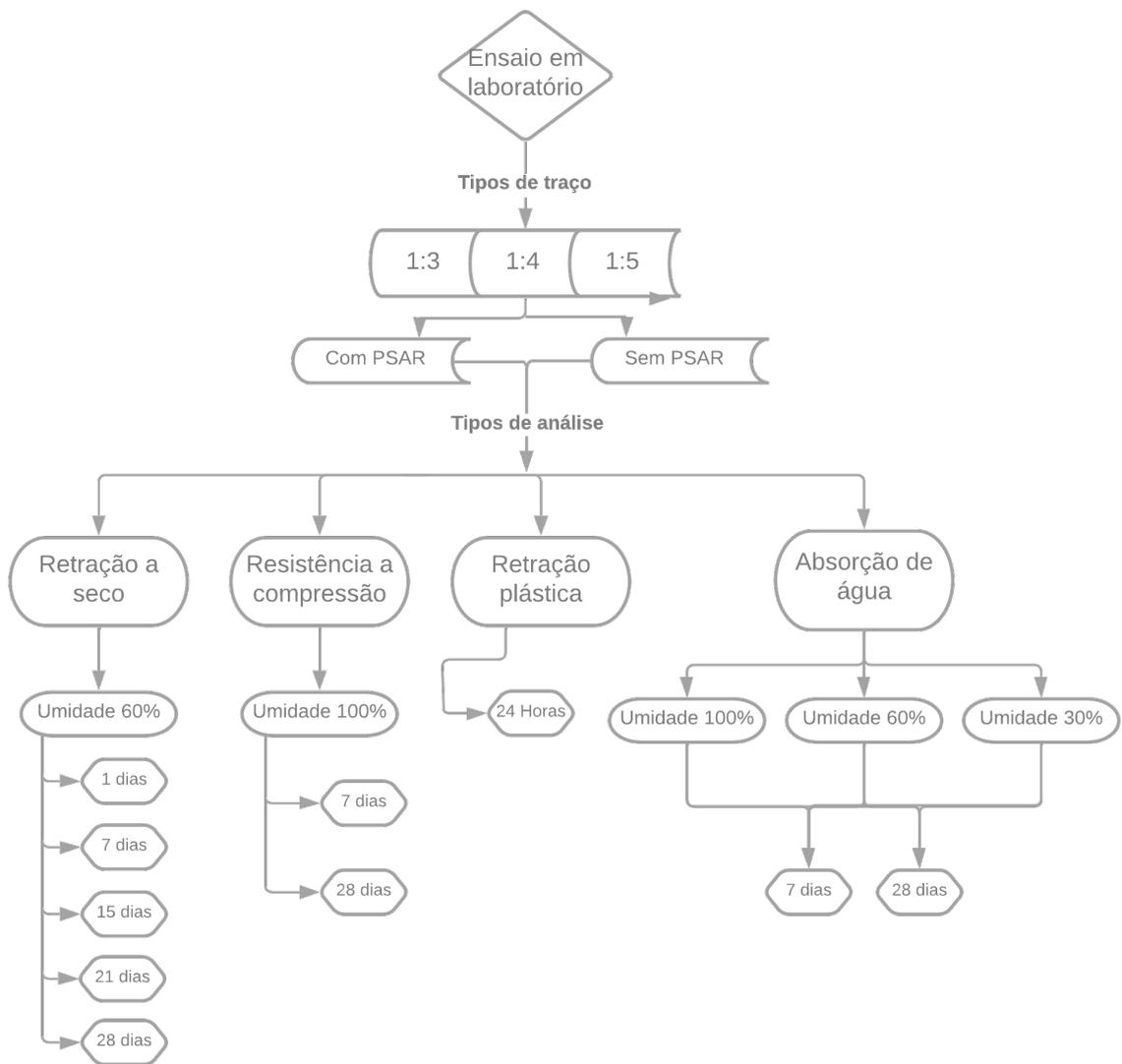
Porém, assim que iniciou as concretagens, observou-se que para um mesmo traço em duas betonadas diferentes, para que fosse possível manter a mesma consistência (medida através do ensaio de abatimento, ou *slump*) foi necessário adicionar uma quantidade de água muito diferente em cada mistura. Em alguns casos, no momento da adição de água no PSAR, aparentemente o material não havia absorvido completamente a água, e acredita-se que essas amostras foram responsáveis por causar esta grande diferença de adição de água no concreto.

A partir desta heterogeneidade do material, foi necessário ampliar os estudos em concretos com a adição de PSAR, e foram feitos diversos testes a fim de encontrar uma forma de homogeneizar o material antes do uso. Após diversas tentativas (como, por exemplo, misturar mecanicamente o polímero com água, misturar e ir adicionado lentamente água, deixar absorvendo por 24 horas, absorver por mais tempo), a melhor forma para realizar a pré-molhagem e obter uma boa homogeneização foi deixando o PSAR absorver em um recipiente vedado por uma semana. Após a incorporação do material no concreto, foi possível observar que se obteve uma maior linearidade na quantidade de água a ser adicionada. Os resultados deste estudo preliminar são apresentados no Anexo A.

#### 3.2 Planejamento dos experimentos

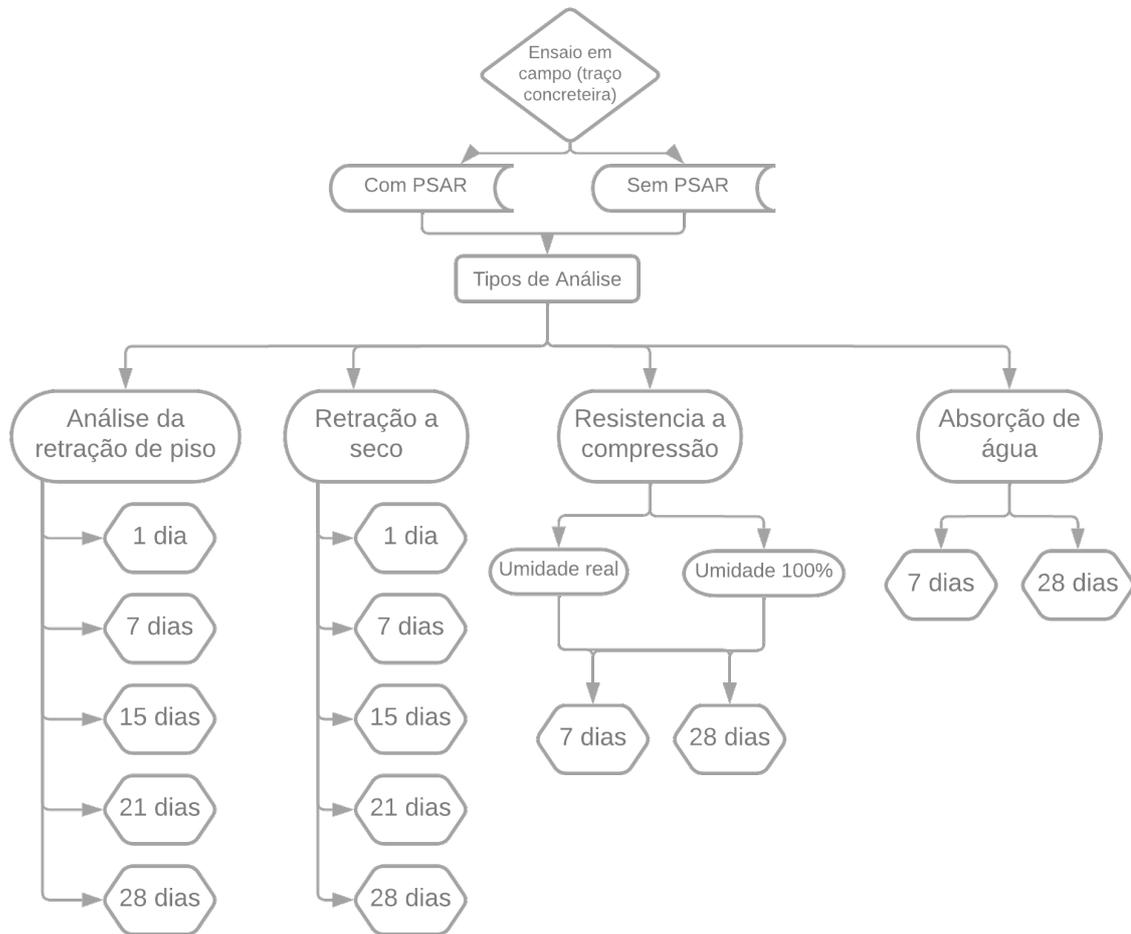
A seguir é apresentado o planejamento do programa experimental desta pesquisa, com os fatores de controle e variáveis de resposta. As figuras 22 e 23 apresentam fluxogramas do programa experimental e dos ensaios realizados, em laboratório e em escala real:

Figura 22: Fluxograma dos ensaios em laboratório.



Fonte: Autor.

Figura 23: Fluxograma dos ensaios em campo.



Fonte: Autor.

### 3.2.1 Fatores de controle

Na tabela 3 são apresentados os fatores de controle e os níveis de estudo adotados neste trabalho, nos ensaios de laboratório.

Tabela 3: Fatores de controle e níveis de estudo.

Fatores de Controle	Níveis de estudo
Traços	1:3, 1:4 e 1:5
Condições de cura (%)	30%, 60% e 100%
Adição do polímero	Sim/Não

Fonte: Autor.

Para os ensaios de retração livre, por secagem, foi adotada uma condição de exposição com 60% de umidade relativa, e as medições foram realizadas nas idades de 1, 7, 15, 21 e 28 dias. Por ser um ensaio não destrutivo e por necessitar que as mesmas amostras sejam

analisadas, foram utilizados 3 corpos de prova para cada traço. O ensaio de retração plástica foi medido ao longo das primeiras 24 horas também em uma sala com temperatura de 20°C e umidade controlada de 60%. A absorção por capilaridade foi realizada conforme norma de RILEM TC 116 PCD e foi feito as medições nas idades de 7 e 28 dias com 3 condições de cura sendo 100% de umidade 60% e 30%, os corpos de prova possuíam dimensões de 60 x 60 x 180 mm, para este ensaio foram retiradas 3 fatias da parte central, com uma largura de 50 mm aproximadamente. Mais detalhes sobre os métodos adotados são apresentados no item 3.4.

Para a realização do programa experimental em campo (item 3.4.6), foi adotado um traço comumente utilizado pela concreteiras para pisos, a única intervenção foi a adição de PSAR em um dos traços. Não foi utilizado nenhum tipo de aditivo plastificante, para que não alterasse a consistência do concreto, a fim de avaliar também a propriedade plastificante do próprio material. Foram concretados dois pisos com 12,5 m<sup>2</sup>, onde houve um monitoramento da fissuração nas idades de 1, 7, 15, 21 e 28 dias. Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, ensaios de retração livre por secagem nas idades de 1, 7, 15, 21 e 28 dias, e ensaios de absorção de água nas idades de 7 e 28 dias. Não foi possível a realização do ensaio de retração plástica, devido ao local onde estava sendo realizado o estudo, que ficava a uma distância elevada do laboratório.

Nesta etapa do estudo, foram adotados os seguintes fatores, com apenas um nível de estudo:

- a) Tipo de cimento – CP-II-F-40;
- b) PSAR – Proveniente do mesmo lote;
- c) Agregado miúdo natural;
- d) Agregado miúdo artificial (areia de britagem);
- e) Agregado graúdo natural.

### 3.2.2 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta são para este trabalho:

- a) Resistência a compressão;
- b) Retração livre;
- c) Retração plástica;
- d) Absorção de água.

### 3.3 Materiais

Os materiais a utilizados neste trabalho são da mesma origem de trabalhos anteriores, de Gomes (2014) e Koppe (2016), apenas de lotes diferentes, com exceção do polímero superabsorvente residual que é o mesmo utilizado nestes dois trabalhos.

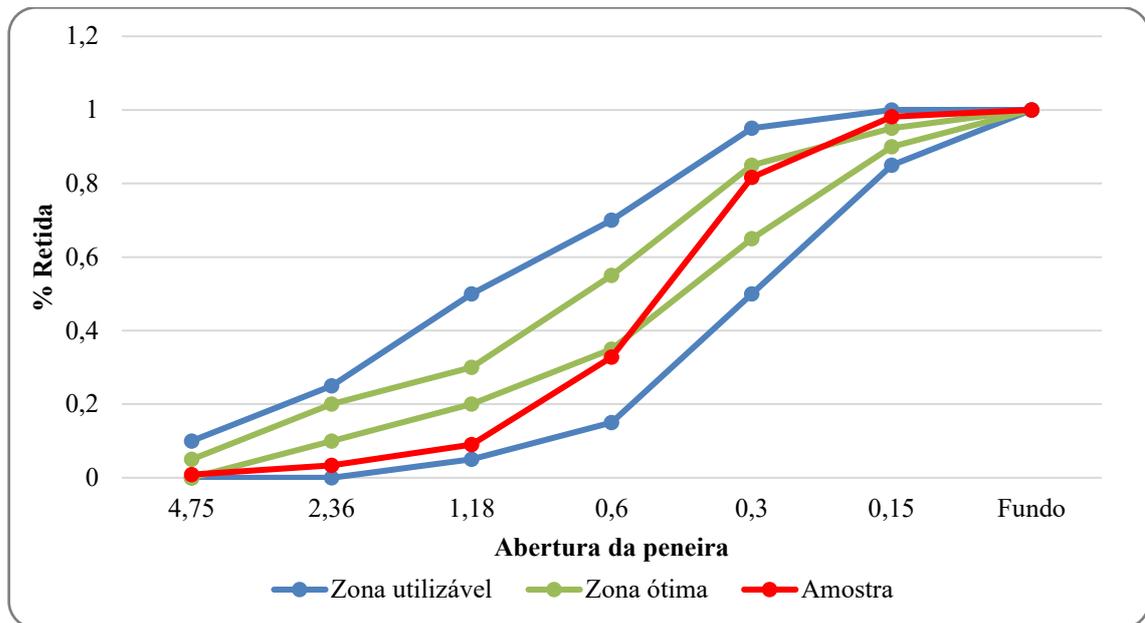
#### 3.3.1 Cimento

O cimento é da marca Votorantim unidade de Rio Branco, do tipo CP-II-F-40, lote do mês de setembro de 2017. Suas características físico-químicas estão apresentadas no Anexo B.

#### 3.3.2 Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo utilizado foi areia de rio, fornecida pela empresa Britasinos e coletada a partir do mesmo lote.

Figura 24: Granulometria agregado natural.



Fonte: Autor.

Para as características físicas do agregado miúdo, foi utilizada a norma ABNT NM 52 (2009) de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4: Características agregado miúdo natural.

ABS	1,56	%
$\gamma_{as}$	2,50	$g/cm^3$

$\gamma_{aas}$	2,61	$\text{g/cm}^3$
$\gamma_{sss}$	2,51	$\text{g/cm}^3$
$M_u$	1,51	$\text{g/cm}^3$

Fonte: Autor.

Onde:

ABS = Absorção de água

$\gamma_{as}$  = Massa específica do agregado

$\gamma_{aas}$  = Massa específica aparente do agregado seco

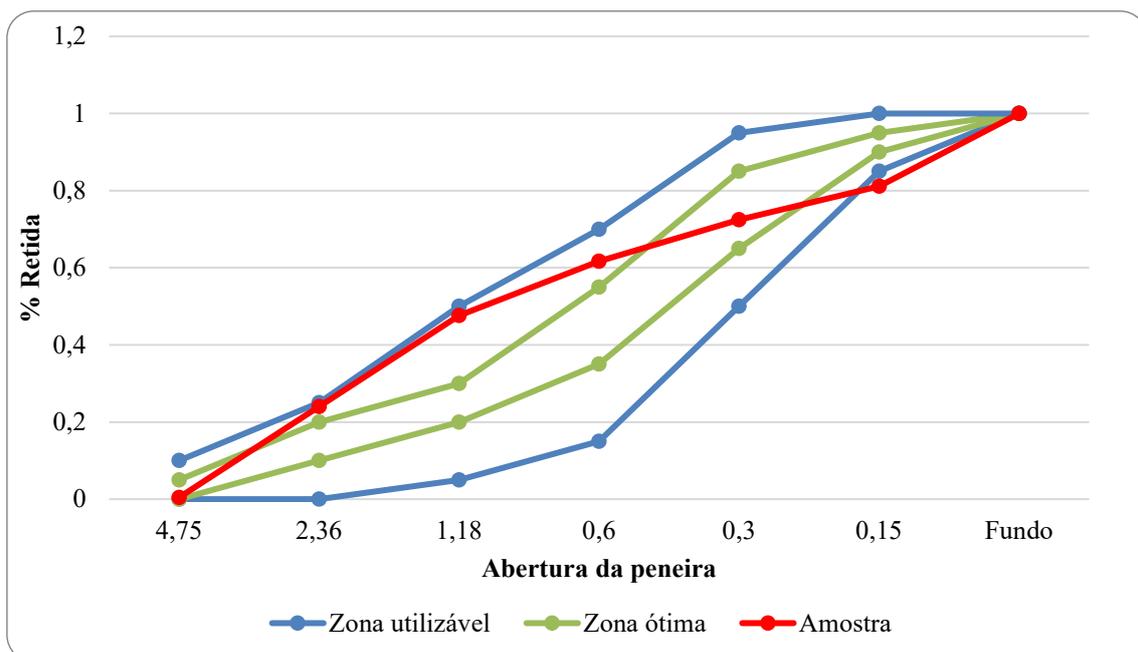
$\gamma_{sss}$  = Massa específica do agregado saturado superfície seca

$M_u$  = Massa unitária

### 3.3.3 Agregado Miúdo Artificial

Neste trabalho foi utilizado areia de britagem (Figura 25) para substituir 40% do agregado miúdo natural. Essa substituição tem dois motivos: primeiro, pois o traço para este trabalho busca chegar o mais próximo da região do Vale do Rio dos Sinos, e o segundo motivo é para auxiliar a diminuir os impactos causados da construção civil no meio ambiente. Como já é de praxe, o setor da construção civil é um dos maiores consumidores de matérias primas naturais.

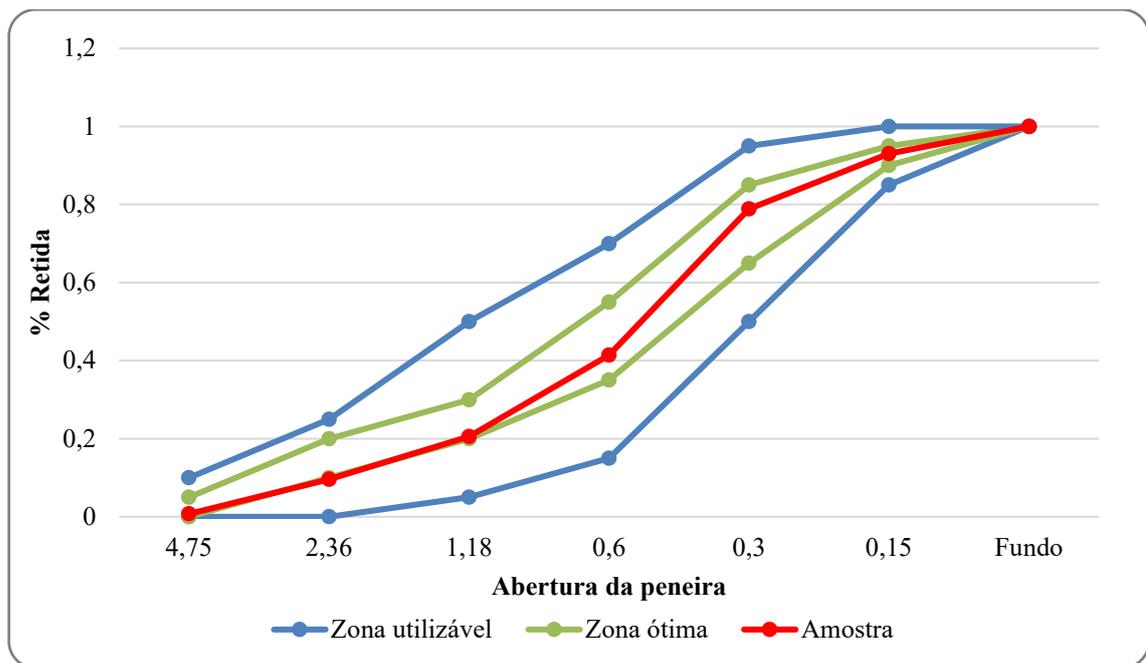
Figura 25: Granulometria agregado miúdo artificial.



Fonte: Autor.

Apesar de ambas as amostras estarem apenas dentro dos parâmetros aceitáveis de norma a composição de ambos agregados gerou um bom resultado. Na granulometria onde o agregado miúdo natural possuía um pequeno déficit, o agregado miúdo artificial corrigia, da mesma forma em situação contrária. Na figura a seguir é demonstrado a granulometria do agregado miúdo composto.

Figura 26: Granulometria agregado miúdo composto.



Fonte: Autor.

Para as características físicas do agregado miúdo, foi utilizada a norma ABNT NM 52 (2009).

Tabela 5: Características agregado miúdo artificial.

ABS	2,44 %
$\gamma_{as}$	2,76 g/cm <sup>3</sup>
$\gamma_{aas}$	2,82 g/cm <sup>3</sup>
$\gamma_{sss}$	2,95 g/cm <sup>3</sup>
Mm	1,73 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor.

Onde:

ABS = Absorção de água

$\gamma_{as}$  = Massa específica do agregado

$\gamma_{\text{aas}}$  = Massa específica aparente do agregado seco

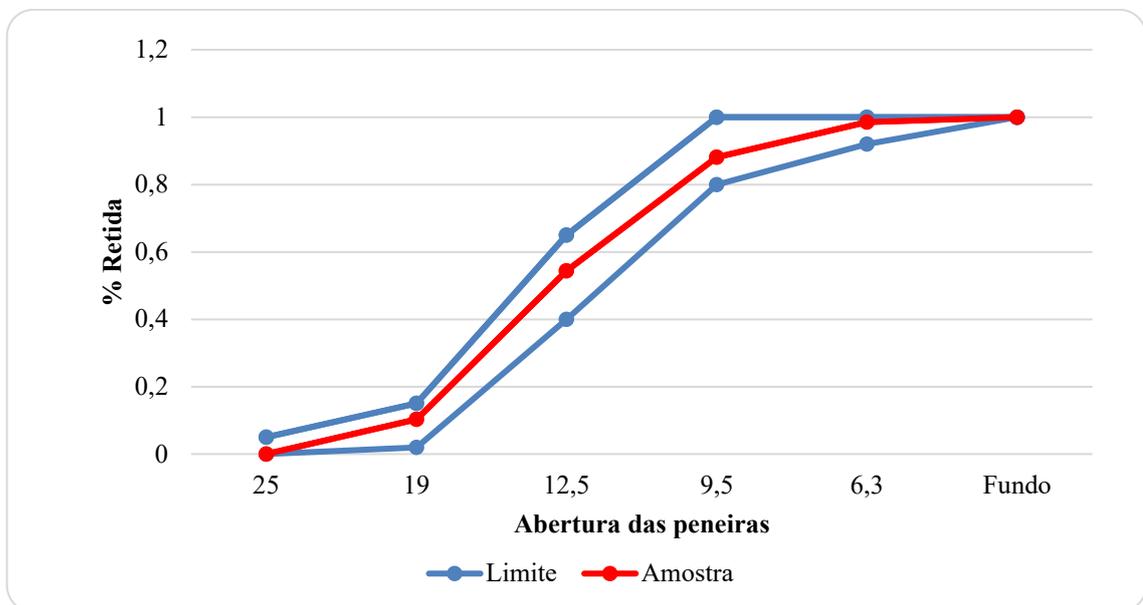
$\gamma_{\text{sss}}$  = Massa específica do agregado saturado superfície seca

$M_u$  = Massa unitária

### 3.3.4 Agregado Graúdo Natural

Foi utilizado brita 0 para esta pesquisa, em função de ser o mesmo diâmetro adotado no concreto fornecido pela empresa Britasinos. Como os corpos de prova também são pequenos, um tamanho elevado de agregado graúdo poderia mascarar parte dos resultados. Na Figura 27 é possível observar a distribuição granulométrica do material que foi utilizado nesta pesquisa.

Figura 27: Granulometria do agregado graúdo.



Fonte: Autor.

Outros ensaios de caracterização como massa específica, massa aparente, absorção foram realizados a partir da NBR NM 53:2009; estes dados são apresentados na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Caracterização do agregado graúdo.

ABS	2,56	%
$\gamma_{\text{as}}$	2,97	$\text{g/cm}^3$
$\gamma_{\text{aas}}$	2,76	$\text{g/cm}^3$
$\gamma_{\text{sss}}$	2,86	$\text{g/cm}^3$
$M_m$	1,57	$\text{g/cm}^3$

Fonte: Autor.

Onde:

ABS = Absorção de água

$\gamma_{as}$  = Massa específica do agregado

$\gamma_{aas}$  = Massa específica aparente do agregado seco

$\gamma_{sss}$  = Massa específica do agregado saturado superfície seca

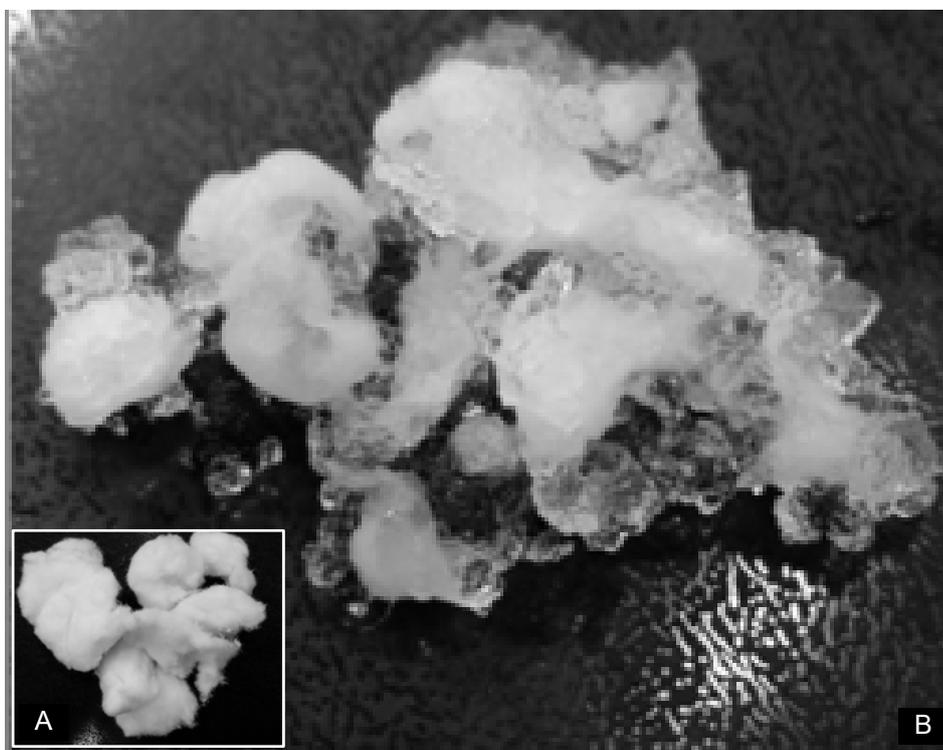
$M_u$  = Massa unitária

### 3.3.5 Polímero superabsorvente residual (PSAR)

O polímero utilizado neste trabalho é do mesmo lote ao utilizado por Gomes (2014), Koppe (2016) e Barth (2021). O material é composto por 70% de polpa de celulose, 10% de polímero superabsorvente e 20% de polietileno de baixa densidade, polipropileno e outros materiais em menor quantidade. Este material é oriundo de parte do processo de reciclagem de uma empresa no município de Bom Princípio – RS. Esta empresa presta serviço de destinação de resíduos da produção de produtos de higiene pessoal.

No estado seco o material é similar a um algodão. Mas, assim que entra em contato com a água, o PSA incha e o torna similar a um gel viscoso. Na Figura 28 a seguir é possível observar a mudança que ocorre no material.

Figura 28: (A) PSAR no estado seco; (B) PSAR hidratado formando um gel.



Fonte: Koppe (2016, p. 71).

A absorção foi definida no trabalho de Koppe (2016), onde foi utilizada a norma ISO 17190-6 (2001), consistindo da saturação do material estudado e em seguida a remoção da água em excesso, não absorvida, em excesso através de centrifugação.

Para este estudo, e também com o objetivo de se manter a mesmas proporções aplicadas ao material por Koppe (2016), foi utilizado uma proporção de 0,13% em relação a massa de cimento consumida em cada traço.

Cabe destacar que Koppe (2016) observou haver dificuldade de padronização do material de utilização, pois a triagem é realizada pela fábrica, ou seja, exatamente o tipo de material (absorventes femininos, fraldas descartáveis diurnas e/ou noturnas) como também o motivo do descarte, se por erro de produção, contaminações etc., o que dificulta o cálculo da taxa de absorção. O material é coletado e processado pela própria empresa e misturado, também ocorrendo à possibilidade de a indústria realizar a mistura. Neste cenário, Koppe (2016) utilizou o teste com utilização de duplicata, ou seja, para garantir a homogeneidade dos resultados.

Na Tabela a seguir é demonstrado os resultados obtidos em seu trabalho.

Tabela 7: Absorção do PSA segundo a ISO 17190-6/2001.

Ensaio	Identificação	Massa inicial (g)	Quantidade de PSAR (g)	Massa final (g)	Absorção (g/g)
1	1	0,4438	—	x	x
	2	0,4437	0,200	11,5253	<b>54,27</b>
2	3	0,4110	—	x	x
	4	0,4110	0,200	11,7839	<b>55,84</b>

Fonte: Koppe (2016, p. 77).

Visando alcançar ainda mais homogeneidade, foi coletada uma grande quantidade do material e misturado com água, para que não houvesse interferência de parte do material não absorver a quantia de água calculada. Em estudos preliminares, foi observado que, em algumas situações, o material absorvia apenas parte da água – acredita-se que em função de haver diversos tipos de composições de polímero superabsorvente e fibra de celulose, possa ocorrer esta variação. Porém, deixando em repouso por pelo menos 24 horas, já havia uma absorção melhor, era observado que a água que estava sobressalente no contato inicial, era absorvida pelo material. Desta forma foi possível trabalhar com uma amostra mais homogênea, aumentando o controle no momento de concretar.

### 3.3.6 Água

A água utilizada é fornecida pelo SEMAE, distribuidora de água do município de São Leopoldo/RS. Foi utilizada para moldagem do concreto e também para a hidratação dos polímeros.

### 3.4 Dosagem, ensaios e produção dos corpos-de-prova

O método IPT/USP/IBRACON foi utilizado para o cálculo do traço. A seguir estão demonstradas as equações que foram utilizadas para o cálculo do traço do concreto. O teor de agregados foi estabelecido sendo 3, 4 e 5, foram adotados estes valores para se obter três pontos em gráficos de dosagem, para um traço rico, médio e pobre.

Relação água/materiais secos:

$$H = \frac{\frac{a}{c}}{1 + m}$$

Onde:

H = Teor de umidade (%)

a/c = fator água/cimento

m = teor de agregados miúdo e graúdo.

Conforme estudos em projetos pilotos, observou-se que o teor de umidade de 9,0% demonstrou-se adequado para aplicação deste trabalho. Este valor também está relacionado com o teor utilizado em concreteiras da região do Vale do Rio dos Sinos. A partir da definição do teor de argamassa ideal, conforme o método, foi adotado o valor de 53%. Este valor também está relacionado com a quantidade utilizada em empresas da região. O cálculo a ser utilizado foi estabelecido conforme equação seguinte.

Teor de argamassa:

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m}$$

Onde:

$\alpha$  = Teor de argamassa (%)

a = teor em massa agregado miúdo / cimento

$m$  = teor de agregado miúdo e graúdo.

Sabendo que:  $m = a + p$ , foi possível calcular o teor de agregado graúdo/cimento, sendo assim ficaram estabelecidos os traços unitários para esta pesquisa, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Traço unitário.

<b>a/c</b>	<b>m</b>	<b>c</b>	<b>a</b>	<b>p</b>
0,36	3,00	1	1,12	1,88
0,45	4,00	1	1,65	2,35
0,54	5,00	1	2,18	2,82

Fonte: Autor.

Já para os procedimentos de moldagem, assim como as recomendações de produção do concreto, moldagem dos corpos de prova, acomodações dos espécimes e procedimentos diversos foi utilizada a norma NBR 5738:2015. O *slump* estipulado foi de  $120 \pm 20$  mm para todos os traços. Este valor foi definido a fim de se obter boa fluidez do concreto e também respeitando valores *slump* médio de empresas de concreto da região, para a aplicação pretendida. Como este concreto se encontra na classe S100 da tabela 2 da NBR 5738:2015, há duas opções de adensamento, mecânica ou manual. Sabendo que para alguns ensaios haveria dificuldade na utilização de adensador mecânico, pois pode comprometer os sensores, foi definida a utilização de adensamento manual com auxílio de uma haste de ferro.

Pela quantidade necessária de concreto a betoneira disponível no laboratório não teria a capacidade de suportar tal demanda, desta forma foi calculado duas betonadas para cada traço.

O traço fornecido pela concreteira, utilizado para os ensaios de campo, foi dimensionado pelos responsáveis da empresa. O traço utilizado foi o seguinte:

Tabela 9: Traço da concreteira.

	<b>CIM</b>	<b>AR</b>	<b>AM</b>	<b>ABR</b>	<b>B1</b>	<b>B0</b>	<b>ÁGUA</b>
<b>REF</b>	641	995	525	290	430	1655	458
<b>PSAR</b>	641	995	605	175	415	1735	491

Fonte: Autor.

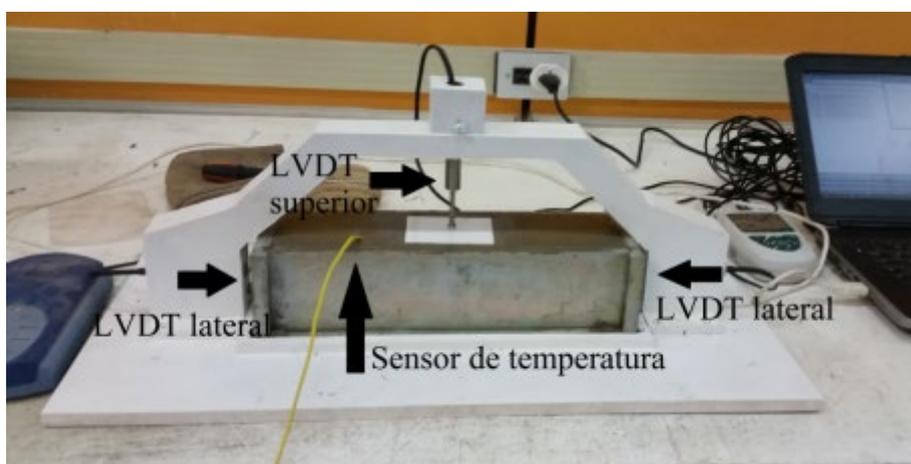
### 3.4.1 Resistência à compressão

Para os ensaios de resistência à compressão, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetros de 100 mm e altura de 200 mm. Foi utilizada para este ensaio a norma NBR 5739:2007, assim como suas recomendações. Após chegada nas idades a serem ensaiadas (aos 7 e 28 dias), os corpos de prova foram retificados no topo e na parte inferior para que ficassem o mais plano possível. Para este ensaio foram utilizados 3 espécimes, a fim de se obter um melhor parâmetro no cálculo de resistência. Nos ensaios laboratoriais, os corpos de prova foram curados submersos em água com cal, enquanto nos ensaios de campo os cilindros foram curados desta forma e também expostos às condições ambiente da época dos ensaios (ver Anexo C).

### 3.4.2 Retração plástica

Visando encontrar a retração nos primeiros instantes do concreto, Giroto, Barbosa e Maciel (2014), realizaram uma adaptação de Turcry (2004) e de Saliba *et al.* (2011), desenvolvendo um equipamento capaz de medir deformações do concreto ainda em seu estado fresco, a partir do momento da mistura, durante 24 horas. Este aparelho consiste em uma forma retangular com dimensões internas de 75 x 75 x 305 mm e possui sensores de deslocamento linear em ambas as laterais. A parte interna da forma é forrada com filme plástico para auxiliar a retirada do material após o término das medições. Os sensores possuem placas de PVC com dimensões de 70 x 70 x 2 mm que ficam nas duas extremidades do equipamento. Para completar as medições e se obter um acompanhamento da temperatura do concreto, é utilizado um outro sensor de temperatura onde estes dados são capturados por módulo universal que realiza medições a cada minuto, totalizando 1440 medidas. Na Figura 29 é possível observar o modelo utilizado neste trabalho.

Figura 29: Forma de retração plástica.



Fonte: Koppe (2016, p. 85).

Após obtenção destes dados são inseridos na seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_t}{l_i} \times 10^6$$

Onde:

$\varepsilon$  = deslocamento linear

$\Delta l_t$  = soma dos deslocamentos horizontais

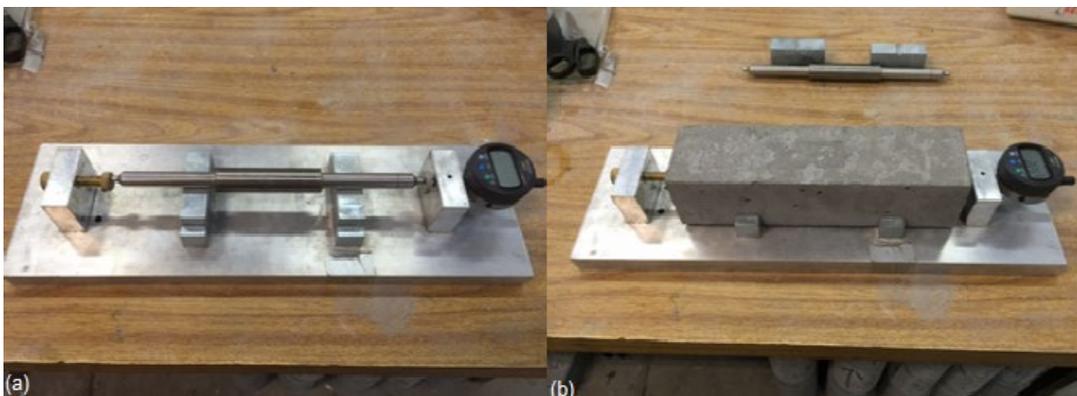
$l_i$  = comprimento inicial da amostra.

### 3.4.3 Retração livre

Para a retração livre foi utilizada a norma americana ASTM C – 157 (1993), e foram moldados 3 prismas para cada um dos traços com e sem PSAR, com dimensões de 75 x 75 x 285 mm. Estes 3 corpos de prova foram curados numa sala com temperatura controlada de 20°C e umidade relativa de 60%. Foram realizadas medidas nas idades de 1, 7, 14, 21 e 28 dias, utilizando sempre os mesmos corpos de prova.

O ensaio consiste em primeiramente regular o equipamento, com uma barra de calibragem que o acompanha. Logo após é inserido o corpo de prova no aparelho, que possui um sensor que mede a variação dimensional, como demonstrado na Figura 30. Foi realizado um acompanhamento registrando os valores obtidos. Para se obter uma maior precisão dos resultados e eliminar possíveis erros de operação, foi medido 10 vezes cada amostra.

Figura 30: (a) Regulagem do equipamento; (b) medição de uma amostra.

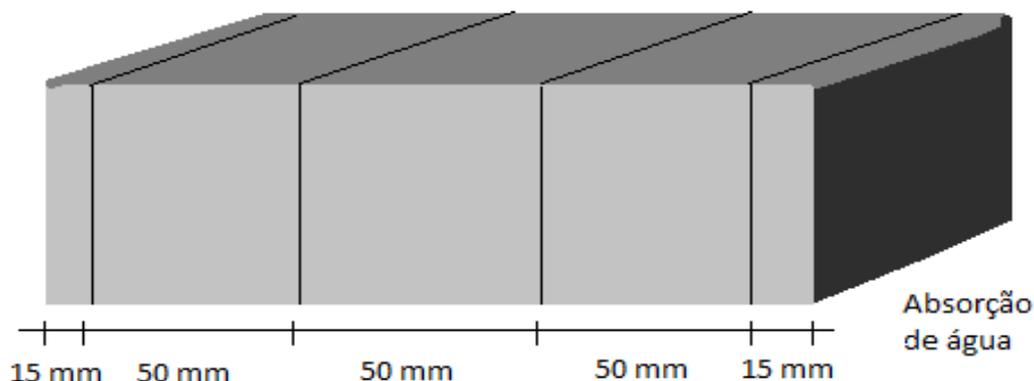


Fonte: Jordani (2016, p. 61).

### 3.4.4 Absorção de água

Para esta pesquisa foi escolhida a norma RILEM TC 116 PCD (1999) para a medição da absorção de água. Foram utilizados corpos de prova prismáticos de 40x40x160 mm, serrados e eliminando as duas laterais. Desta forma, foram utilizadas 3 fatias de cada corpo de prova. A Figura 31 demonstra como foram retiradas as amostras dos corpos de prova. Para a realização do ensaio, é exposto a face serrada em contato com a água. Foi escolhida esta forma, pois possui menor interferência do processo de moldagem (desta forma todos os corpos de prova, possuem as mesmas características diminuindo o impacto de fatores como: adensamento, processo de moldagem, exsudação da água, local onde foi serrado entre diversos outros motivos).

Figura 31: Esquema para absorção de água.



Fonte: Autor.

Após serem serrados, os corpos de prova são colocados em estufa até constância de massa. Antes de iniciar o ensaio, para a preparação da amostra, são retirados da estufa e inseridos em um dessecador com sílica gel para remover a umidade presente no equipamento, removido o ar e vedado. Após os espécimes atingirem temperatura ambiente, são medidos os corpos de prova para o cálculo da área em contato com a água e inserido um balão de látex no lado oposto. Suas laterais são vedadas com fita do tipo *tape*. Os corpos de provas são então colocados em um tanque, com uma altura de 5mm em contato com a água. Com auxílio de uma balança, os corpos de prova são pesados nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72, 96 horas. O intervalo de medição adotado é maior que o estipulado pela RILEM TC 116 PCD; este período já foi utilizado em outras pesquisas de absorção da UNISINOS (TROIAN, 2010; FEDUMENTI, 2013; JORDANI, 2016).

### 3.4.5 Análise Estatística

As análises estatísticas que foram utilizadas neste trabalho foram realizadas com auxílio dos softwares Statistica e Microsoft Excel.

### 3.4.6 Ensaio de campo

Após autorização da FEPAM (conforme Anexo D), foi realizada neste estudo a primeira aplicação em campo de concreto com PSAR como agente de cura interna, visando avaliar e demonstrar a aplicabilidade do material em condições reais de utilização. Dois pisos com 12,5 m<sup>2</sup> cada foram concretados *in loco*, utilizando um traço comumente utilizado pela empresa para esta aplicação (conforme descrito no item 3.4, tabela 9). O mesmo traço foi utilizado para ambos os pisos, a única diferença era que um possuía PSAR e outro não. Não foi acrescentado aditivo plastificante no concreto para que também fosse possível verificar se o material melhoraria a trabalhabilidade do concreto, como previsto. Como havia sido verificado na pesquisa, era necessário pré-hidratar o PSAR, e para isso foi calculado a quantidade necessária e separada em recipientes com período mínimo de 24 horas para que o material conseguisse no mínimo de saturação.

Ambos os pisos foram concretados no mesmo dia e foram moldados próximo ao estacionamento da concreteira Britasinos – Filial Gravataí - RS. A Figura 32 demonstra imagens aéreas do local escolhido e cedido pela empresa. Estas amostras não foram cobertas por nenhum material para aproximar o máximo possível a escala real, a ideia é que o piso sofresse a ação das intempéries, e assim fosse possível analisar o comportamento do material estudado.

Figura 32: (a) Britasinos Concretos, filial de Gravataí; (b) Área selecionada para a realização do teste piloto.



Fonte: Google Earth (2019).

Após o caminhão carregado com cimento, areia, areia de britagem e brita foi adicionado água na mistura, depois de verificado o *slump*, e foi adicionado o polímero já hidratado diretamente no caminhão. A imagem a seguir demonstra o momento da adição do polímero absorvente no caminhão betoneira.

Figura 33: Adição de material polimérico já hidratado no caminhão betoneira.



Fonte: Autor.

Os pisos possuíam 12,5 m<sup>2</sup> e foram monitorados semanalmente com auxílio de uma câmera fotográfica. O nivelamento do piso, durante a concretagem, pode ser observado na

Figura 34. Nenhuma das amostras foi submetida a qualquer tipo de cura úmida, para que não interferisse nos resultados. O *slump* adotado foi de  $160 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ , o mesmo valor adotado pela concreteira.

Figura 34: Nivelamento do piso.



Fonte: Autor (2018).

Como descrito anteriormente, também nesta etapa foram moldados corpos de prova cilíndricos com objetivo de obter a resistência compressão em determinadas datas, além de CP's prismáticos, para a medição da retração no estado seco. Na Figura 35 é apresentado o momento da moldagem dos corpos de prova.

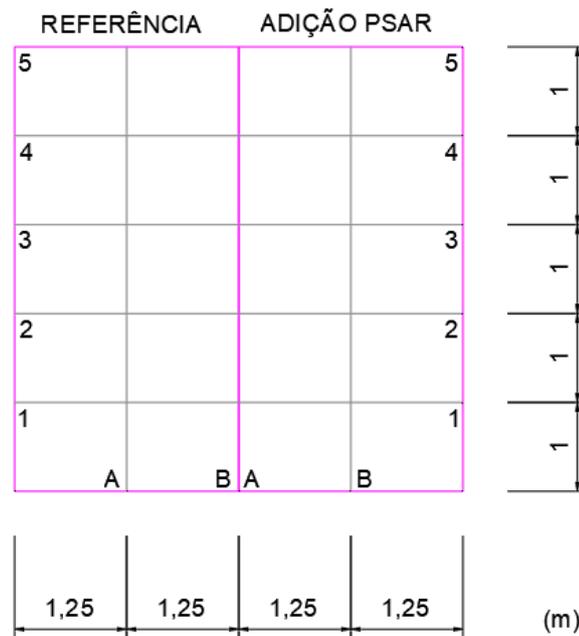
Figura 35: Processo de moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2018).

Passadas 24 horas da concretagem, foi demarcado nestes pisos com auxílio de um fio de nylon, uma espécie de tabuleiro de xadrez, com o objetivo de facilitar a localização das fissuras que poderiam surgir. Foi criada uma malha de 1 x 1,25m e etiquetadas colunas “A” e “B” na largura do piso e os números 1, 2, 3, 4 e 5 no comprimento, conforme demonstrado na Figura 36.

Figura 36: Esquema de monitoramento em campo.



Fonte: Autor.

O acompanhamento fotográfico registrou semanalmente cada quadro acima mencionado. Para uma melhor visualização, foram registradas imagens fotográficas com foco no local onde ocorreram as fissuras. Também foram medidas, com auxílio de um fissurômetro e um paquímetro, a fim de se obter uma estimativa dos comprimentos e aberturas das fissuras. Porém, para uma análise mais precisa, as imagens registradas foram transferidas para o software AutoCAD, colocadas em escala e desenhadas exatamente no formato das fissuras. Logo após, o programa calculou o comprimento real das fissuras, e foi analisado também a maior abertura encontrada em cada fissura do piso.

Figura 37: Pisos já concretados nas primeiras horas.



Fonte: Autor.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no trabalho, assim como sua análise e discussão, focando inicialmente nos resultados laboratoriais e posteriormente naqueles obtidos a partir da aplicação em campo.

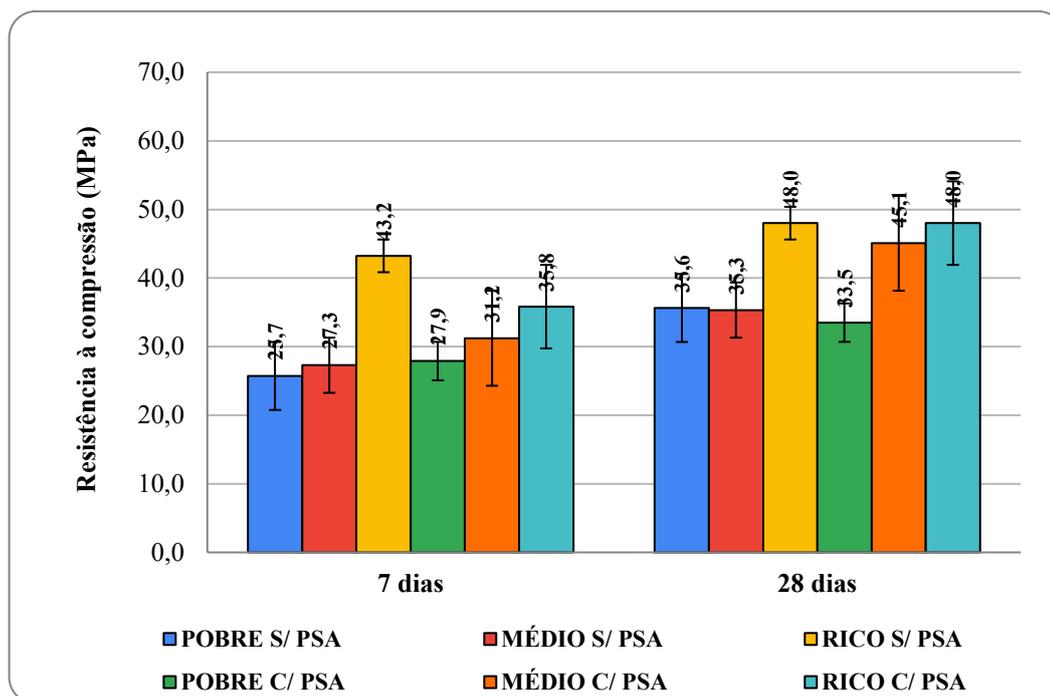
### 4.1 Resultados do laboratório

Neste item são apresentados os resultados obtidos em laboratório, incluindo resistência à compressão, retração plástica, retração por secagem e absorção de água, assim como uma análise do consumo de água e das relações a/c com e sem a incorporação de PSAR nas misturas.

#### 4.1.1 Resistência à compressão

A Figura 38 apresenta as médias dos resultados de resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, para os concretos com e sem a incorporação de PSAR. De modo geral, observa-se que os resultados obtidos para os traços com PSAR igualaram ou superaram os concretos de referência em todos os casos, com exceção apenas do traço rico aos 7 dias de idade. Entretanto, após os 7 dias, enquanto o traço rico do concreto referência teve aumento de apenas 11% até os 28 dias, a resistência do concreto com PSAR cresceu 34% entre essas idades, atingindo 48 MPa aos 28 dias e, assim, igualando a resistência obtida para o concreto referência – o que indica uma melhor condição de cura proporcionada pela incorporação do PSAR. Esse maior ganho de resistência, proporcionado pela cura interna, é observado também para o traço intermediário; mas não para os traços pobres, que têm maior relação a/c e, portanto, maior disponibilidade de umidade interna nos poros do concreto.

Figura 38: Resistência a compressão em função da idade, para os diferentes traços analisados, para os concretos de referência (sem PSAR) e com cura interna (com PSAR)



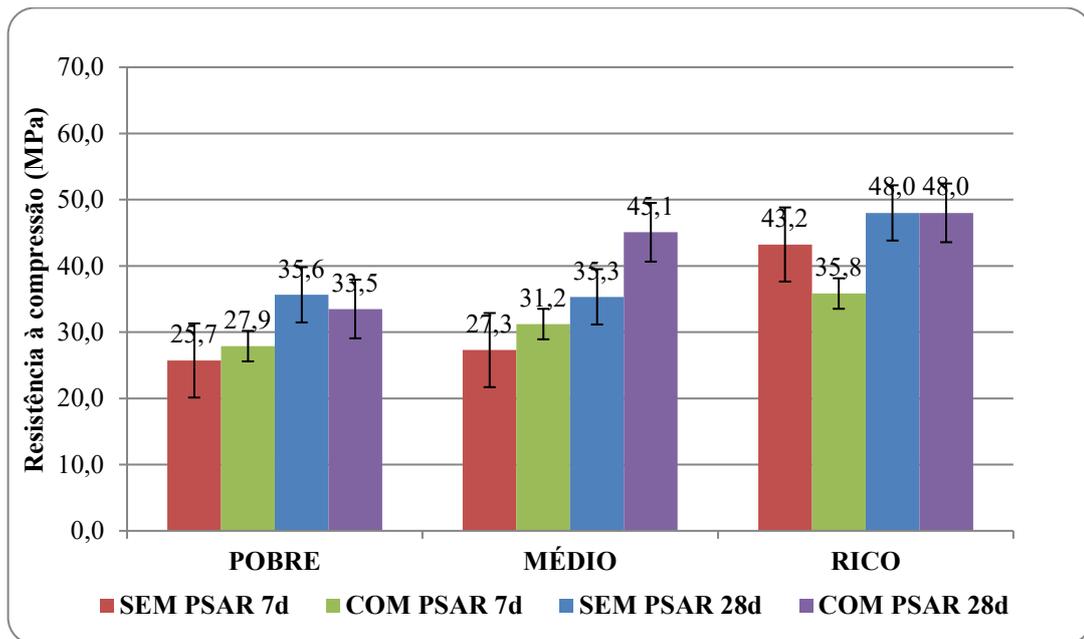
Fonte: Autor.

Na primeira idade estudada, é possível observar que os traços pobre e intermediário obtiveram valores semelhantes aos mesmos traços com a adição do PSAR, com uma diferença de 8,6% para o traço pobre e 14,3% para o traço médio, a favor dos concretos com cura interna. Porém, no traço rico com polímero, na mesma idade, houve um decréscimo de 17,1%, indicando uma maior sensibilidade aos vazios incorporados pelo agente de cura nestes concretos, menos porosos, conforme esperado. Efeito semelhante é observado, por exemplo, ao se utilizar agregados leves (portanto mais porosos) em concretos de baixa e alta resistência: enquanto nos concretos de baixa resistência a queda é normalmente pequena ou até imperceptível, nos concretos de maior resistência (e com matriz menos porosa), a redução na resistência é mais acentuada. Entretanto, como comentado anteriormente, ao se observar o ganho de resistência após os 7 dias, fica evidente que as melhores condições de cura proporcionadas pelo PSAR foram capazes de compensar esta maior porosidade inicial causada pelo PSAR, principalmente no traço mais rico.

Dudziak e Mechtcherine (2010) observaram que a adição de PSA afetou o ganho inicial de resistência em concretos de alto desempenho (HPC) em relação à mistura de referência, com um teor de 0,4% de PSA. Este comportamento também foi verificado nas pesquisas realizadas anteriormente por Silva *et al.* (2013), Manzano (2014), Moraes e Cerqueira (2014) e Suarez (2015). Na figura 39, são apresentados os resultados de resistência organizados em função dos traços analisados, para facilitar a comparação dentro de cada grupo, nas diferentes idades analisadas, para os concretos de referência (sem PSAR) e com cura interna (com PSAR).

Conforme observado anteriormente, fica evidenciado que o agente de cura interna apresenta melhores resultados nos traços com maiores consumos de cimento e menores relações a/c (traços intermediário e rico), considerando tanto os ganhos de resistência observados entre 7 e 28 dias, quanto as resistências finais obtidas, em comparação com os concretos referência.

Figura 39: Resistência à compressão em função do traço, nas diferentes idades analisadas, para os concretos de referência (sem PSAR) e com cura interna (com PSAR)



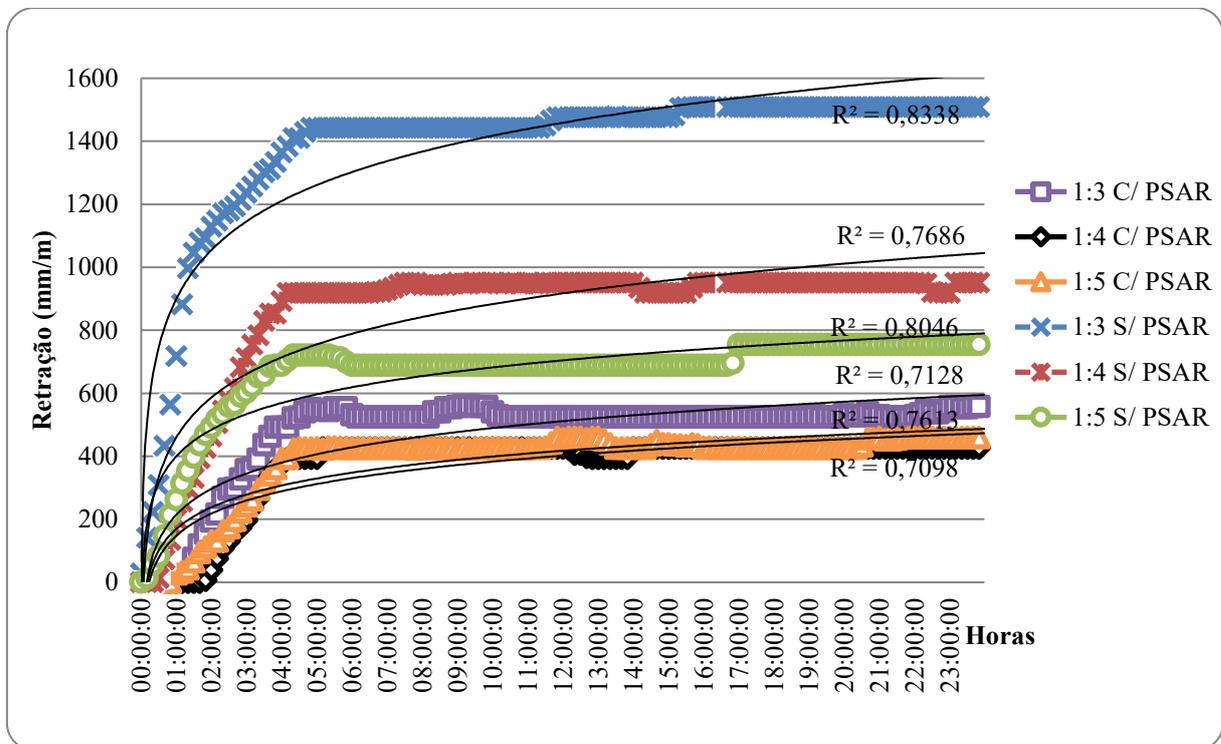
Fonte: Autor.

É possível, também, que a concentração iônica da solução dos poros destes diferentes traços exerça uma influência na liberação da água de cura interna retida pelo polímero superabsorvente residual. A concentração de diferentes íons na solução aquosa em pastas de cimento foi medida em diversos estudos. As maiores concentrações, em centenas de mM, são normalmente encontradas para  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $OH^-$ . As altas concentrações se desenvolvem imediatamente após a mistura e permanecem aproximadamente constantes até o tempo de pega (ESTEVES, 2011), sendo que, de modo geral, quanto maior o consumo de cimento e menor a relação a/c, maior será a concentração destes íons, o pH e a condutividade elétrica no estado fresco (Mancio et al., 2010), facilitando assim a liberação da água retida no PSA pré-saturado e melhorando a cura interna em traços mais ricos.

#### 4.1.2 Retração plástica

Os resultados dos ensaios de retração plástica são apresentados na Figura 40. De modo geral, observa-se, de maneira muito consistente, que as maiores retrações plásticas ocorrem nos concretos sem cura interna, para os traços rico, intermediário e pobre (1:3, 1:4 e 1:5), respectivamente, conforme esperado, com grande parte da retração ocorrendo durante as primeiras 5h a 6h após a mistura. Em todos os casos, as menores retrações plásticas foram verificadas para os concretos com PSAR, os quais apresentaram considerável redução em relação aos concretos sem cura interna.

Figura 40: Retração plástica nas primeiras 24 horas.



Fonte: Autor.

Comparando os traços ricos (1:3) sem e com PSAR, observa-se que houve uma **redução de 2,7 vezes na retração plástica** medida ao longo das primeiras 24 horas, devido à ação da cura interna proporcionada pelo PSA, combinada com a ação das fibras celulósicas, também presentes no PSAR. Isso demonstra que o resíduo estudado contribui para diminuir os impactos da retração em estruturas de concreto, principalmente nas primeiras idades, que são as mais críticas para a prevenção da formação de fissuras. Conforme os resultados obtidos, todos os casos foram positivos comparados aos traços sem o polímero. Esse resultado é muito importante nesta pesquisa, pois demonstra claramente o potencial deste material para aplicação na fase

inicial de cura do concreto. Também vai ao encontro do que foi observado em estudos anteriores, onde Koppe (2016) observou essas mesmas características ao medir a retração plástica em argamassas estruturais e a fissuração em pastas de cimento.

Esses dados são muito importantes, pois auxiliam o entendimento do motivo de não haver fissuras nas idades iniciais durante a aplicação em campo (item 4.2), onde será possível realizar uma comparação dos resultados e do comportamento dos traços estudados.

#### 4.1.3 Absorção de água

As tabelas 10 e 11 apresentam os resultados de absorção de água obtidos aos 7 e 28 dias, respectivamente, incluindo a absorção ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), absorção total (%), taxa de absorção capilar ( $\text{mm}/\text{h}^{1/2}$ ), porosidade capilar e porosidade total. Os gráficos, com os resultados individuais de cada ensaio, são apresentados no Apêndice A.

Tabela 10: Absorção de água aos 7 dias.

CURA (%)	TRAÇO	PSAR	Absorção ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	Absorção Total (%)	S Taxa de Abs. Capilar ( $\text{mm}/\text{h}^{1/2}$ )	Porosidade Capilar	Porosidade Total
100%	RICO	SEM	0,72	6,61	1,38	13,69	14,23
		COM	0,76	6,97	1,46	13,89	14,82
	MEDIO	SEM	0,72	6,57	1,38	13,77	14,20
		COM	0,75	7,20	1,45	14,54	14,91
	POBRE	SEM	0,75	6,72	1,39	14,25	14,86
		COM	0,74	7,06	1,48	14,21	14,60
60%	RICO	SEM	0,77	6,75	1,23	14,18	14,99
		COM	0,78	6,86	1,36	14,88	15,47
	MEDIO	SEM	0,75	6,72	1,29	13,70	14,72
		COM	0,81	7,24	1,58	15,09	15,91
	POBRE	SEM	0,82	6,99	1,59	14,96	15,97
		COM	0,74	6,68	1,50	14,20	14,58
30%	RICO	SEM	0,79	6,94	1,28	14,03	15,33
		COM	0,83	7,60	1,54	16,98	16,40
	MEDIO	SEM	0,77	6,73	1,33	14,27	15,07
		COM	0,77	6,94	1,38	14,32	15,05
	POBRE	SEM	0,79	6,91	1,53	14,72	15,50
		COM	0,77	7,08	1,27	14,67	15,19

Fonte: Autor.

Na tabela 10, de modo geral, é possível verificar que houve uma pequena diferença entre os valores observados para idade de 7 dias, como uma leve tendência de aumento da absorção para os concretos com PSAR, comportamento esse que se reverteu aos 28 dias, como pode ser observado na tabela 11.

Tabela 11: Absorção de água aos 28 dias.

CURA (%)	TRAÇO	PSAR	Absorção (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção Total (%)	S Taxa de Abs. Capilar (mm/h <sup>1/2</sup> )	Porosidade Capilar	Porosidade Total
100%	RICO	SEM	0,74	6,88	1,53	14,02	14,57
		COM	0,72	6,54	1,52	13,57	14,17
	MEDIO	SEM	0,73	6,69	1,49	13,76	14,24
		COM	0,74	6,83	1,51	14,00	14,59
	POBRE	SEM	0,72	6,53	1,52	13,57	14,19
		COM	0,72	6,73	1,54	13,73	14,24
60%	RICO	SEM	0,78	7,13	1,42	14,00	15,24
		COM	0,75	7,03	1,59	14,19	14,81
	MEDIO	SEM	0,79	7,12	1,36	14,64	15,39
		COM	0,70	6,60	1,42	13,40	13,92
	POBRE	SEM	0,76	6,97	1,56	13,32	14,61
		COM	0,75	6,91	1,60	14,12	14,79
30%	RICO	SEM	0,80	7,40	1,42	13,69	15,30
		COM	0,75	6,75	1,40	13,94	14,83
	MEDIO	SEM	0,78	7,48	1,44	13,87	15,17
		COM	0,73	6,54	1,36	13,59	14,22
	POBRE	SEM	0,77	7,37	1,40	13,84	14,91
		COM	0,74	6,74	1,33	13,39	14,49

Fonte: Autor.

Na idade de 28 dias, ao analisar a melhora nos resultados de absorção nos concretos com cura interna, observa-se que houve uma redução mais acentuada para a condição de cura com 30% de UR, seguida da condição de cura com 60% de UR, enquanto nos concretos curados a 100% de UR os valores de absorção foram muito semelhantes, com e sem cura interna. Ou seja, é visto que em condições de cura com pouca umidade o agente de cura interna demonstra uma melhor eficiência.

A melhoria nos resultados de absorção observada aos 28 dias é consistente também com gráficos da Figura 38, resultados de resistência à compressão apresentados anteriormente, indicando uma melhor cura nos concretos com a uso do PSAR como agente de cura interna.

Gomes (2014) observou em seu estudo que a absorção de água por capilaridade apresentou resultados com uma variação menor que 1,0%, onde a argamassa com o teor de adição de 0,5% de PSAR apresentou uma absorção inferior a 1,0% em relação à argamassa de referência. Já as argamassas com adição de teores de 1,0% e 1,5% apresentaram resultados semelhantes com aproximadamente 1,02% superior à referência sem adição de PSAR.

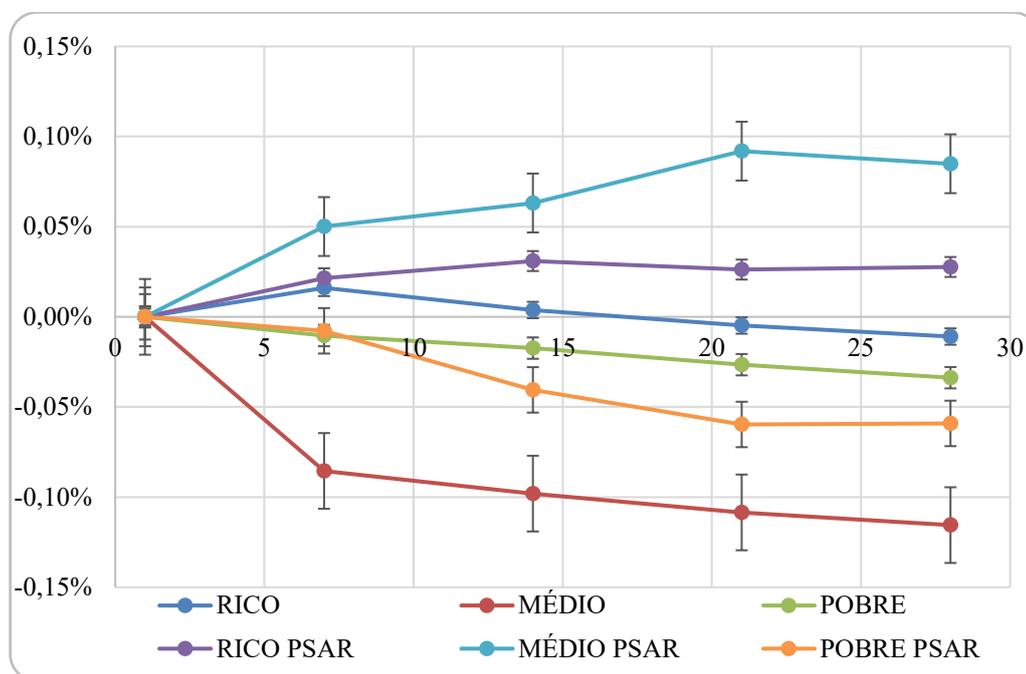
Retração por secagem

Após o processo de moldagem dos corpos de prova, passando 24 horas iniciou-se o ensaio de retração por secagem. Os resultados médios obtidos são apresentados na Figura 42.

Os traços médio e rico, com a adição do PSAR, não apresentaram qualquer retração até os 28 dias, inclusive com um pequeno comportamento expansivo (não suficiente para causar qualquer deterioração no material, e capaz de compensar outros tipos de retração que ocorrem no material, como a própria retração plástica, conforme apresentado no item 4.1.2), o que indica que o material contribui positivamente para amenizar os efeitos de retração do concreto, principalmente em concretos com maior consumo de cimento, o que é consistente com os resultados anteriores. No traço pobre com PSAR, esta mesma redução não foi observada, apresentando resultados similares ao traço pobre sem PSAR, e até um pouco superiores.

O traço intermediário sem cura interna obteve a maior retração comparando a todos os traços estudados, em contraste com o mesmo traço com PSAR, que apresentou o melhor resultado neste ensaio. O traço rico sem cura interna, ao contrário do esperado, se manteve relativamente constante durante as idades analisadas.

Figura 42: Retração por secagem com e sem adição de PSAR.



Fonte: Autor.

#### 4.1.4 Consumo de água adicional do polímero

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foi observado que o PSAR pré-hidratado aparenta ter um efeito plastificante, já que nos estudos preliminares foi visto que, na sua adição

ao concreto, melhorava sua trabalhabilidade. Desta forma, foi calculado a água adicional que foi necessário para atingir o slump desejado ( $120 \pm 20$  mm) para os traços sem o polímero (a partir de um teor de água (H) inicial de 9%, conforme descrito no item 3.4), durante as dosagens nas betonadas experimentais, e a quantidade de água presente no PSAR, nos traços com o agente de cura interna. Estes valores estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Consumo de água e água presente no polímero.

Traço	Slump	Água adicional	Água do PSA	Água calculada	Cimento	a/c calculado	a/c real	Consumo
1:3	120	0,5819	0	2,62	7,28	<b>0,36</b>	<b>0,44</b>	544
1:3	120	0	0,509	2,62	7,28	<b>0,36</b>	<b>0,43</b>	544
1:4	110	0,2674	0	2,60	5,77	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>	432
1:4	100	0	0,4039	2,60	5,77	<b>0,45</b>	<b>0,52</b>	432
1:5	100	0,1954	0	2,58	4,78	<b>0,54</b>	<b>0,58</b>	359
1:5	130	0	0,3347	2,58	4,78	<b>0,54</b>	<b>0,61</b>	359

Fonte: Autor.

Observando a Tabela 13, é possível verificar que em nenhum dos casos houve uma diferença significativa no consumo de água. Observa-se que o aumento da trabalhabilidade ocorre principalmente em função do aumento no teor de água do concreto, seja através da adição direta de água à mistura, ou através do PSAR pré-hidratado, conforme esperado com base na revisão bibliográfica.

Tabela 13: Análise de variância do consumo de água relacionado ao slump.

ANOVA						
		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
<b>A/C NOVO</b>	Entre Grupos	,000	1	,000	,047	,840
	Nos grupos	,026	4	,007		
	Total	,027	5			
<b>ÁGUA</b>	Entre Grupos	,007	1	,007	,221	,662
	Nos grupos	,124	4	,031		
	Total	,131	5			
<b>SLUMP</b>	Entre Grupos	66,667	1	66,667	,400	,561
	Nos grupos	666,667	4	166,667		
	Total	733,333	5			

Fonte: Autor.

Silva *et al.* (2014), realizaram um estudo da determinação experimental da retração autógena livre e uni-direcional, de microconcretos de alta resistência contendo dois tipos

diferentes de PSA, comparados à mistura de referência, onde a água para cura interna foi adicionada devido à absorção de água pelo polímero de modo a manter a consistência do traço de referência. Para o PSA 1, a quantidade de água adicionada para cura interna foi de 21 kg/m<sup>3</sup> e, de 28 kg/m<sup>3</sup>, para o PSA 2. Esta quantidade de água adicional, que contribui inicialmente para a trabalhabilidade do concreto, é absorvida pelo PSA, e depois fornecida para o processo de hidratação, na qualidade de água para cura interna. O PSA 1 foi ainda mais eficiente que o PSA 2, apresentando maiores reduções na retração autógena, em todas as idades. Apenas com 2 dias de idade, a mistura contendo PSA 1 apresentou retração autógena 68% menor do que a mistura de referência, enquanto o SAP 2 reduziu 39%. A porcentagem de redução na retração autógena, devido a presença do SAP, diminui à medida que a hidratação avança, entretanto, a eficácia de redução é maior justamente nas primeiras idades, quando o concreto apresenta menor resistência aos esforços de tração. O SAP é promissor como estratégia mitigadora da retração autógena de materiais cimentícios, pois a reduz substancialmente com ligeiro prejuízo nas propriedades mecânicas (máximo 10% no teor estudado).

Secrieru *et al.* (2016) avaliaram o comportamento reológico no estado fresco de microconcretos com a adição de PSA e água de cura interna, por meio de reometria, bombeabilidade e tribologia. O efeito da variação da temperatura (10oC, 20oC e 30oC) também foi estudado. Além disso, dois métodos para estimar a bombeabilidade das misturas foram aplicados, o tribômetro e o reômetro de tubulação deslizante (SLIPPER). O polímero investigado foi o PSA D (tipo retentivo), que foi também utilizado por Mechtcherine, Secrieru e Schröfl (2015). A adição de polímero incrementou levemente a viscosidade das misturas, mostrando pouca influência neste parâmetro. Porém, a presença de PSA induziu um grande acréscimo na tensão de escoamento dos microconcretos, independente da temperatura. Além disso, foi notado que a diferença entre os valores aumenta ao longo do tempo de ensaio.

Manzano (2016) salienta que em função do uso de cada tipo de PSA, a abordagem do estudo de sua influência na reologia nos materiais cimentícios deve mudar. Por exemplo, quando o polímero é utilizado como agente de cura interna para mitigar a retração autógena, um parâmetro essencial deve ser tido em conta, a quantidade de água absorvida pelo PSA, que precisa ser adicionada como extra na mistura. Se isso não for feito, é evidente que a absorção do polímero influencia negativamente na tensão de escoamento e na viscosidade do material. No caso do uso do PSA como agente modificador da viscosidade, o valor da água absorvida não deve ser adicionado na mistura para a realização da análise reológica.

É importante mencionar que a cinética de dessorção de água vai depender do tipo de PSA. Schroefl *et al.* (2015) determinaram, pela técnica de radiografia de nêutrons, que um PSA

do tipo não retentivo iniciou a liberação da água para a matriz cimentícia, quase imediatamente depois da preparação da pasta. Por outro lado, um PSA do tipo retentivo começou a liberar a água no início do período de aceleração.

Os autores Paiva *et al.* (2009) concluem que a adição de PSA sempre incrementa os valores dos parâmetros reológicos, com uma clara ação de espessamento. O aumento do teor de PSA é equivalente à remoção de água do sistema, promovendo uma redução na trabalhabilidade. Neste caso, o comportamento foi o esperado, porque o PSA foi utilizado como um agente modificador da viscosidade, por tanto, o valor da água devido à absorção do polímero não foi incrementado na mistura. Para determinar o efeito do PSA nas propriedades reológicas como agente mitigador da retração autógena, é preciso determinar e adicionar a água de cura interna, correspondente à absorção do polímero no meio cimentício.

Mechtcherine *et al.* (2015) consideraram a viscosidade plástica como o parâmetro mais confiável para determinar a absorção dos polímeros, por meio da comparação do comportamento reológico das argamassas de referência e as contendo PSA e água de cura interna.

## **4.2 Dados da pesquisa em escala piloto industrial**

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir da primeira aplicação do PSAR como agente de cura interna em escala real, na construção de dois pisos no pátio de uma concreteira parceira, com e sem cura interna, conforme descrito no item 3.4.6. Os dados climáticos do período do ensaio, incluindo UR (%), T (°C), precipitação (mm) e vento (m/s) são apresentados no Anexo C.

### **4.2.1 Resistência à compressão do traço da concreteira**

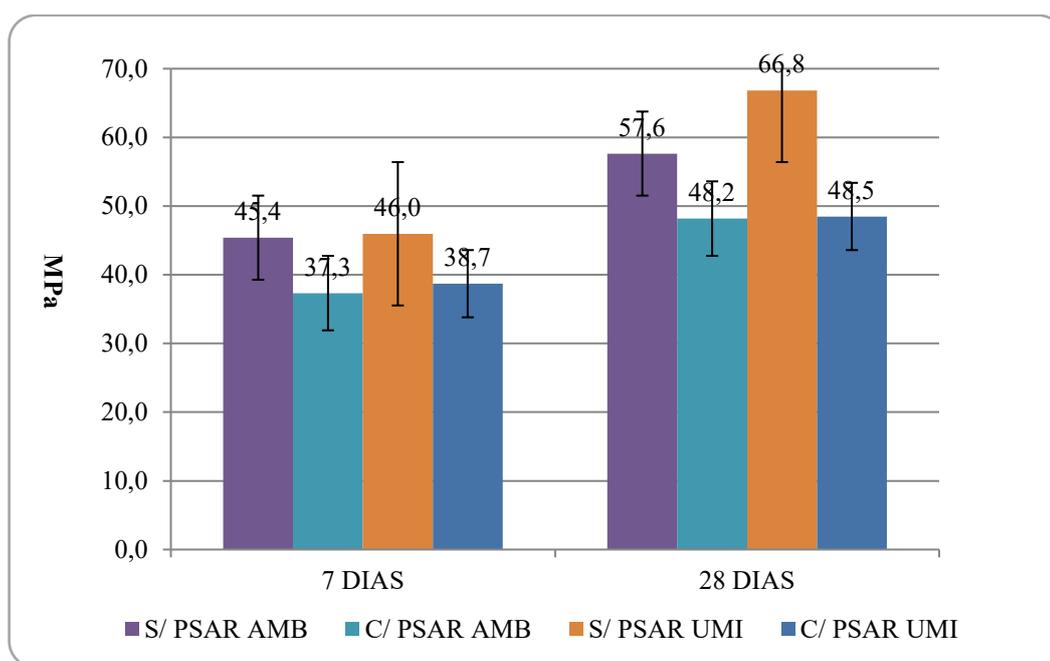
A Figura 43 apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos com o concreto utilizado no estudo de campo, aos 7 e 28 dias, com e sem a incorporação de PSAR. Conforme descrito anteriormente no capítulo 3, este concreto foi submetido a duas condições de cura: cura ambiente (AMB), sob as condições apresentadas no Anexo C; e cura úmida em laboratório, em água com cal (UMI).

Ao contrário dos resultados obtidos em laboratório (item 4.1.1), neste caso o concreto com PSAR apresentou resistência inferior ao concreto referência, tanto aos 7 quanto aos 28

dias, em ambas as condições de cura. Mesmo aos 28 dias, observa-se que a cura interna não foi capaz de compensar a porosidade inserida pelo PSA, conforme ocorreu no estudo laboratorial, indicando a necessidade de controle rígido e redução da quantidade de água adicionada ao traço quando o agente de cura interna pré-saturado é utilizado, afim de manter a resistência constante.

Entretanto, cabe destacar que o concreto sem cura interna foi mais sensível à ausência de cura úmida em campo. Aos 28 dias, o concreto referência alcançou resistência à compressão cerca de 16% superior quando submetido a cura úmida, superando assim a resistência do concreto exposto à condição ambiente durante o período. Por outro lado, nesta mesma idade, para o concreto com cura interna, não se observa diferença na resistência final para ambos os tipos de cura (ambiente e úmida), indicando que a cura interna foi capaz de compensar a ausência de cura úmida para este traço.

Figura 43: Resistência à compressão x idade (concreteira).

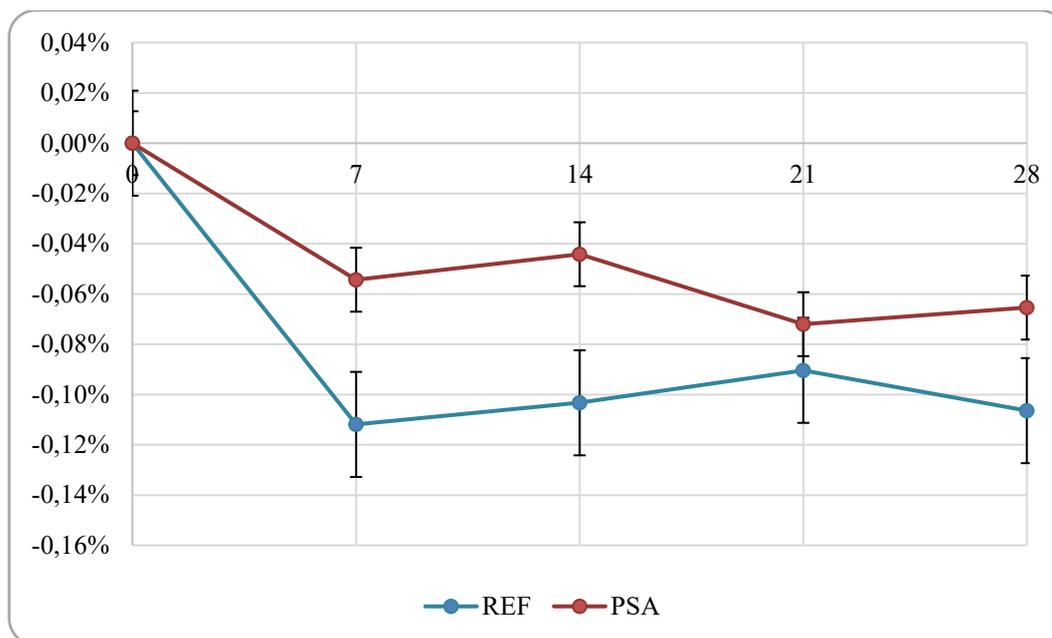


Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Retração por secagem

Na Figura 44, que apresenta os resultados de retração por secagem obtidos para o concreto utilizado no estudo de campo, é possível analisar que o concreto produzido com PSAR apresentou retração inferior ao traço de referência, em todas as idades testadas. Este comportamento já era esperado, com base nos resultados obtidos em laboratório (item 4.1) e também tendo em vista o trabalho de Koppe (2016), onde foi verificado que a adição de PSAR diminuiu consideravelmente os efeitos da retração.

Figura 44: Retração livre ao longo do tempo.



Fonte: Autor.

#### 4.2.3 Absorção de água

Na Tabela 14, é possível observar a absorção dos dois traços de concreto utilizados no estudo de campo. Aos 7 dias, o traço com PSAR teve uma absorção média de 6,72%, enquanto o traço sem este material obteve uma média de 6,66%. Com 28 dias, a absorção média do traço com polímero ficou equivalente a 5,44%, enquanto no traço de referência foi de 4,81%. Entretanto, também aos 28 dias, a taxa de absorção capilar do concreto referência foi de 0,99 mm/h<sup>1/2</sup>, enquanto no concreto com PSAR o valor foi de 0,91 mm/h<sup>1/2</sup>, inferior a traço sem cura interna, apesar de apresentar porosidade total superior, o que indica uma menor interconectividade dos poros ocasionados pela incorporação do PSA.

Tabela 14: Absorção dos concretos moldados em campo.

Traço	Idade	Absorção (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção Total (%)	S Taxa de Abs. Capilar (mm/h <sup>1/2</sup> )	Porosidade Capilar	Porosidade Total
REF	7	0,70	6,66	1,44	12,84	13,58
	28	0,49	4,81	0,99	8,66	9,21
PSAR	7	0,72	6,72	1,55	13,25	14,08
	28	0,55	5,44	0,91	9,84	10,70

Fonte: Autor.

Gomes (2014) verificou em seus ensaios de absorção total de água, índice de vazios e massa específica real, que os resultados se demonstraram estáveis, e comparados com a

argamassa de referência obtiveram pouca variação não influenciando nos resultados de resistência à tração na flexão e compressão. A absorção total de água apresentou como resultados em relação à argamassa de revestimento de referência, para o teor de 0,5%, resultados dentro de uma variação de aproximadamente 6,0% de redução, para o teor de 1,0% observa-se uma redução de 8,0% e para a adição de 1,5% apresentaram redução de 4,0%.

Exemplo dos comentários realizados anteriormente: comparar resultados do autor com os teus

#### 4.2.4 Análise do piso

Após a concretagem dos pisos, conforme descrito no item 3.4.6, a superfície do concreto foi cuidadosamente inspecionada após 24 horas, 7 dias, 15 dias, 21 dias e 28 dias, para verificar a formação de fissuras.

Após 24 horas, observou-se fissuras apenas no traço de referência, enquanto no piso moldado com PSAR não houve fissuração. Conforme ilustrado na Figura 47, foram encontradas fissuras nos setores: A3, A4, B1 e B4 do concreto de referência (ver Figura 36 no item 3.4.6), com comprimento médio de 9,76 cm com desvio padrão de 7,62, e abertura média de aproximadamente 0,53 mm.

Após 7 dias, observou-se que houve um aumento no número de fissuras, com o surgimento de novas fissuras nos setores: A2 e B3 além de novas fissuras no B4, sem considerar as aberturas anteriormente citadas. O comprimento médio foi de 8,61 cm, com desvio padrão foi de 8,90 cm, e abertura média equivalente a 0,62 mm.

Figura 47: Registro com foco na fissura.



Fonte: Autor.

Nas idades de 15, 21 e 28 dias, não foram encontradas novas fissuras ou um aumento das já existentes. Entretanto, foram registradas da mesma forma em todos os setores. Durante todo o período, verificou-se que não houve a formação de fissuras no piso concretado com a incorporação de PSAR. Essa redução da fissuração (ou até eliminação, como neste caso) é consistente com a diminuição da retração do concreto, conforme apresentado nos itens 4.1.2, 4.1.4 e 4.2.2, em função da cura interna proporcionada pelo PSA e também pela presença de fibras celulósicas na composição do PSAR.

Koppe (2016), ao analisar a formação de fissuras induzidas em pastas com e sem PSAR, em ensaio acelerado em laboratório (com UR de 30% e  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ), observou que a pasta de referência foi a que apresentou fissuras mais expressivas, chegando a reduções superiores a 90% na área fissurada nas amostras com incorporação de PSAR.

Joshaghani, Balapour e Ramezaniapour (2018) relatam que em temperaturas mais baixas ( $25^{\circ}\text{C}$ ) geralmente produzem uma diminuição na retração de secagem devido à evaporação mais lenta. Em contraste, a água tem alta energia térmica disponível para conduzir a evaporação a temperaturas mais altas ( $65^{\circ}\text{C}$ ). Os efeitos diretos do aumento temperatura são o aumento da taxa de evaporação da água e das tensões ocasionadas por retração. No entanto, o aumento na temperatura ajuda na mudança de fase da água, acelerando o processo de hidratação. O desenvolvimento da hidratação não só pode impedir a evaporação de água livre, mas também pode aumentar a resistência à compressão e módulo de deformação, o que pode reduzir os valores de tensão de retração.

Beushausen e Arito (2018) apresentaram um modelo analítico simplificado para prever a idade das fissuras de argamassas à base de cimento Portland, com base no módulo de elasticidade, tensão de retração e resistência à tração. Os autores concluíram que argamassas com baixa resistência mecânica à tração apresentaram melhor desempenho de fissuração. Sendo assim, deve-se evitar o uso da resistência mecânica à tração como indicador do desempenho de fissuração de materiais cimentícios.

Monte, Silva e Barros (2009); Nascimento *et al.* (1997); Oliveira *et al.* (2003) ao testarem a incorporação de fibras de polipropileno na argamassa de revestimento encontraram uma sensível redução na retração linear reduzindo, portanto, as fissuras. Da mesma forma, Tanesi *et al.* (1999) verificaram que a adição de fibras de polipropileno reduziu a exsudação, isso pode ter como resultado a diminuição da fissuração por retração.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a incorporação de polímeros superabsorventes residuais (PSAR) contendo fibras celulósicas, proveniente da indústria de produtos higiênicos, como agente de cura interna no concreto, em laboratório e em escala real. Após os ensaios realizados foi possível concluir que o polímero PSAR possui grande potencial na aplicação como agente de cura interna em concretos, com destaque para seu papel na diminuição da retração do concreto.

Em relação à avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de concreto, com e sem incorporação de PSAR, em distintas condições de cura, observa-se que os resultados obtidos para os traços com PSAR igualaram ou superaram os concretos de referência em todos os casos, com exceção apenas do traço rico aos 7 dias de idade. Entretanto, após os 7 dias, enquanto o traço rico do concreto referência teve aumento de apenas 11% até os 28 dias, a resistência do concreto com PSAR cresceu 34% entre essas idades, atingindo 48 MPa aos 28 dias e, assim, igualando a resistência obtida para o concreto referência – o que indica uma melhor condição de cura proporcionada pela incorporação do PSAR. Esse maior ganho de resistência, proporcionado pela cura interna, é observado também para o traço intermediário; mas não para os traços pobres, que têm maior relação a/c e, portanto, maior disponibilidade de umidade interna nos poros do concreto.

Quanto à absorção de água do concreto com PSAR, foi possível verificar uma leve tendência de aumento da absorção para os concretos com PSAR aos 7 dias de idade, comportamento esse que se reverteu aos 28 dias. Nesta idade, ao analisar a melhora nos resultados de absorção nos concretos com cura interna, observa-se que houve uma redução mais acentuada para a condição de cura com 30% de UR, seguida da condição de cura com 60% de UR, enquanto nos concretos curados a 100% de UR os valores de absorção foram muito semelhantes, com e sem cura interna. Ou seja, é visto que em condições de cura com pouca umidade o agente de cura interna demonstra uma melhor eficiência.

Ao analisar o efeito da incorporação de PSAR na retração, foi possível observar, de maneira muito consistente, que as maiores retrações plásticas ocorrem nos concretos sem cura interna, para os traços rico, intermediário e pobre (1:3, 1:4 e 1:5), respectivamente, conforme esperado, com grande parte da retração ocorrendo durante as primeiras 5h a 6h após a mistura. Em todos os casos, as menores retrações plásticas foram verificadas para os concretos com PSAR, os quais apresentaram considerável redução em relação aos concretos sem cura interna. Comparando os traços ricos (1:3) sem e com PSAR, observa-se que houve uma **redução de 2,7**

**vezes na retração plástica** medida ao longo das primeiras 24 horas, devido à ação da cura interna proporcionada pelo PSA, combinada com a ação das fibras celulósicas, também presentes no material. Em relação à retração por secagem, medida ao longo de 28 dias, cabe destacar que os traços médio e rico, com adição do PSAR, não apresentaram qualquer retração durante o período, o que indica que o material contribui positivamente para amenizar os efeitos de retração do concreto, principalmente em concretos com maior consumo de cimento. No traço pobre com PSAR, entretanto, esta mesma redução não foi observada, apresentando resultados similares ao traço pobre sem PSAR.

Além disso, a partir do teste piloto de aplicação em campo, onde o PSAR foi utilizado pela primeira vez em escala piloto industrial, na execução de um piso industrial, observou-se que:

- i.* Conforme esperado com base no estudo laboratorial, o concreto produzido com PSAR apresentou retração inferior ao traço de referência, em todas as idades testadas. Durante o período, verificou-se que **não houve a formação de fissuras** no piso concretado com a incorporação de PSAR (ao contrário do piso referência), o que é consistente com a diminuição da retração do concreto, em função da cura interna proporcionada pelo PSA e também pela presença de fibras celulósicas na composição do PSAR;
- ii.* Quanto à resistência à compressão do concreto utilizado em campo, ao contrário dos resultados obtidos em laboratório, o concreto com PSAR apresentou resistência inferior ao concreto referência, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, em ambas as condições de cura (ambiente e úmida), indicando a necessidade de controle rígido e redução da quantidade de água adicionada ao traço quando o agente de cura interna pré-saturado é utilizado, afim de manter a resistência constante. Apesar disso, cabe destacar que o concreto sem cura interna foi mais sensível à ausência de cura úmida em campo. Aos 28 dias, o concreto referência alcançou resistência à compressão cerca de 16% superior quando submetido a cura úmida, superando assim a resistência do concreto exposto à condição ambiente durante o período. Por outro lado, nesta mesma idade, para o concreto com cura interna, não se observa diferença na resistência final para ambos os tipos de cura (ambiente e úmida), indicando que a cura interna foi capaz de compensar a ausência de cura úmida para este traço;
- iii.* Quanto à absorção de água do concreto utilizado em campo, aos 28 dias, a absorção média do traço com PSAR foi superior ao concreto de referência; entretanto, na mesma idade, a taxa de absorção capilar do concreto com PSAR foi inferior ao traço sem cura interna, apesar

de apresentar porosidade total superior, o que indica uma menor interconectividade dos poros ocasionados pela incorporação do PSA.

Por fim, é importante ressaltar que os resultados apresentados neste trabalho se referem aos materiais e métodos adotados, e outros estudos foram realizados visando ampliar o conhecimento sobre o material, incluindo sua composição e processo produtivo, e avaliar de modo mais aprofundado meios para a sua aplicação prática em larga escala, visando principalmente a prevenção da formação de fissuras em estruturas de concreto.

## REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V. ; JOHN, V. M. . O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011. v. 1. 142 p.
- AKKAYA, Y.; OUYANG, C.; SHAH, S. P. Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 29, n. 2, p. 117-123, fev. 2007.
- ALY, T.; SANJAYAN, J. G.; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Materials and Structures*, v. 41, n. 10, p. 1741-1753, jan. 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. Philadelphia: 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1581/1581M**: Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage. Pennsylvania: ASTM, 2009.
- AMZIANE, S. Setting time determination of cementitious materials based on measurements of the hydraulic pressure variations. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n.2, p. 295- 304, fev. 2006.
- ANJOS, M. A. S.; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Uso de polpa de bambu como reforço de matrizes cimentícias. Escola Técnica Federal de Palmas, Palmas, Brasil. 2003.
- ASSI, L.; CARTER, K.; DEEVER, E.; ANAY, R.; ZIEHL, P. Sustainable concrete: Building a greener future. *Journal of Cleaner Production*, 2018.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Resistência à compressão do Cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 9**: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificações. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2013
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

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.

BAJPAI, A. K.; GIRI, A.; Carbohydr. Polym. 2003, 53, 271.

BAKKER, R. M. F. Initiation period. In: Schiess P. “*Corrosion of steel in concrete*”, London, Chapman and Hall, 1988, cap. 3, pp. 22-55.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M. Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004. 144 f.

BAMFORTH, P. B. Early-age thermal crack control in concrete. Londres: CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), 2007.

BARCELO, L.; MORANVILLE, M.; CLAVAUD, B. Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-desiccation. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 1, p. 177-183, jan. 2005.

BARDELLA, Paulo Sérgio; BARBOSA, Denise Cristina; CAMARINI, Gladis. Sistemas de cura em concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno com utilização de sílica ativa. Encontro Nacional De Pesquisa-Projeto produção Em Concreto Pré-Moldado. São Carlos. **Anais...** Campinas, p. 1-12, 2005.

BENTZ, Dale P. ; SNYDER, Kenneth A. Volume de pasta protegida em concreto: Extensão para cura interna usando agregado fino leve saturado. **Pesquisa de cimento e concreto** , v. 29, n. 11, pág. 1863-1867, 1999.

BENTZ, D. P.; STUTZMAN, P. E. Internal Curing and microstructure of high-performance mortars. 2008.

BENTZ, D. P.; WEISS, J. W. REACT: Reducing early-age cracking today. Concrete Plant International, mai. 2008. Disponível em: <http://ciks.cbt.nist.gov/~bentz/REACTpaper.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2021.

BENTZ, D. P. A review of early-age properties of cement-based materials. Cement and Concrete Research, v. 38, n. 2, p. 196-204, fev. 2008.

BENTZ, D. P.; WEISS, W. J. Internal Curing : A 2010 State-of-the- Art Review. 2010.

BENTZ, Dale P.; JENSEN, Ole Mejlhede. Estratégias de mitigação para craqueamento autógeno por contração. **Cimento e Compostos de Concreto** , v. 26, n. 6, pág. 677-685, 2004.

BEUSHAUSEN, H., ARITO, P. The influence of mix composition, w/b ratio and curing on restrained shrinkage cracking of cementitious mortars. Construction and Building Materials, vol. 174, pp. 38-46, 2018.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 10, p. 1655-1662, out. 1999.

BOGHOSSIAN, E.; WEGNER, L. D. Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete. Cement & Concrete Composites, v. 30, n. 10, p. 929-937, nov. 2008.

BREITENBACH, S.B. et al. Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. Cerâmica, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 395-401, set. 2017.

- BRESCANSIN, J. Comportamento à fratura de compósitos de matriz cimentícia reforçada com polpa de bambu. 2003. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- BRITO, C. W. Q., RODRIGUES, F. H., FERNANDES, M. V. D. S., SILVA, L. R., RICARDO, N. M., FEITOSA, J. P., MUNIZ, E. C. Síntese e caracterização de hidrogéis compósitos a partir de copolímeros acrilamida-acrilato e caulim: efeito da constituição de diferentes caulins do nordeste brasileiro. *Quim. Nova*, 36(1), 40-45. 2013
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2012.
- CARMONA, T. G.; CARMONA FILHO, A. Fissuração nas estruturas de concreto. Artigo científico – Congresso Alconpat Internacional. Mérida – México, 2013.
- CARASEK, H. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2º Ed. G.C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2010. 2v. Pag 893 a 944
- CASTRO, AL de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.
- CASOTTI, Denis Eduardo. Causas e recuperação de fissuras em alvenaria. Universidade de São Francisco. Itatiba: Universidade São Francisco, 2007. Disponível em: <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1061.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2021.
- CHANG-WEN, M.; QIAN, T.; JIA-PING, L. Water consumption of the early-age paste and the determination of “time-zero” of self-desiccation shrinkage. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 11, p. 1496-1501, nov. 2007.
- CHEMROUK, Mohamed. As deteriorações do concreto armado e a opção pelo concreto armado de alto desempenho. **Procedia Engineering** , v. 125, p. 713-724, 2015.
- CHEN, X.; SHAN, G.; HUANG, J.; HUANG, Z. e WENG, Z. Synthesis and Properties of Acrylic-Based Superabsorbent. In: *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 92, Pg.: 619–624. 2004.
- CLARO, G. P. P.; SARAIVA, L. M. **Contribuição ao estudo da retração autógena em concretos de alta resistência**. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2013. 53 p.
- COSTA JUNIOR, M. P. DA. **Avaliação da Durabilidade em Vigas de Concreto sob Diferentes Condições de Cura e Carregamento**. [s.l: s.n.].
- COUTO, Pablo Borges. Caracterização reológica de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal: UnB, 2016.
- CRAEYE, B. GEIRNAERT, M. SCHUTTER, G. **Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks**. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 1-13, 2011.
- CRUZ, N. T. C. C. Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de reboco s de ligante hidráulico. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 2008.

CUSSON, D.; HOOGEVEEN, T. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. v. 38, p. 757–765, 2008.

DAI, W. e JI, W. **Computer simulation model for cement hydration and virtual microstructures**. In: Materials Research Innovations. 2013.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre; UFRGS, 1988. 196p.

DANTAS, M. H. DE O. Avaliação dos efeitos da adição de nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland. Dissertação de Mestrado. Caruaru: UFPE, 2013

DASH, Manoj Kumar; PATRO, Sanjaya Kumar; RATH, Ashoke Kumar. Uso sustentável de resíduos industriais como substituição parcial de agregado fino para preparação de concreto - Uma revisão. **Revista Internacional de Meio Ambiente Construído Sustentável**, v. 5, n. 2, pág. 484-516, 2016.

DENG, Z. et al. Compressive behavior of the cellular concrete utilizing millimeter-size spherical saturated SAP under high strain-rate loading. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 96–106, 2016.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 061/2004-TER: pavimento rígido - defeitos: terminologia. Rio de Janeiro: IPR, 2004.

DINIZ, J. Z. F.; FERNANDES, J. F.; KUPERMAN, S. C. Retração e Fluência. **ISAIA, GC Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p. 673-704, 2011.

DONG, W.; ZHOU, X.; WU, Z. A fracture mechanics-based method for prediction of cracking of circular and elliptical concrete rings under restrained shrinkage. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 131, p. 687–701, 2014.

DUDZIAK, L.; MECHTCHERINE, V. Reducing the cracking potential of Ultra-High Performace Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP). **Proceedings of the international conference on Advanced Concrete Materials**, November 2010. 11-19.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; QUININO, U. Comparação da retração por secagem entre concretos convencionais e com adição de fibras de poliéster. In: **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Anais de congresso**. 2016. p. 789-800.

EL-DIEB, A. S.; EL-MAADDAWY, T. A.; MAHMOUD, A. A. M. Water-soluble polymers as self-curing agents in cement mixes. v. 24, n. 5, 2012.

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

ESTEVEES, L.P. e JENSEN, O.M. Absorbency of Superabsorbent Polymers in Cementitious Environments. In: Concrete with Smart Additives and Supplementary Cementitious Materials, MRS Proceedings – XXI International Materials Research Congress (Cancún, Mexico), Cambridge University Press, 2012.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2013.

- FERNANDES, J. R. R.; AMORIM, A. V. B. Concreto sustentável aplicado na construção civil. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 79-104, 2014.
- FRIEDRICH, S.V. Superabsorbent Polymers (SAP). In: RILEM TC 225-SAP. Application of superabsorbent polymers in concrete construction. London: Ed. Springer, Cap. 3, 2012.
- GARCÍA, A.; CASTRO-FRESNO, D.; POLANCO, J. A. Evolution of penetration resistance in fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 649-659, mai. 2008.
- GIROTTO, L. S.; BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F. Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável L. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 7, n. 1, p. 38–52, 2014.
- GOMES, C. E. M.; FERREIRA, O. P. Influência da adição de fibras sintéticas na resistência de aderência das argamassas colantes. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA). Florianópolis. 2005.
- GOMES, Leandro Martins. **Avaliação da potencialidade da adição de resíduo sólido de base celulósica em argamassa de revestimento**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo: Unisinos, 2014.
- HASPARYK, N. P; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON. 2007. Volume 2, cap.22
- HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: **IBRACON**, V2, 2007.
- HOLT, E. E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement & Concrete Composites*, v. 26, n. 5, p. 521-530, jul. 2004.
- HOLT, E. E. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 3, p. 464-472, mar. 2005.
- HOSSAIN, A. B.; WEISS, J. The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 1, p. 189-199, jan. 2006.
- HUSSIEN, O. F. ; ELAFANDY, T. H. K.; ABDELRAHMAN, A. A., BAKY, S. A., & NASR, E. A. Behavior of bonded and unbonded prestressed normal and high strength concrete beams. *HBRC journal*, v. 8, n. 3, p. 239-251, 2012.
- ISAIA, G. C; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Cap. 36, 2011.
- JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials I . Principles and theoretical background \$. v. 31, p. 647–654, 2001.
- JENSEN, O.M. e HANSEN, P.F. Water-entrained cement-based materials – II. Implementation and experimental results. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 32. P. P. 973–978, 2002.
- JENSEN, O.M. Water Absorption of Superabsorbent Polymers in a Cementitious Environment. In: *International RILEM Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering*, C. Leung and K.T. Wan, eds., RILEM Pro079, pp. 22-35, 2011.

JENSEN, O. M. **Use of superabsorbent polymers in concrete.** In: Concrete International, Vol. 35(1), p. 48-52. 2013.

JENSEN, O. M. Use of Superabsorbent Polymers in Concrete. 2014.

JORDANI, B. **Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna em concreto com cinza de casca de arroz.** São Leopoldo, 2016. 107 f. Dissertações (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2016.

JOSHAGHANI, A.; BALAPOUR, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A. Effect of controlled environmental conditions on mechanical, microstructural and durability properties of cement mortar. Construction and Building Materials, vol. 164, pp. 134-149, 2018.

JUNIOR, A.N. Captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada. 2014. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COOPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.

JUSTS, J.; WYRZYKOWSKI, M.; WINNEFELD, F.; BAJAREB, D.; LURA, P. **Influence of superabsorbent polymers on hydration of cement pastes with low water-to-binder ratio. A calorimetry study.** In: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Vol. 115(1), p. 425-432. 2014.

JUSTS, J.; WYRZYKOWSKI, D.; BAJARE, D.; LURA, P. **Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete.** Cement and Concrete Research, v. 76, p. 82-90, 2015.

KAEFER, Luís Fernando. Considerações sobre a microestrutura do concreto. **Notas de aula:** Escola, 2016.

KIATKAMJORNWONG, S. Superabsorbent polymers and superabsorbent polymer composites. In: Science Asia, Vol. 33(Supplement 1), p. 39-43, 2007.

KLEMM, Agnieszka J.; SIKORA, Karol S. Efeito de Polímeros Superabsorventes (SAP) na microestrutura e propriedades mecânicas de argamassas cimentícias de cinzas volantes. **Construção e materiais de construção**, v. 49, p. 134-143, 2013.

KLIEGER, Paul. Efeito da temperatura de mistura e cura na resistência do concreto. In: **Journal Proceedings**. 1958. p. 1063-1081.

KOVLER, K.; JENSEN, O. M. **Novel techniques for concrete curing.** Concrete International, Vol: 27, No: 9, September 2005, P: 39-42.

KOPPE, Angélica. **Utilização de resíduo à base de polímero superabsorvente e fibra celulósica como agente de cura interna em matrizes de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo: Unisinos, 2016.

KRAUB, M.; HARIRI, K. Determination of initial degree of hydration for improvement of early age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. Cement & Concrete Composites, v. 28, n. 4, p. 299-306, abr. 2006.

KRISTIAWAN, S. A. Performance Criteria to Assess Shrinkage Cracking Tendency in Concrete Overlay. **Procedia Engineering**, v. 54, p. 82–100, 2013.

KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. p. 199, 2002.

- 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. Agosto 2009.
- LAM, H. Effects of Internal Curing Methods on Restrained Shrinkage and Permeability. Thesis (Civil and Environmental Engineering). Toronto: University of Toronto, 2005. 134f.
- LAUSTSEN, S.; HASHOLT, M.; JENSEN, O. M. **A new technology for air entrainment of concrete**. 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. Nanjing, China: [s.n.]. 2008. p. 1223-1230.
- 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.
- LOPES, G. K., NASSER, R. O., ANDRADE, C. T., SILVA, C. X. Capacidade de Inchamento e Características Estruturais de Compósitos Biopolímero/Argila Superabsorventes. 9º Congresso Brasileiro de Polímeros. 2007
- LOPES, F. F.; ARAÚJO, G. T.; LUNA, S.; NASCIMENTO, J. W.; da SILVA, V. R. Modificação das propriedades das fibras de curauá por acetilação. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, 15(3), 316-321. 2011.
- LURA, Pietro; VAN BREUGEL, Klaas; MARUYAMA, Ippei. Efeito da temperatura de cura e do tipo de cimento na retração precoce de concreto de alto desempenho. **Cement and Concrete Research** , v. 31, n. 12, pág. 1867-1872, 2001.
- LURA, P.; VAN BREUGEL, K. Primeiros anos - o efeito do tamanho da amostra. In: **PRO 23: Conferência Internacional RILEM sobre craqueamento precoce em sistemas de cimento-EAC'01** . Publicações RILEM, 2002.v. 23, p. 335
- LURA, Pietro et al. Agregados de pedra-pomes para cura interna com água. In: **Proceedings of International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur** . Publicações RILEM SARL Evanston, 2004. p. 22-24.
- LURA, Pietro et al. Resistência à compressão de pastas de cimento e argamassas com polímeros superabsorventes. In: **Proceedings of the International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation** . Lyngby, Dinamarca: Rilem Publications SARL, 2006. p. 117-125.
- LURA, P.; FRIEDEMANN, K.; STALLMACH, F.; MÖNNIG S; WYRZYKOWSKI, M.; 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, 2012. Cap. 4.
- 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., MORAES, B. J., CERQUEIRA, C. M., SILVA, E. F., LOPES, A.N.M. **Determinação do Tempo Zero em Microconcretos de Alta Resistência contendo Polímeros Superabsorventes usando a Técnica do Ultrassom**. In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto, Bonito, Brasil. 2015.
- MANZANO, Manuel Alejandro Rojas. 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. Distrito Federal: UnB, 2016. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/22140>

- MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de Cimento: impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, 2012.
- MECHTCHERINE, Viktor; REINHARDT, Hans-Wolf (Ed.). **Aplicação de polímeros superabsorventes (SAP) na construção de concreto: relatório do estado da arte elaborado pelo Comitê Técnico 225-SAP**. Springer Science & Business Media, 2012.
- MECHTCHERINE, V., DUDZIAK, L. Effects of Superabsorbent Polymers on Shrinkage of Concrete: Plastic, Autogenous, Drying. In: MECHTCHERINE, V., REINHARDT H. W. (Eds.), Application of superabsorbent polymers in concrete construction. **State-of-the-art Report prepared by the RILEM TC 225-SAP**, Springer, Heidelberg (Germany), 2012.
- MECHTCHERINE, V.; GORGES, M.; SCHROEFL, C.; BRAMASHUBER, W.; RIBEIRO, A.B.; CUSSON, D.; SILVA, E.F; ICHIMIYA, K.; IGARASHI, S.; KOVLER, K.; LOPES, A.N.M.; LURA, P.; REINHARDT, HW.; FILHO, R.D.T; WEISS, J.; YE, G. Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test. *Materials and Structures*. 2014.
- MECHTCHERINE, V.; SECRIERU, E. e SCHRÖFL, C. **Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars -Development of yield stress and plastic viscosity over time**. In: *Cement and Concrete Research*. 67, 52–65, 2015.
- MECHTCHERINE, Viktor et al. Testando propriedades de sorção de polímero superabsorvente (SAP) antes da implementação em concreto: resultados de um Teste RILEM Round-Robin. **Materiais e estruturas**, v. 51, n. 1, pág. 1-16, 2018.
- MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MELO, G. F. de. Concreto celular polimérico: influência na adição de resíduo de poliéster insaturado termofixo. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tese. 2009.
- MELO NETO, A. A.; Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2008. 333f.
- MOHAMADALI, S. A. Effect of properties of concrete using agro-west as replacement of sand. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 4, n. 6, p. 2410-2415, 2017
- MOHAMED, M. A. S.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Valorization of micro-cellulose fibers in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2473–2480, 2010.
- MONNIG, 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, 2009.
- MONTE, R.; SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. B. Retração restringida de argamassas de revestimento reforçadas com fibras. VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Curitiba. Paraná. 2009.
- MONTE, R.; BARROS, M.; FIGUEIREDO, A. Avaliação da influência de fibras de polipropileno na resistência de aderência de revestimentos de argamassa. 2012.

- MORAES, B. J.; CERQUEIRA, C. M. Determinação do tempo zero de microconcretos de alta resistência contendo polímeros superabsorventes usando a técnica do ultrassom. Trabalho de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014. 64 p.
- NASCIMENTO, O.L.; ALMEIDA, N.J.; SIQUEIRA, F.S.; REIS, R.J.P.; CAMPOS, L.P. Argamassas reforçadas com fibras para regiões de esforços diferenciados na alvenaria. Simpósio Brasileiro de Tecnologias de Argamassas, 2., Bahia, Anais, p.287-295, 1997.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. Tradução de Salvador E. Giamusso. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J..Tecnologia do Concreto. 2ª edição, Bookman, Porto Alegre, 2013.
- NONAT, A. Interactions between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) in the case of tricalcium silicate. *Materials and Structures*, v. 27, n. 4, p. 187-195, mai.1994.
- NUNES, N. L. Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2006. 253 f.
- NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. Retração do concreto de cimento Portland. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: USP, 2007. 59 f.
- NUNES, J. Avaliação de Medidas para Mitigar a Retração no Betão. Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012 FEUP, 24-26 de outubro de 2012.
- OLIVEIRA, M. J. A., PARRA, D. F., CARREIRO, J. C., LUGÃO, A. B. Hidrogéis poliméricos contendo complexantes para retenção de contaminantes contendo tório. International Nuclear Atlantic Conference – INAC. Santos. São Paulo, 2005.
- OLIVEIRA, M. C. P. P. Espectrofotometria no Infravermelho - por metodologia Ftir (*Fourier Transform Infrared*): Validação da análise do teor de uréia e de outros parâmetros de qualidade do leite. Dissertação - Escola de Veterinária da Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais 2011.
- ONGHERO, L.; REPETTE, W. L.; PILAR, R. Uso de polímeros super absorvente como agente de cura interna para argamassa altoadensável. Maceió, Brasil IBRACON, 2012.
- ORDOÑEZ, S. T. L. **Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e aditivo redutor de retração.** Brasília: Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2013. 160 p.
- PAIVA, H.; ESTEVES, L.P.; CACHIM, P.B. e FERREIRA, V.M. **Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents.** In: *Construction and Building Materials*. 23, 1141–1146, 2009.
- PATEL, Gaurav Kantilal; PITRODA, Jayeshkumar. Avaliação da areia natural e das cinzas do lago no contexto indiano. *Int. J. Eng. Trends Technol* , v. 4, n. 10, pág. 4287-4292, 2013.
- PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Revista Concreto e Construções*. Ano XXXVII Jan. • Fev. • Mar. 2009. ISSN 1809-7197. São Paulo, SP. Disponível em: [www.ibracon.org.br](http://www.ibracon.org.br). Acessado em: 10 mai.2021.

- PEREIRA, D.F.; MATOS, V.N. 2011. “Combate à retração autógena utilizando polímeros n”. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 72 p.
- PETRUCCI, Eladio Geraldo Requião; PAULON, Vladimir Antonio. **Concreto de cimento Portland**. Globo, 1993.
- POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2010. 265f.
- REINHARDT, H. W., MONNIG S. Results of comparative study of the shrinkage behavior of concretes with different internal water sources. In: JENSEN, O. M., LURA, P., KOVLER, K., (Eds). **Proceedings of international RILEM conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation**, August 2006 (Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark).
- RIBEIRO, C. A. Síntese e Caracterização de Hidrogéis Termosensíveis Baseados em Poli (N-Isopropilacrilamida)(PNIPAm). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá - Programa de Pós-Graduação em Materiais Para Engenharia. Minas Gerais, 2012.
- RIBEIRO, D.V; ALMEIDA, F. C.R.A.; CUNHA, M.P.T.; HELENE, P.R.L.; LOURENÇO, M.Z.; SALES; A.; DE SOUSA, C.A.C. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018. 370p.
- RILEM. Properties of Fresh Concrete. 1. ed. Hanover: Chapman and Hall, 2005.
- ROBEYST, N.; GROSSE, C. U.; DE BELIE, N. Monitoring fresh concrete by ultrasonic Transmission measurements: Exploratory multi-way analysis of the spectral information. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 95, n. 1, p. 64-73, jan. 2009.
- SAHADE, R. F.; MACHADO, L. V.; CAVANI, G. de R. Avaliação de sistemas de recuperação de fissuras em argamassas de vedação. In: Simpósio Brasileiro De Tecnologia Das Argamassas, 10., 2013, Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2013. pp. 1-15.
- SALES, A. T. C. Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: PUC-RJ, 2006. 273 f.
- SALIBA, J., ROZIÈRE, E.; GRONDIN, F.; LOUKILI, A. Influência de aditivos redutores de retração na retração plástica e de longa duração. **Compósitos de Cimento e Concreto** , v. 33, n. 2, pág. 209-217, 2011.
- SANT, G.; FERRARIS, C. F.; WEISS, J. Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 11, p. 1286-1296, nov. 2008.
- SANTOS, K. P., GONÇALVES, I. D. T. F., & CRESCÊNCIO, I. Aplicação de polímero superabsorvente como impermeabilizante em construção civil. IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica. Belém. Pará. 2009.
- SANTOS, Thyala Anarelli Cunha E. Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para Melhorar Propriedades de Concretos de Alto Desempenho. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal: UnB, 2016.

SCHRÖFL, Christof; MECHTCHERINE, Victor; GORGES, Michaela. Relação entre a estrutura molecular e a eficiência de polímeros superabsorventes (SAP) como aditivo de concreto para mitigar a retração autógena. **Pesquisa de cimento e concreto**, v. 42, n. 6, pág. 865-873, 2012.

SCHLITTER, J. .; BARRETT, T. .; WEISS, J. Comportamento de retração contido devido aos efeitos autógenos e térmicos combinados em argamassas contendo polímero superabsorvente (SAP). In: **Conferência Internacional RILEM sobre o uso de polímeros superabsorventes e outros novos aditivos em concreto**. RILEM Publications SARL, 2010. p. 233-242.

SECRIERU E.; MECHTCHERINE, V.; SCHRÖFL, C. e BORIN, D. **Rheological characterisation and prediction of pumpability of strain-hardening cement-based composites (SHCC) with and without addition of superabsorbent polymers (SAP) at various temperatures**. In: *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 581–594. 2016.

SENISSE, J. A. D. L. Influência do Consumo de Água, do Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno e do Tipo de Cimento no Fenômeno da Retração por Secagem em Concretos Empregados em Pisos. p. 161, 2010.

SILVA, A., AZEVEDO, M., MOTA, R., & D'ALMEIDA, C. R. Avaliação do desempenho de argamassa de revestimento com uso de fibra de polipropileno na cidade de Salvador/BA. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, V, São Paulo. Anais. 2003 ANTAC, 469-479.

SILVA, E. F. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2007. 357 f.

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

SILVA, E. F. et al. Mitigação da retração autógena usando dois tipos de polímeros superabsorventes (SAP). In: **Materiais de Construção**, Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis 5, 6 e 7 de Março de 2014 p. 103-114.

SILVA, DMG da. Avaliação do comportamento de polímeros superabsorventes com distintos níveis de pré-saturação em matrizes cimentícias. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Porto Alegre: UFRGS**, 2018.

SNOECK, Didier; DE BELIE, Nele. A influência de polímeros superabsorventes na microestrutura e permeabilidade de materiais cimentícios. In: **Conferência Internacional sobre Concreto em Condições Severas-Ambiente e Carregamento, em Nanjing**. 2013. pág. 1-11.

SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

SULE, M.; BREUGEL, K. V. The effect of reinforcement on early-age cracking due to autogenous shrinkage and thermal effects. *Cement & Concrete Composites*, v. 26, n. 5, p. 581-587, jul. 2004.

SUN, Zhihui; VOIGT, Thomas; SHAH, Surendra P. Investigações reométricas e ultrassônicas das propriedades viscoelásticas de pastas frescas de cimento Portland. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, pág. 278-287, 2006.

TANESI, J. e FIGUEIREDO, A. Materiais com fibras de polipropileno para construção civil. Congresso Internacional de não tecidos e tecidos técnicos. Anais. 1999.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. 2. Ed. London: Thomas Telford, 1997.

TAUIL, Carlos Alberto; NESE, Flávio José Martins. Alvenaria estrutural. São Paulo: Pini, 2010.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; SANJUÁN, M. A.; ENGLAND, G. L. Free, restrained, drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetables fibres. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 537-546, mai. 2005.

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

TRALDI, C. L. et al. Polímero Superabsorvente como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos. **XXXVI Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**. Montevideu, Uruguai: [s.n.]. 2014.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2010.

TURCRY, P. Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: influence de la formation. 2004. 23f. Tese (doutorado em engenharia civil) - Ecole Centrale de Nantes, Nantes, França, 2004.

WANG, W.; WANG, A. Synthesis and swelling properties of pH-sensitive semi-IPN superabsorbent hydrogels based on sodium alginate-poly (sodium acrylate) and polyvinylpyrrolidone. **Carbohydrate Polymers**, v. 80, n. 4, p. 1028-1036, 2010.

WANG, F.; YANG, J.; CHENG, H.; WU, J. e LIANG, X. Study on Mechanism of Desorption Behavior of Saturated Superabsorbent Polymers in Concrete. In: **ACI Materials Journal**. Vol. 112, No. 3, Pg.: 463-470, 2015.

WYRZYKOWSKI, Mateusz et al. Modelagem da migração de água durante a cura interna com polímeros superabsorventes. **Revista de materiais em engenharia civil**, v. 24, n. 8, pág. 1006-1016, 2012.

WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Construction and Building Materials** 28. Elsevier. 2012. p.571-583

VAN DAM, T. J. et al. Final Report for Early-Opening-to-Traffic Portland Cement Concrete for Pavement Rehabilitation. NCHRP Web-Only Document 76 (Project 18-4B), 2005. Disponível em: [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_w76.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w76.pdf). Acesso em: 15 abr. 2021.

VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele. Autocura em materiais cimentícios - uma revisão. **Materiais**, v. 6, n. 6, pág. 2182-2217, 2013.

VEGAS, I.; AZKARATE, A.; JUARRERO, A.; FRIAS, M. Design and performance of masonry made with recycled concrete aggregates. **Materiales Construcción**, vol 59, p. 5-18. 2009.

VERNET, C. e CADORET, G. **Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des B.H.P. pendant les premiers jours.** In: Les Bétons à Hautes Performances – Caractérisation, Durabilité, Applications; Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris; ISBN 2-85978-187-0; pp 255-266. 1992.

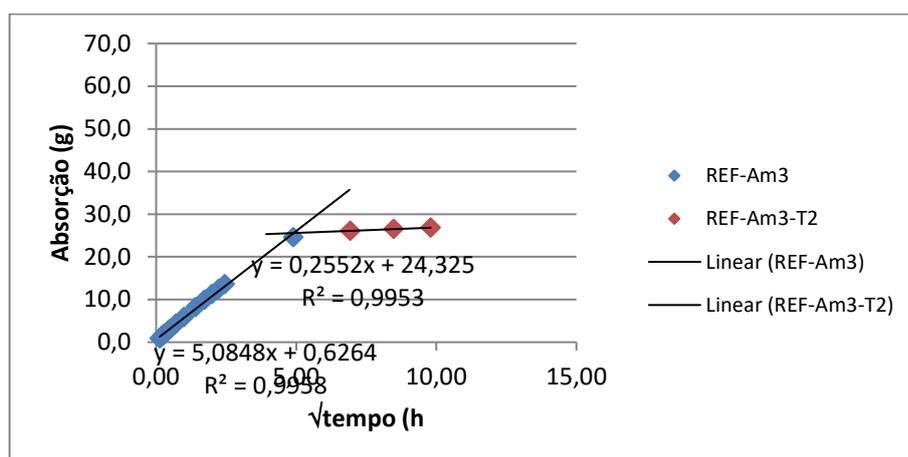
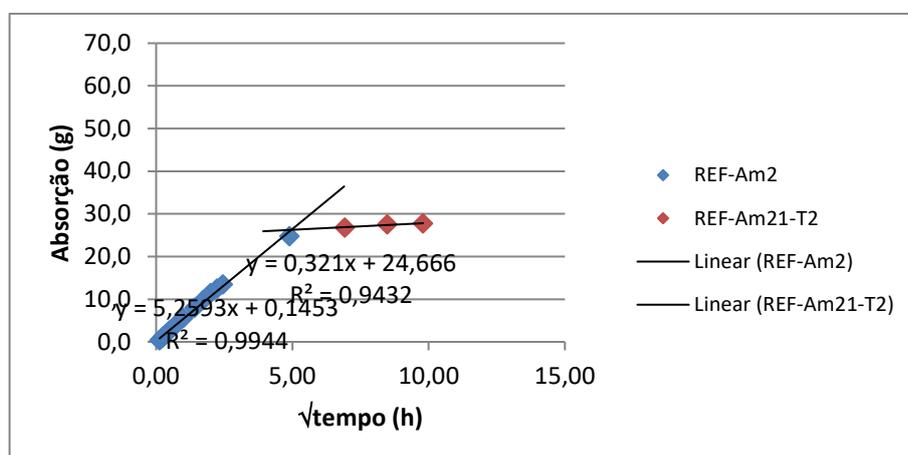
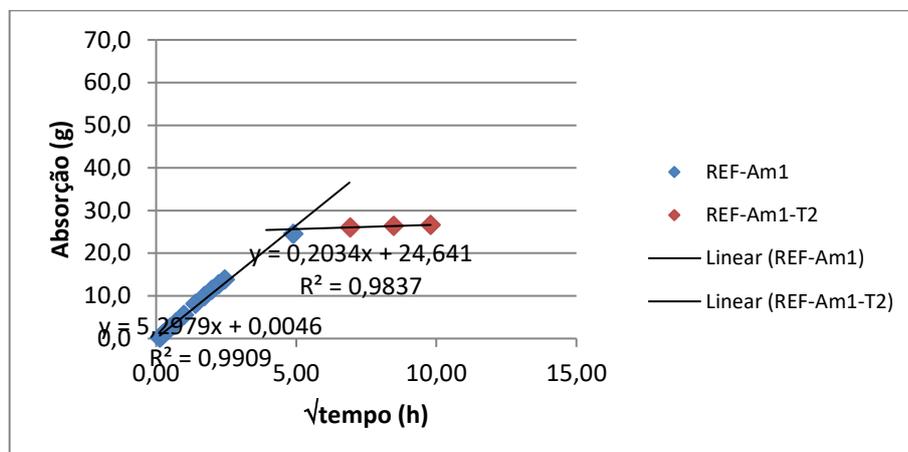
VILLARREAL, B. V. H.; CROCKER, D. A. Better Pavements through Internal Hydration Taking lightweight aggregate to the streets. v. 3, n. February, 2007.

ZHUTOVSKY, Semion; KOVLER, Konstantin. Cinética de hidratação de sistemas cimentícios de alto desempenho sob diferentes condições de cura. **Materiais e Estruturas**, v. 46, n. 10, pág. 1599-1611, 2013.

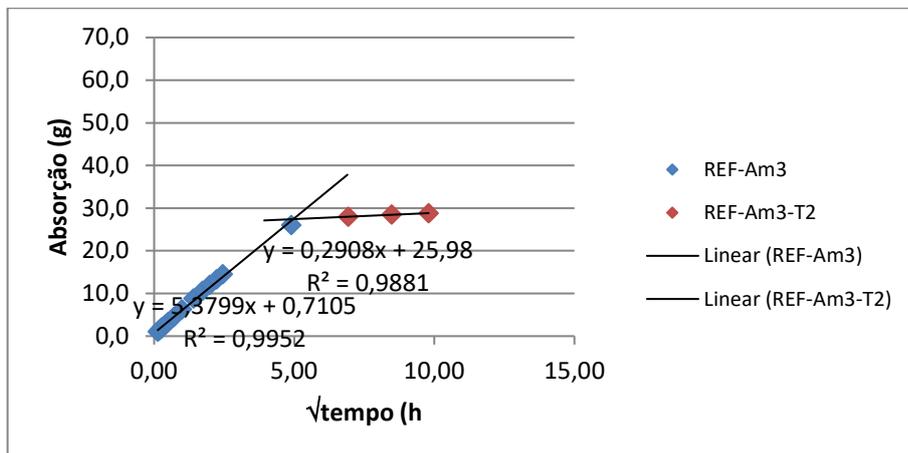
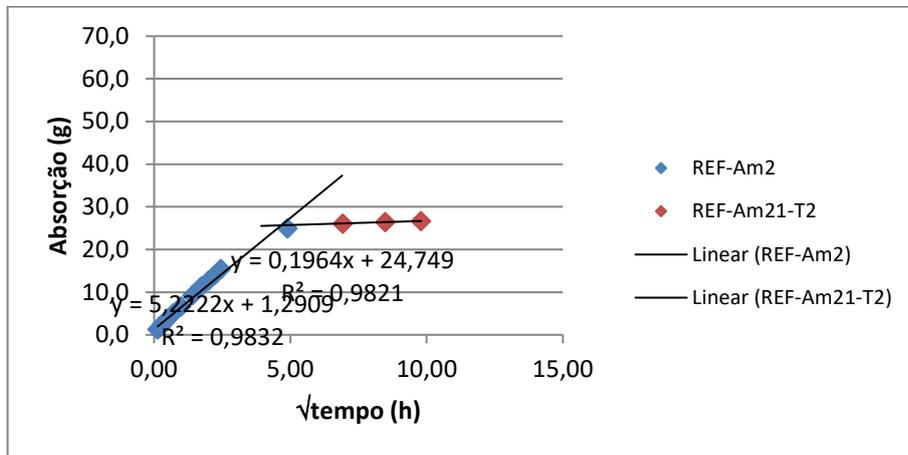
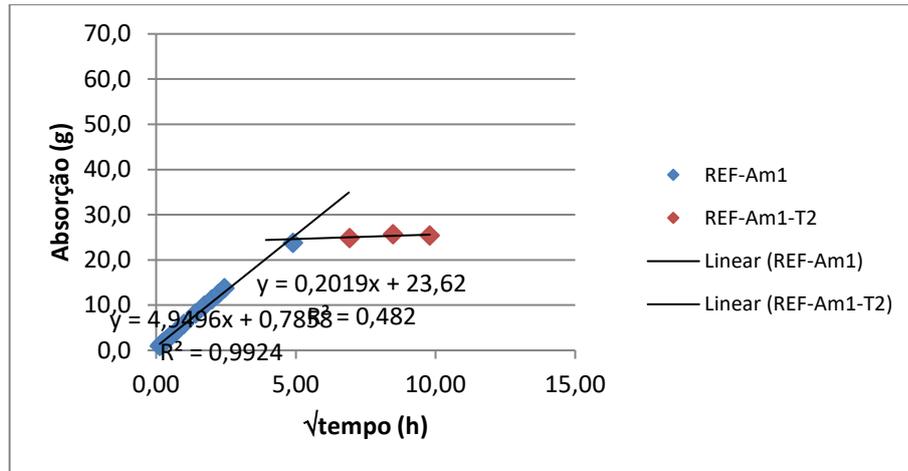
ZOHURIAAN-MEHR, M.J. e KABIRI, K. Superabsorbent Polymer Materials: A Review. In: Iranian Polymer Journal, P.P. 451-477, 2008

## 7 APÊNDICE A – ENSAIOS DE ABSORÇÃO

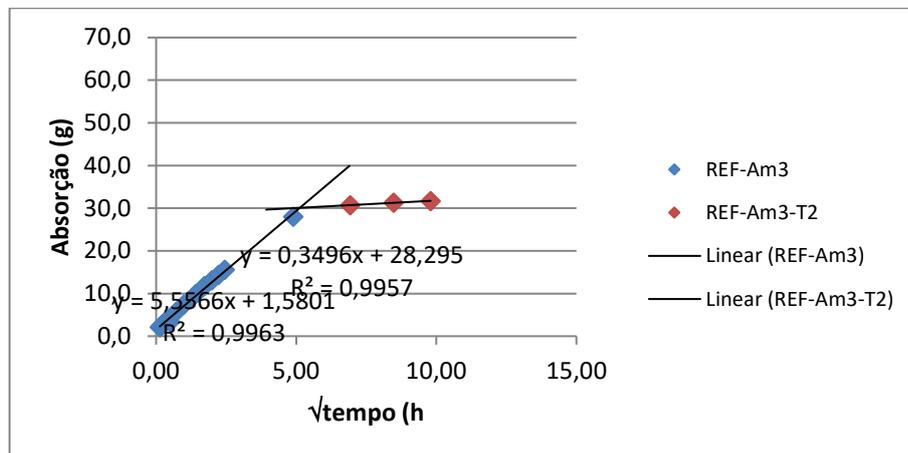
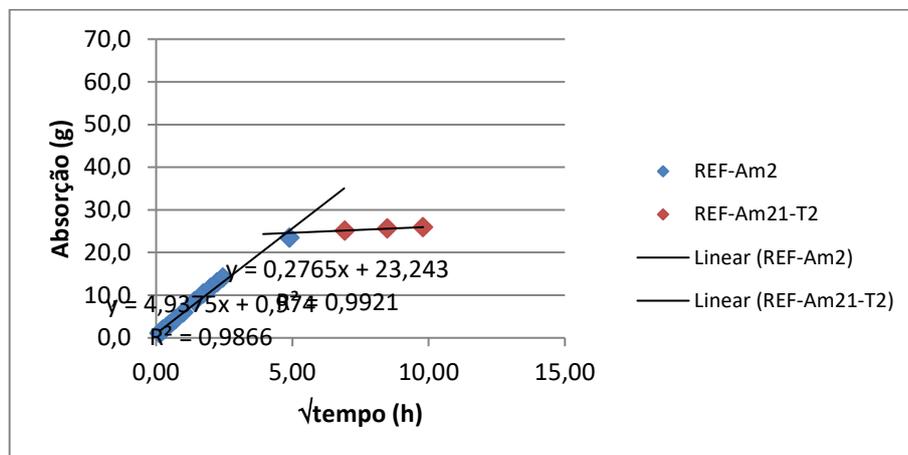
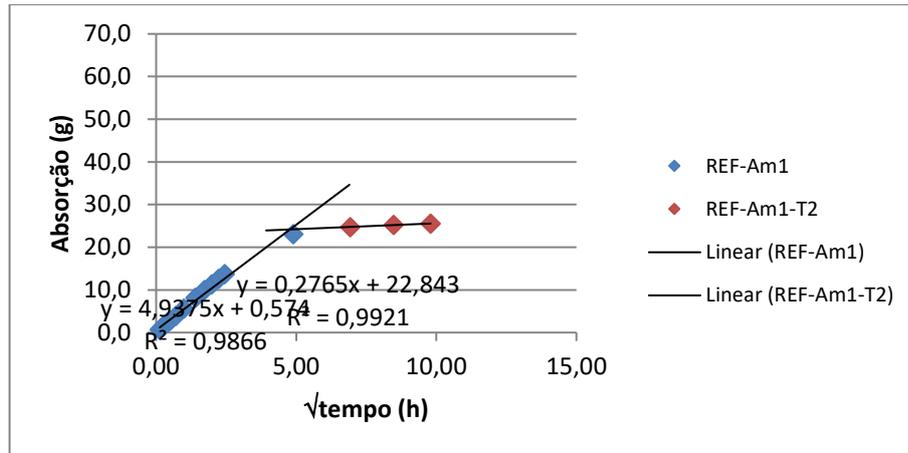
### TRAÇO RICO100% - 7 DIAS SEM PSAR



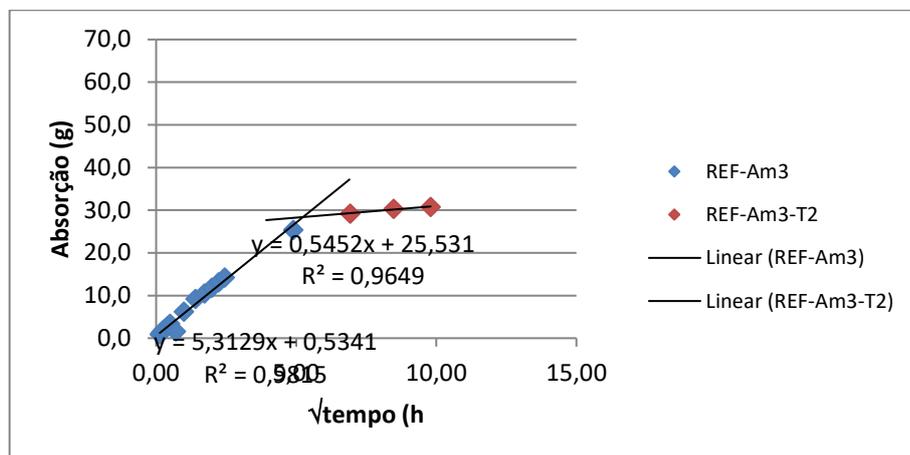
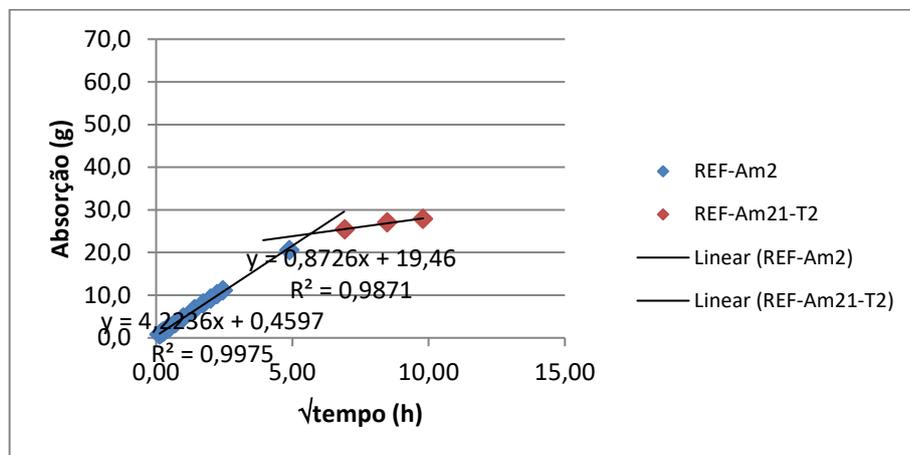
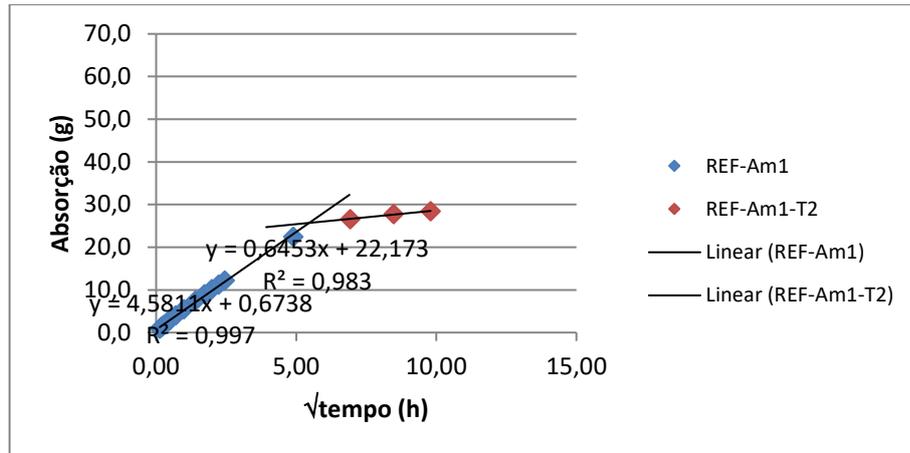
## MÉDIO 100% - 7 DIAS SEM PSAR



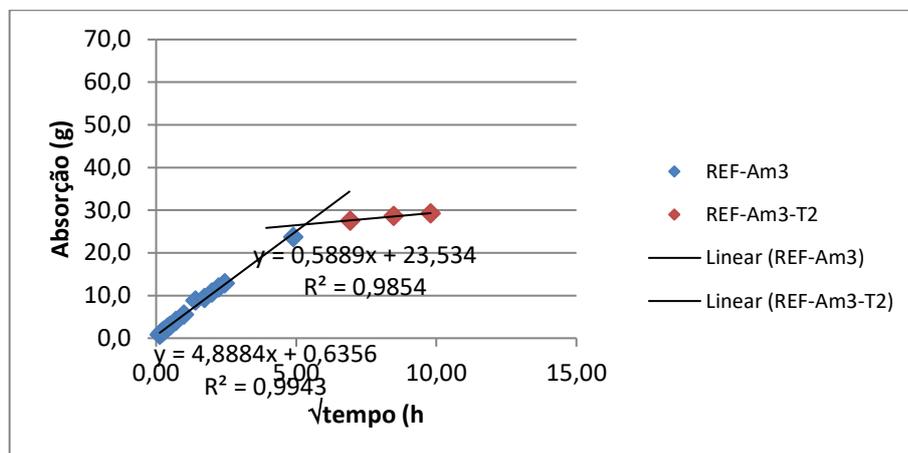
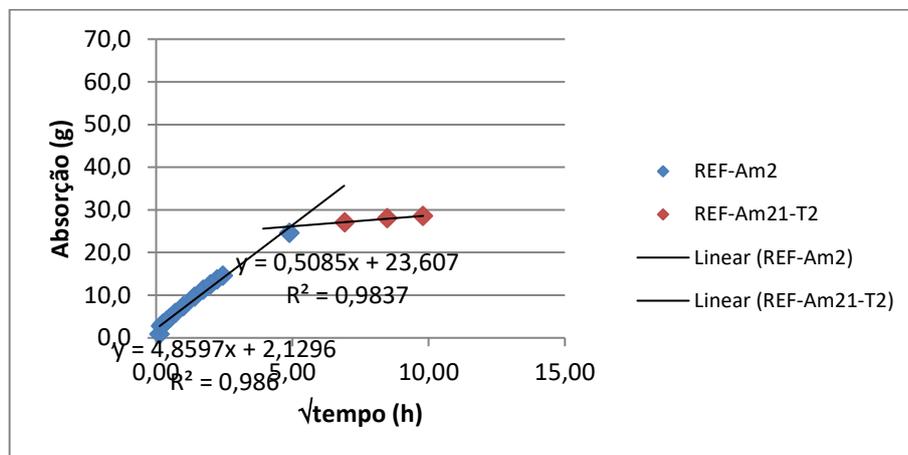
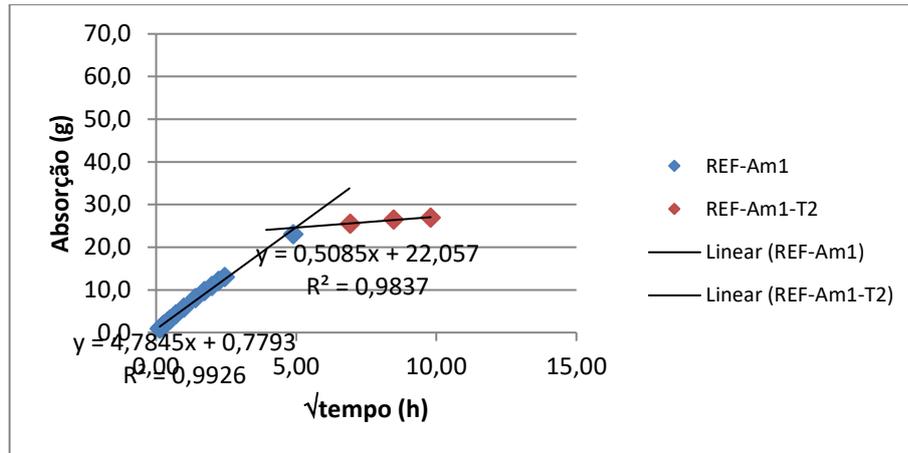
## POBRE 100% - 7 DIAS SEM PSAR



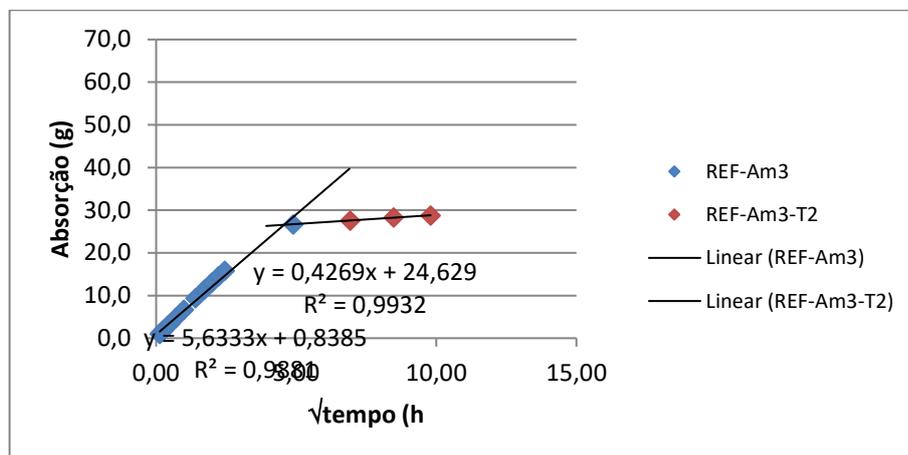
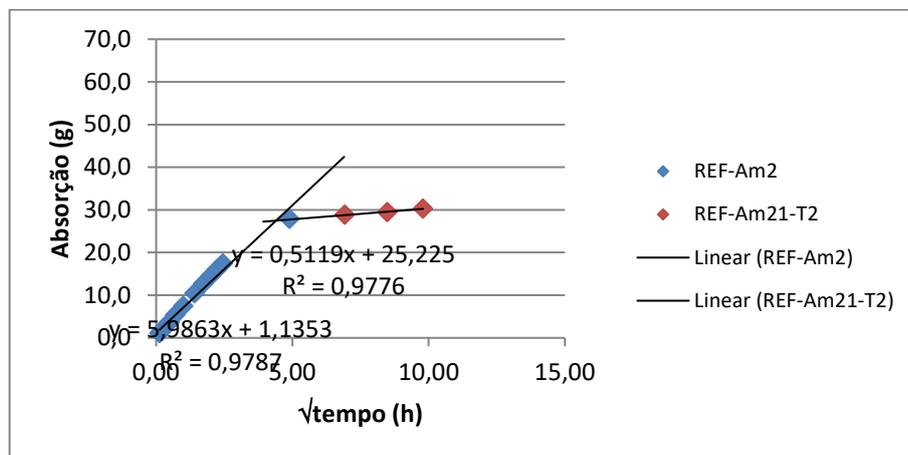
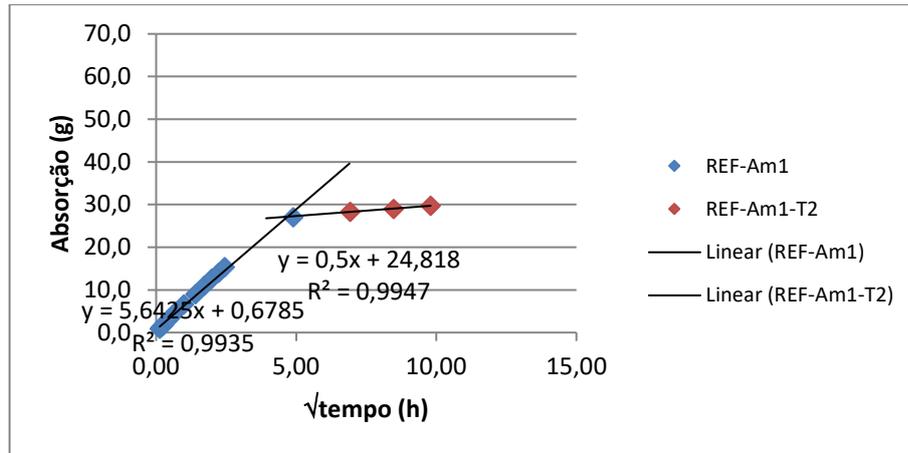
RICO 60% - 7 DIAS SEM PSAR



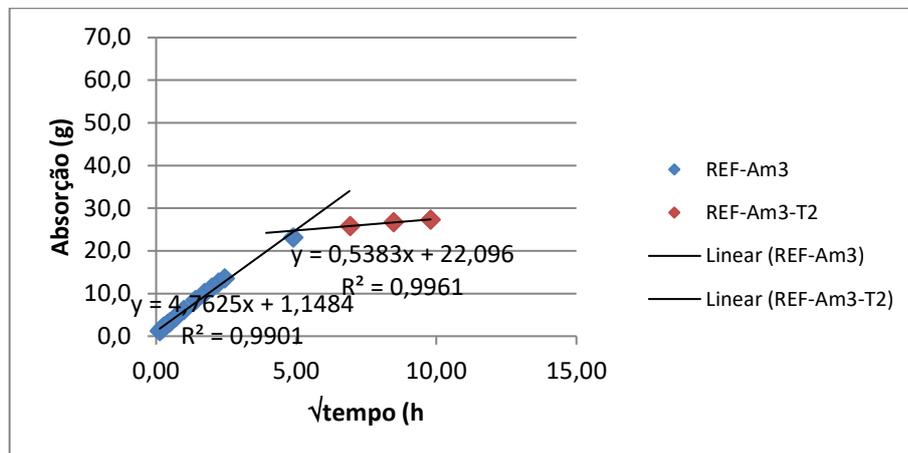
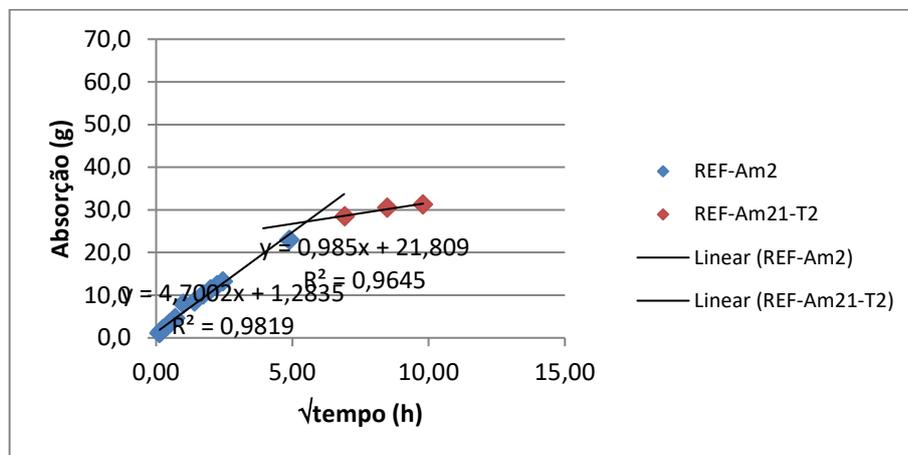
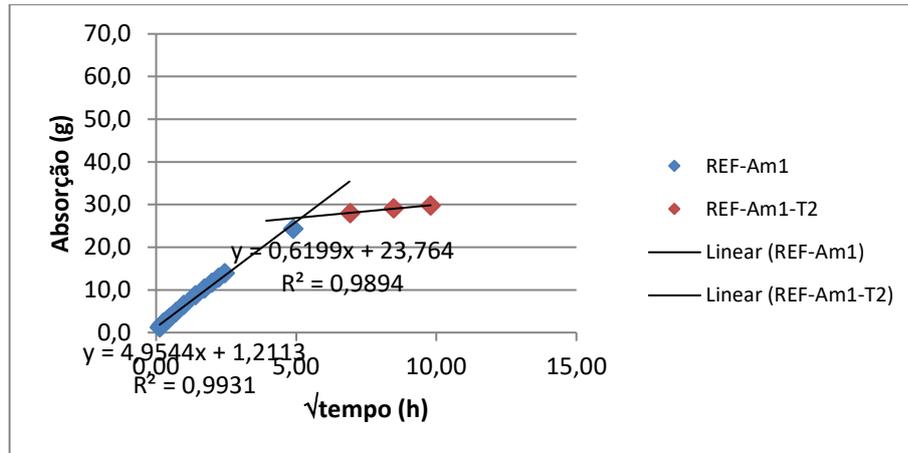
## MÉDIO 60% - 7 DIAS SEM PSAR



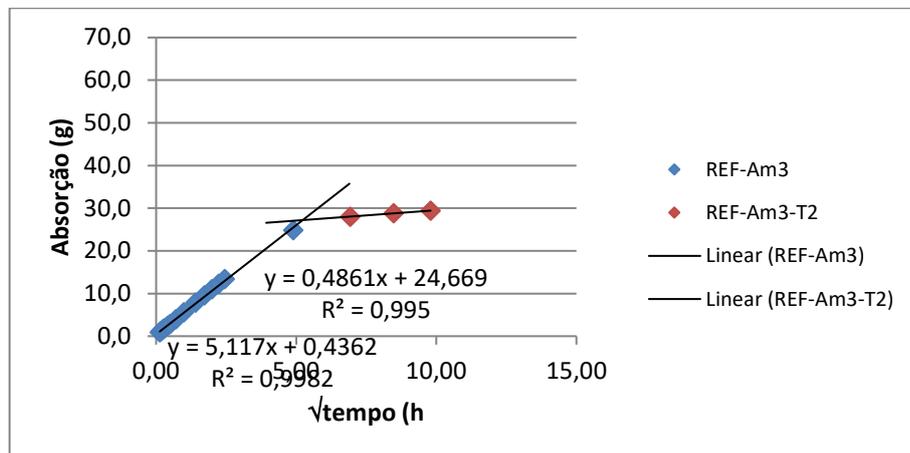
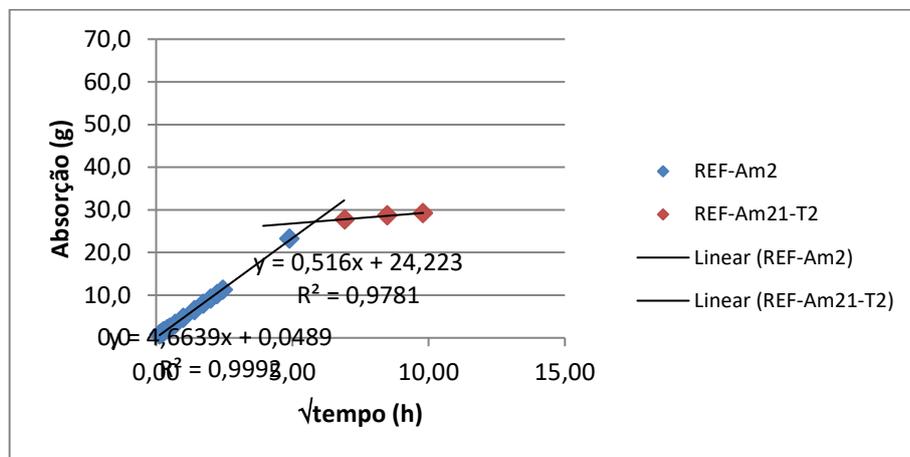
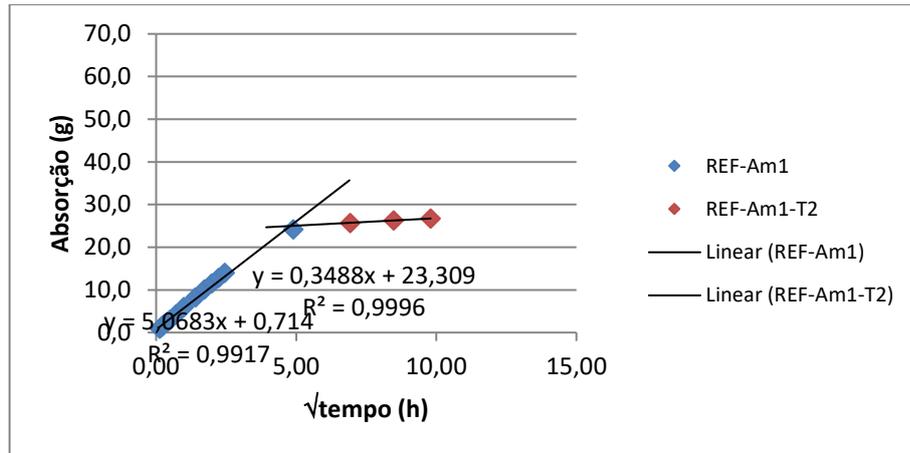
## POBRE 60% - 7 DIAS SEM PSAR



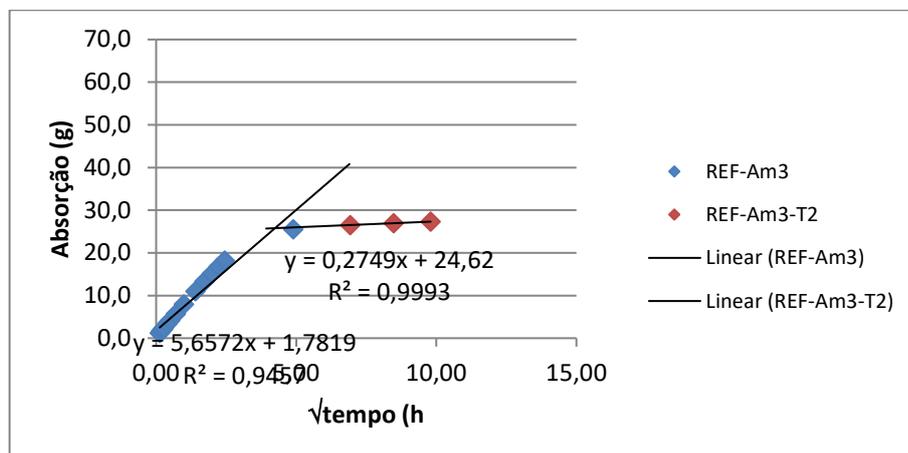
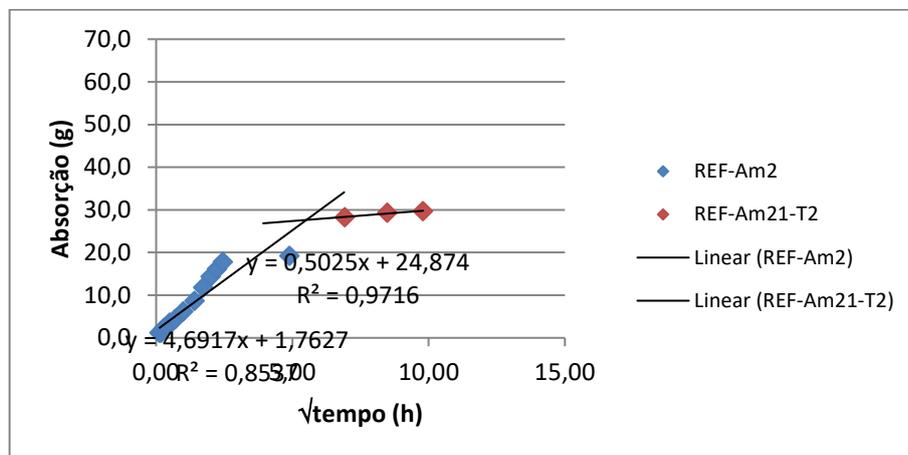
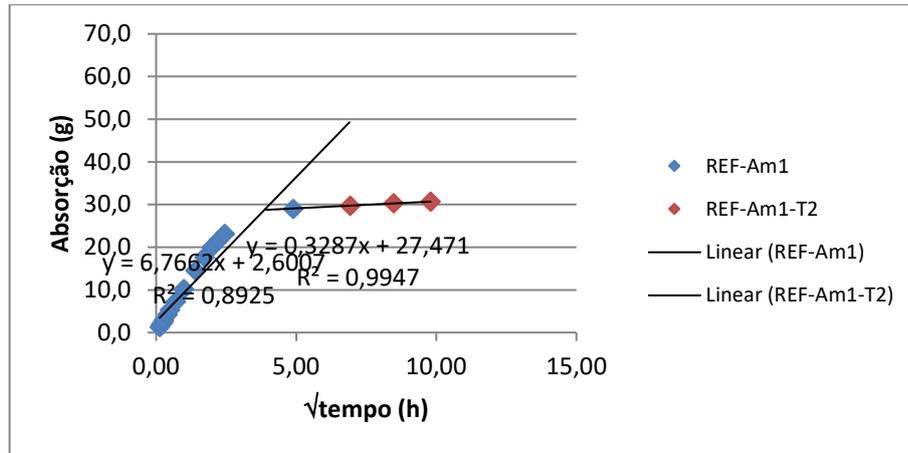
## RICO 30% - 7 DIAS SEM PSAR



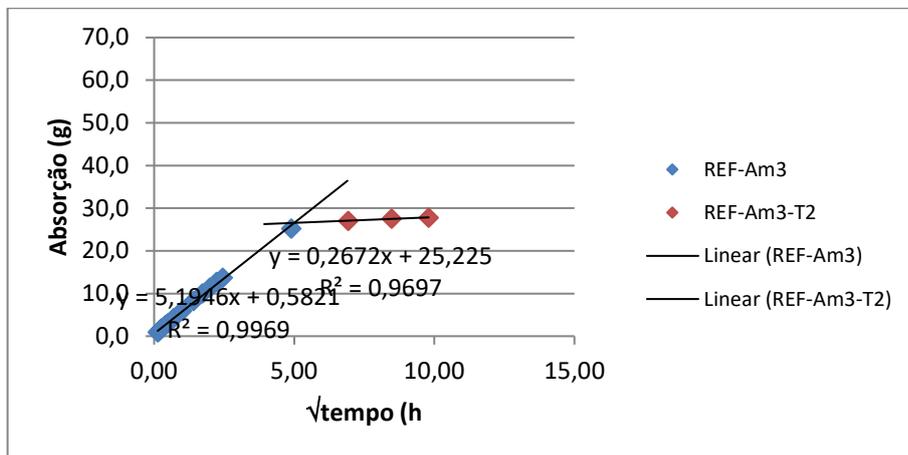
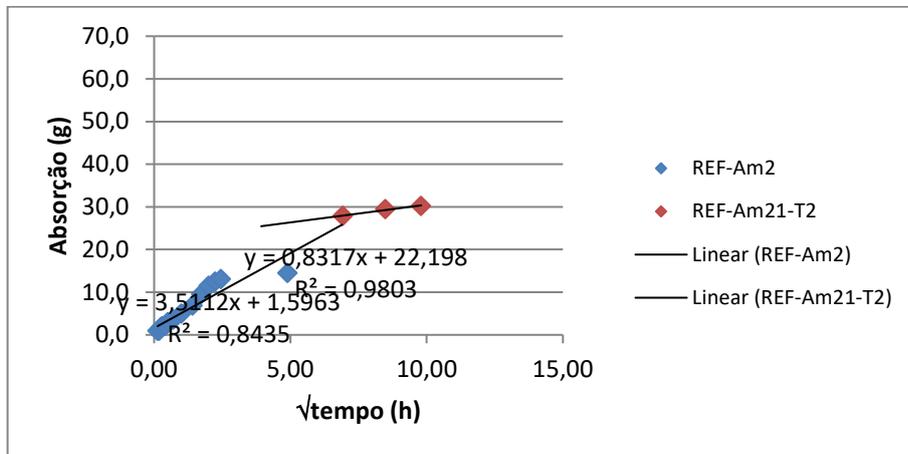
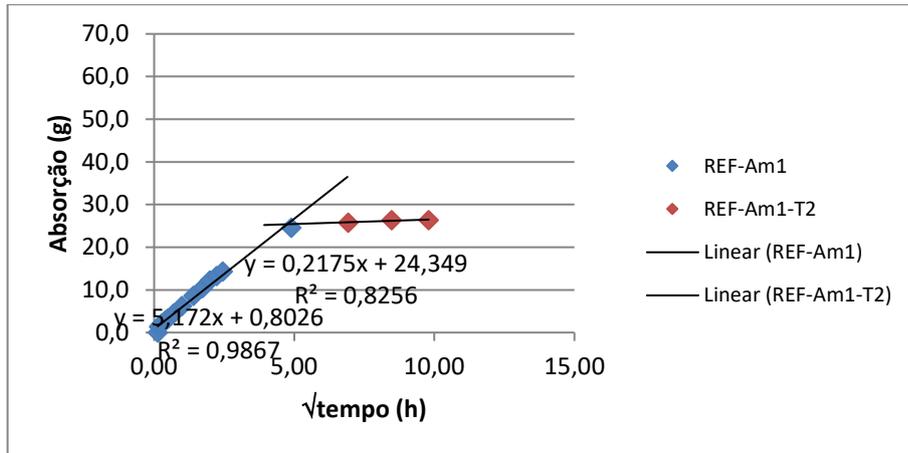
MÉDIO 30% - 7 DIAS SEM PSAR



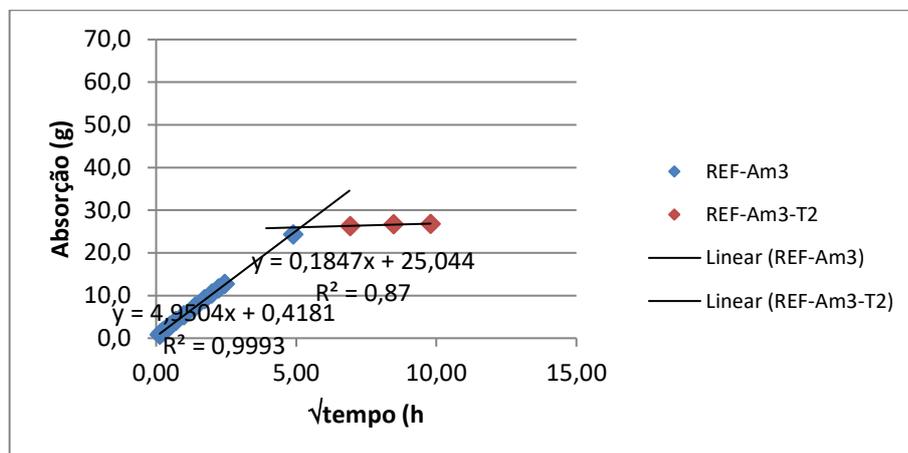
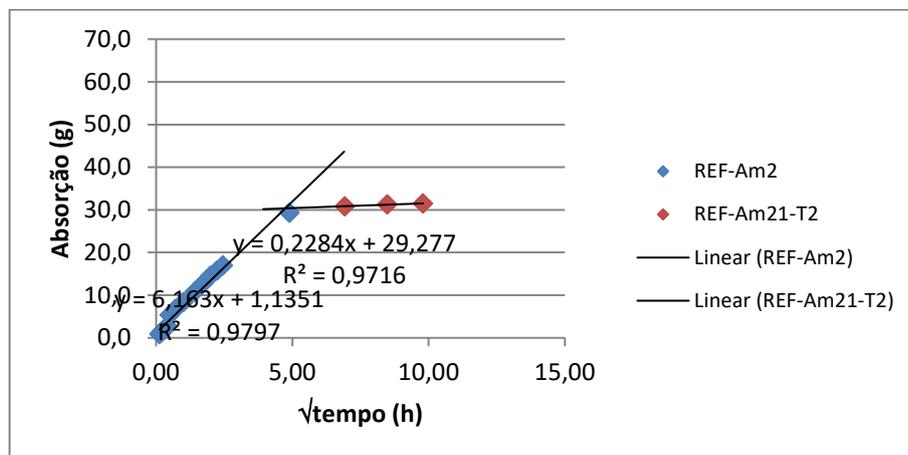
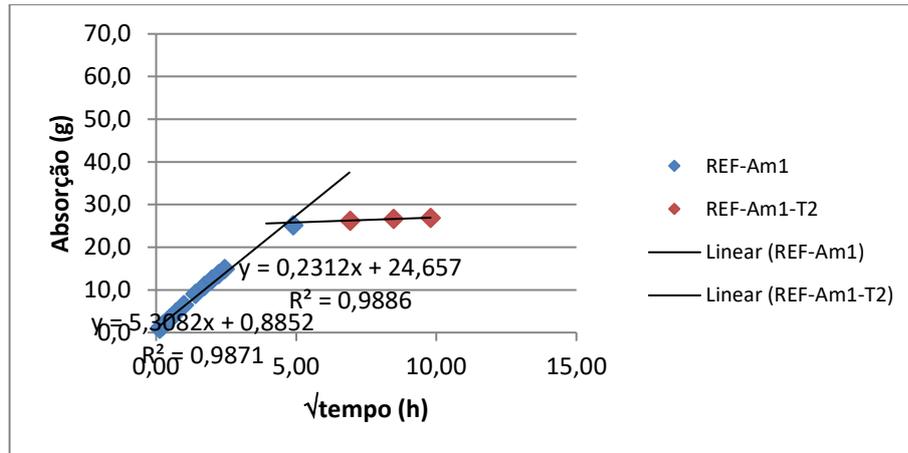
## POBRE 30% - 7 DIAS SEM PSAR



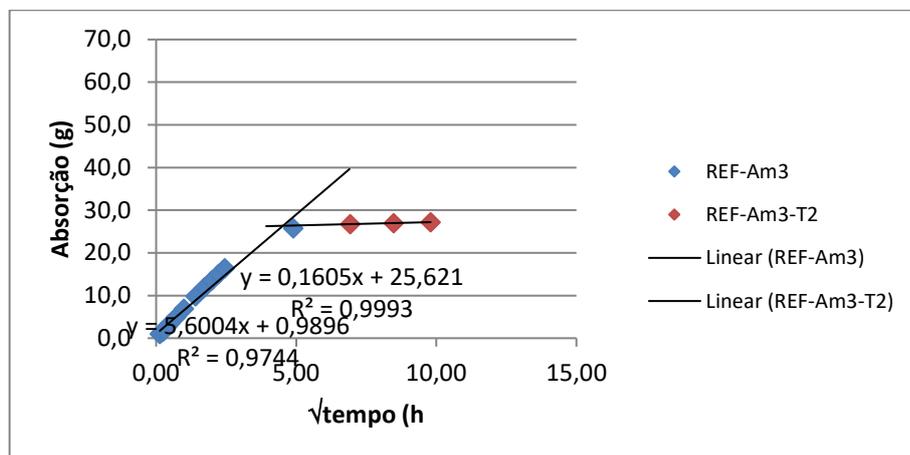
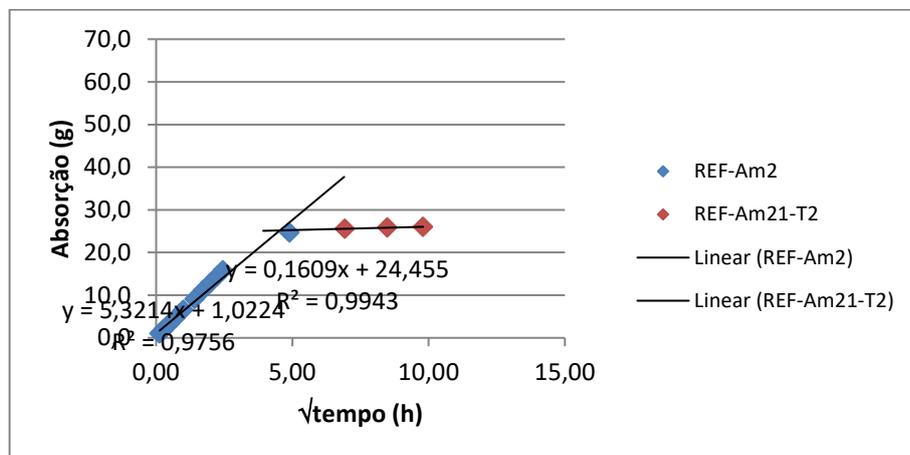
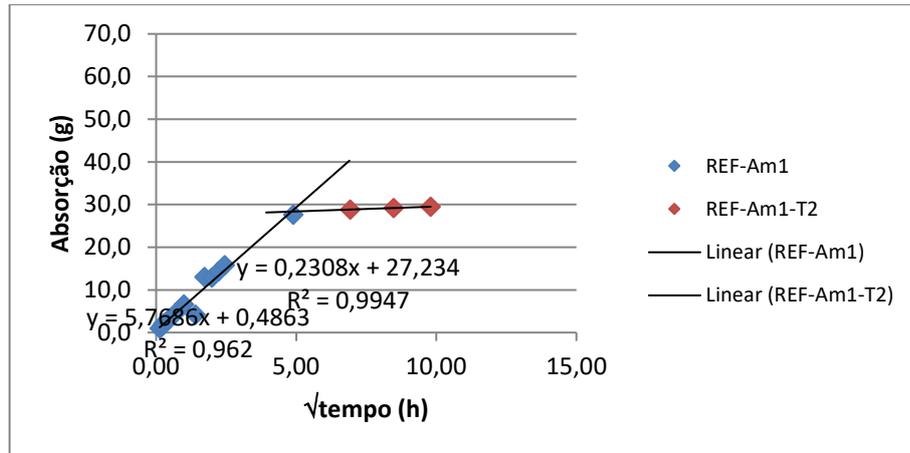
RICO 100% - 7 DIAS COM PSAR



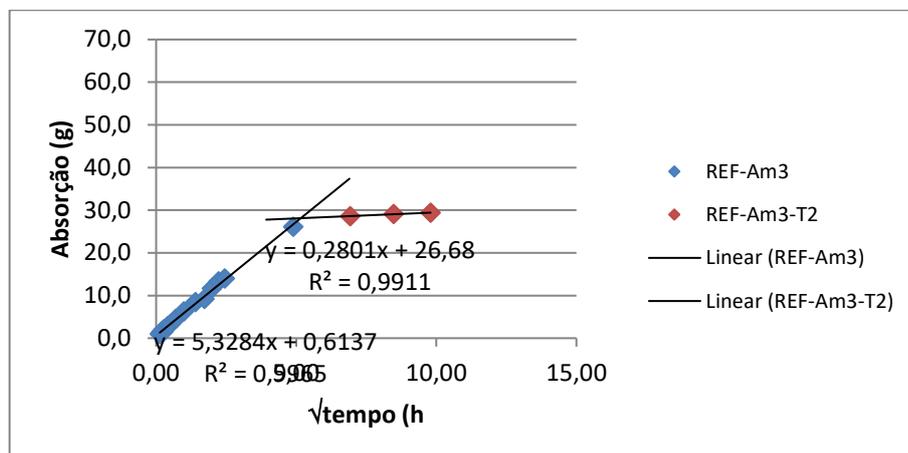
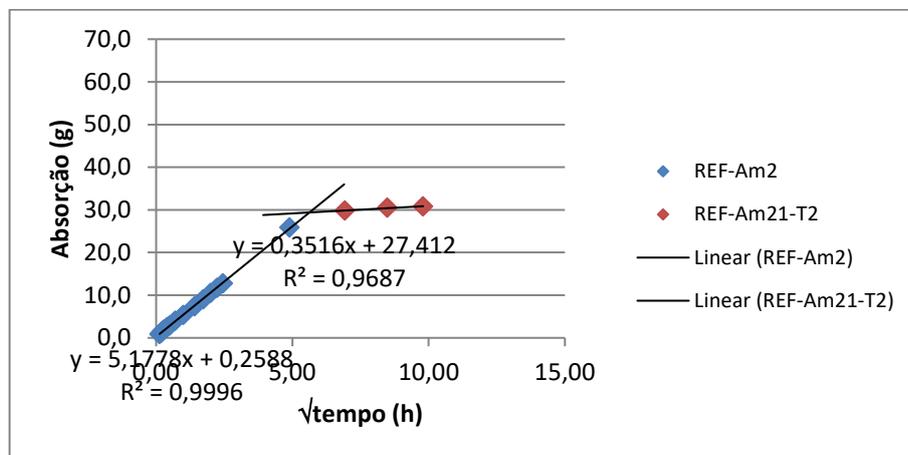
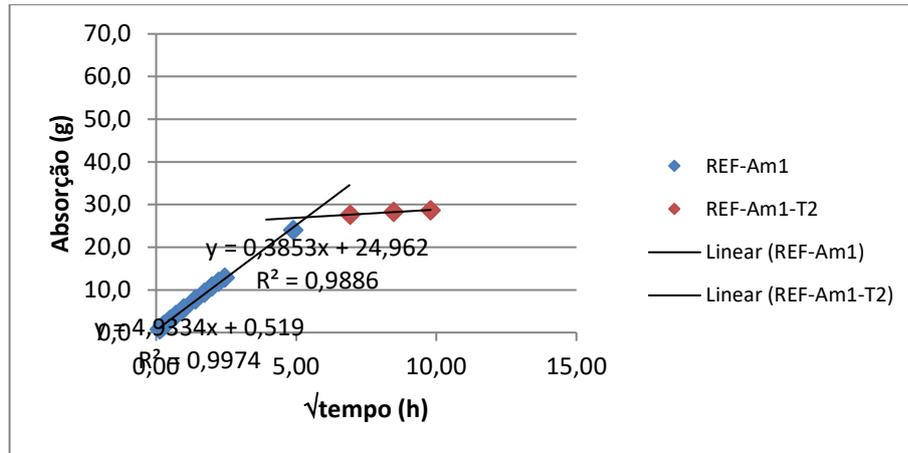
## MÉDIO 100% - 7 DIAS COM PSAR



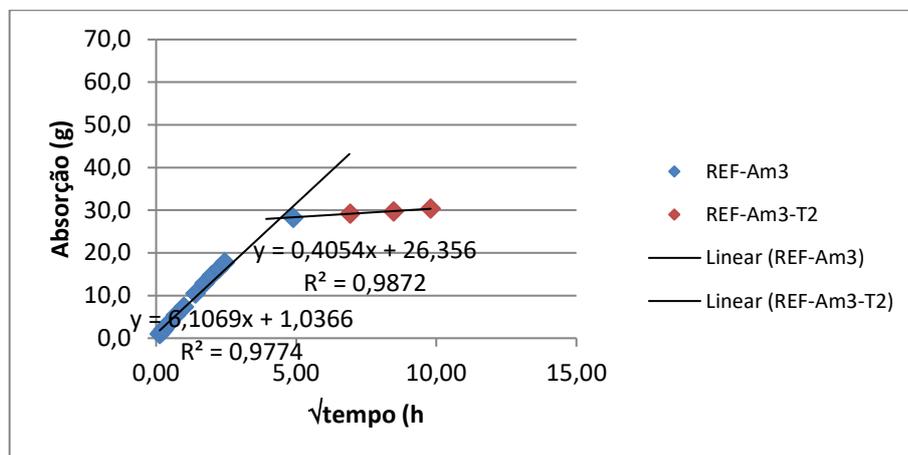
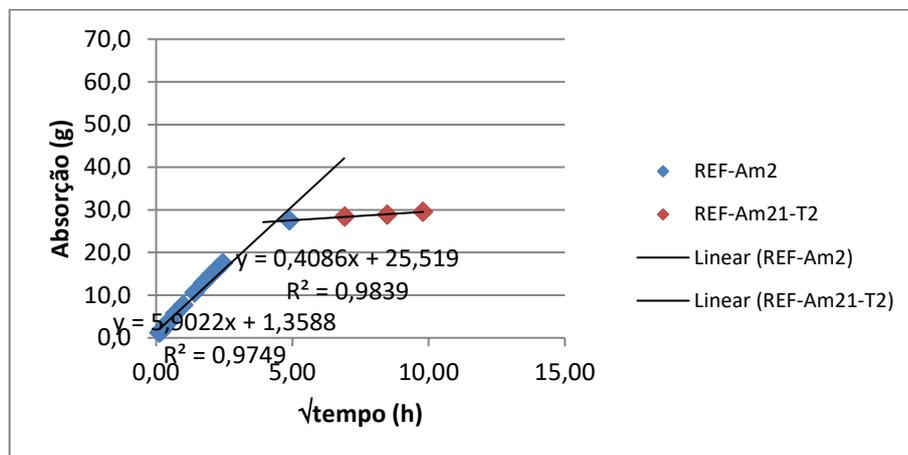
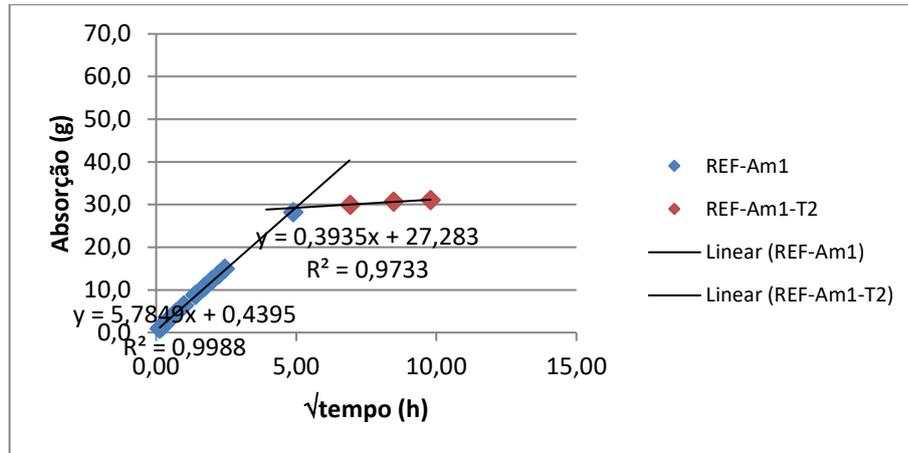
POBRE 100% - 7 DIAS COM PSAR



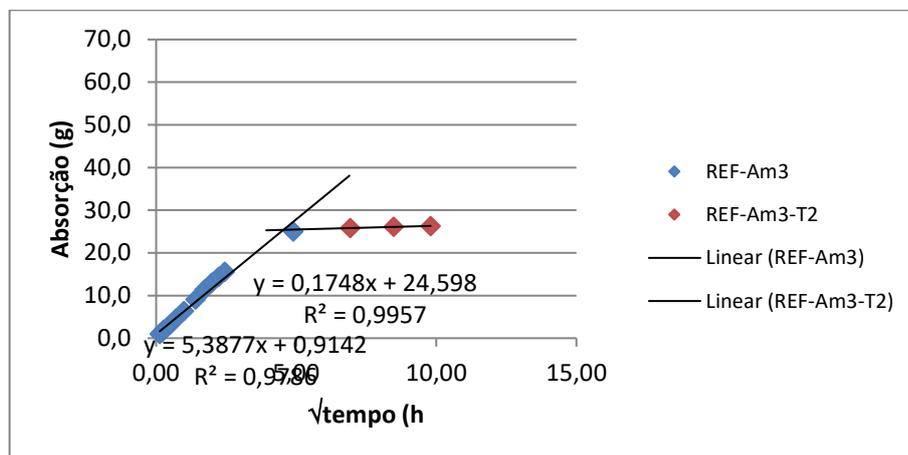
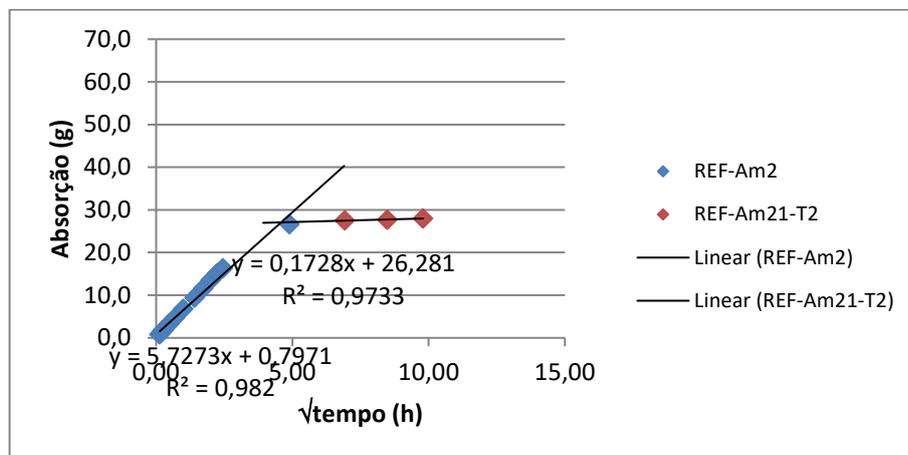
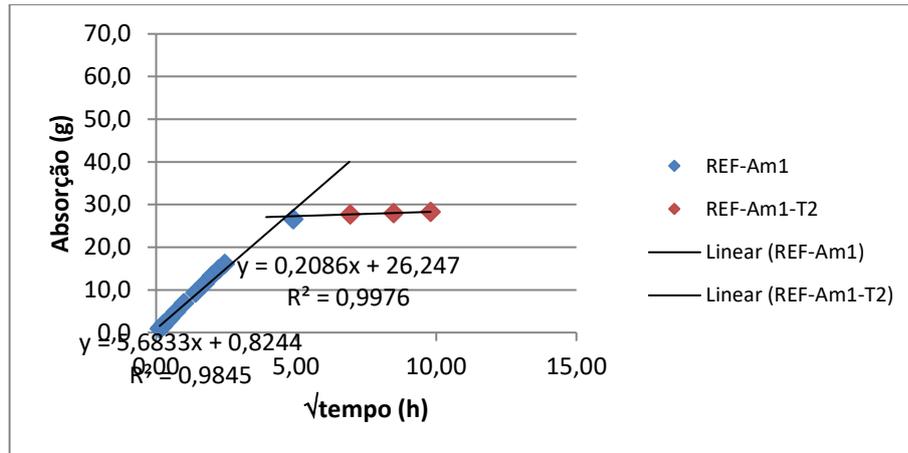
## RICO 60% 7 DIAS COM PSAR



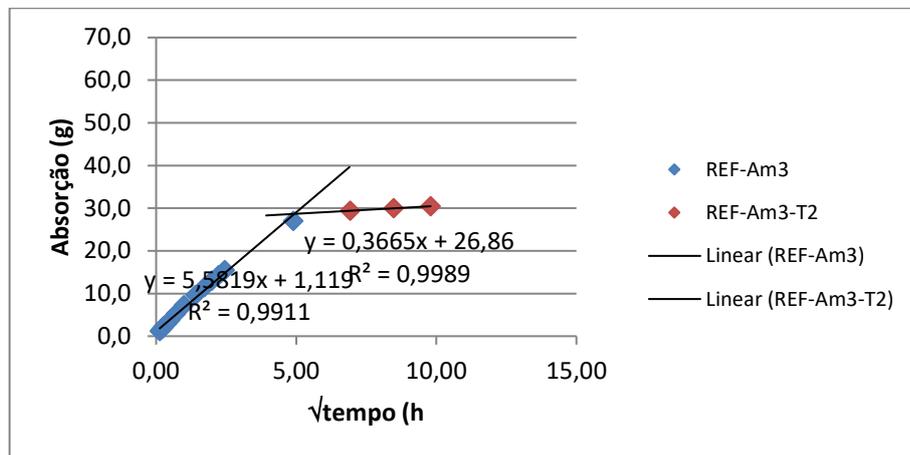
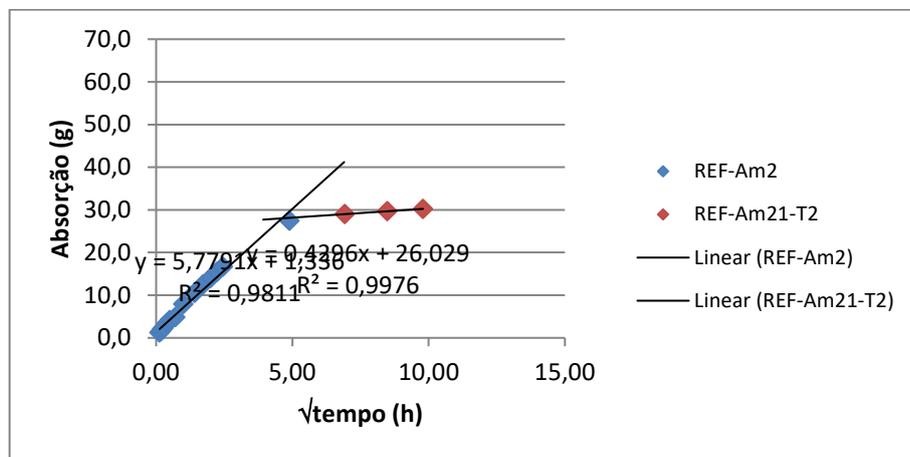
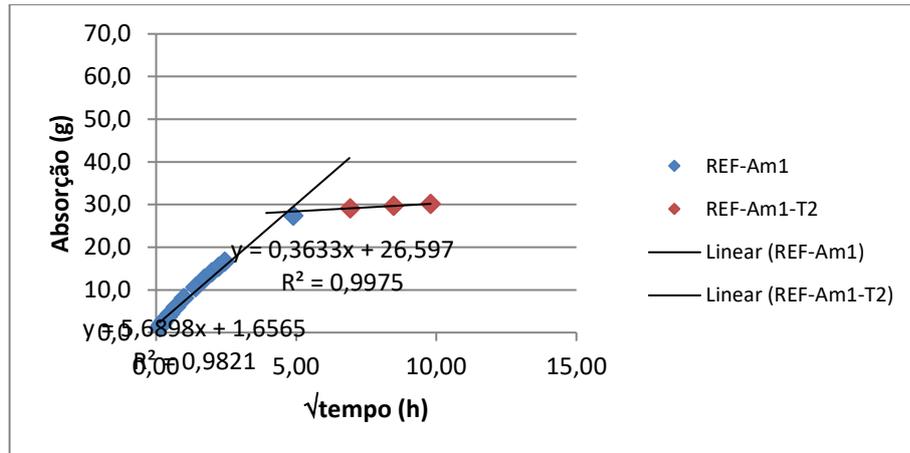
## MÉDIO 60% - 7 DIAS COM PSAR



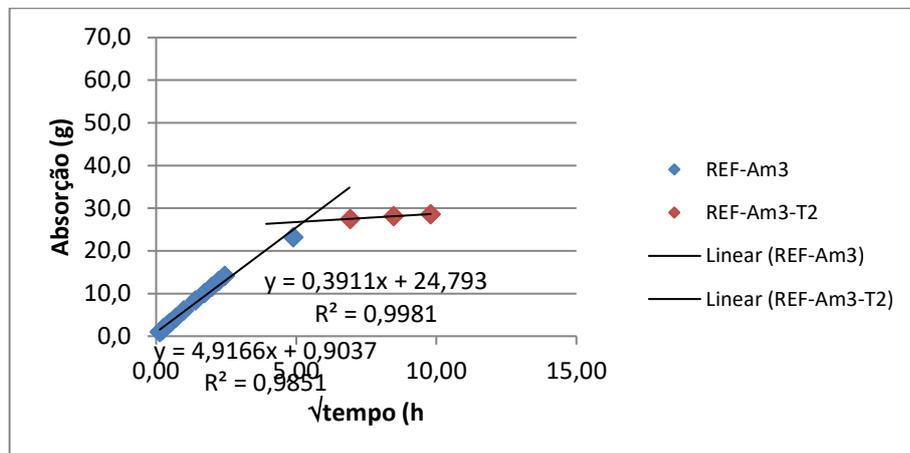
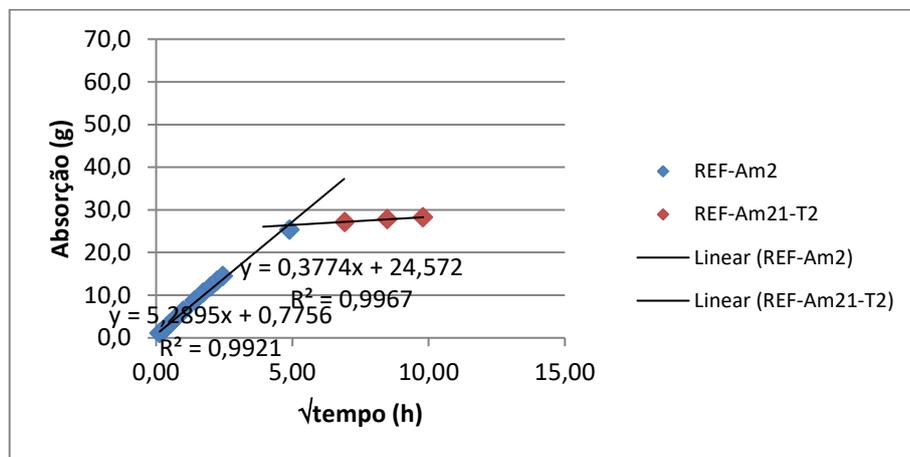
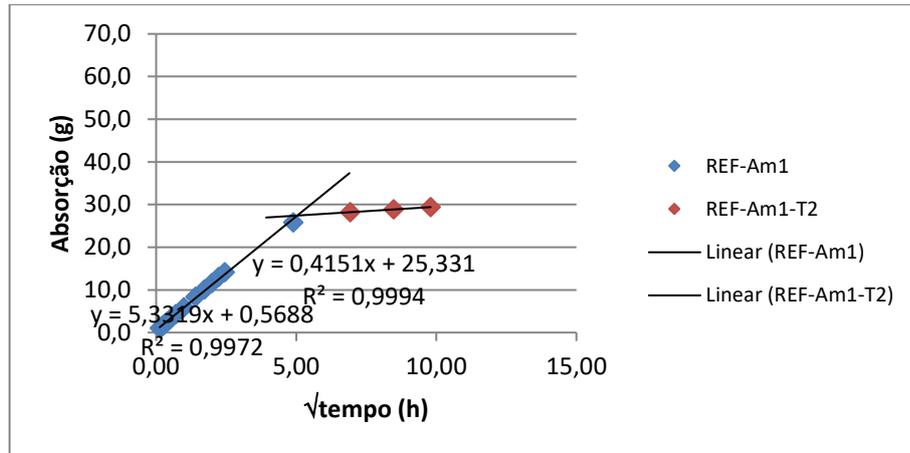
## POBRE 60% - 7 DIAS COM PSAR



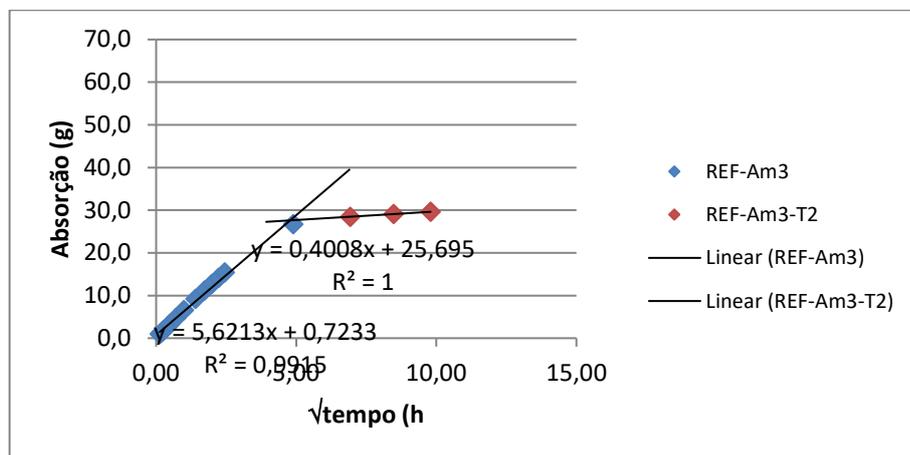
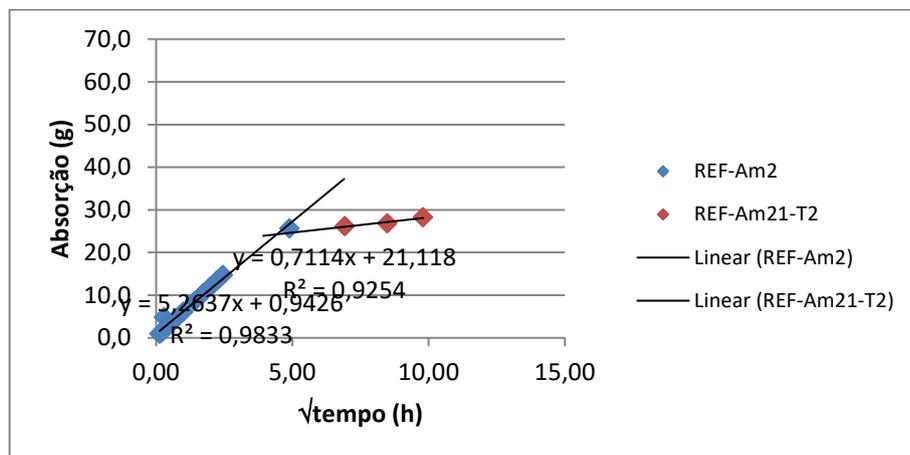
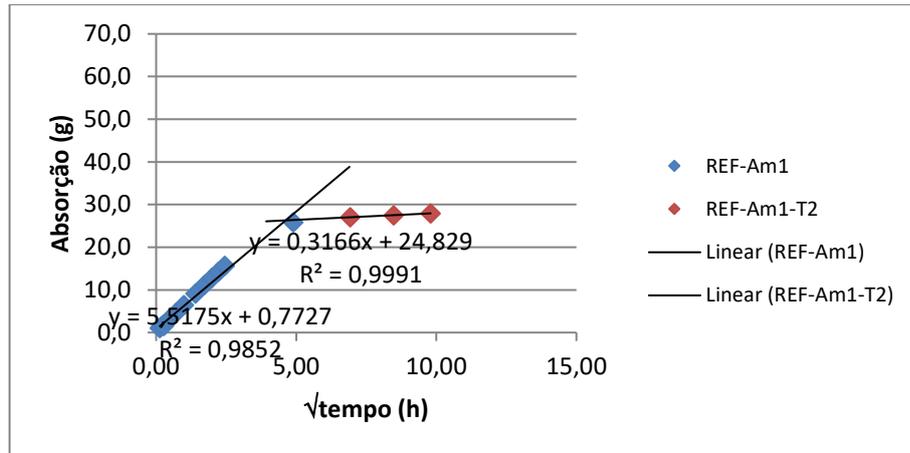
RICO 30% - 7 DIAS COM PSAR



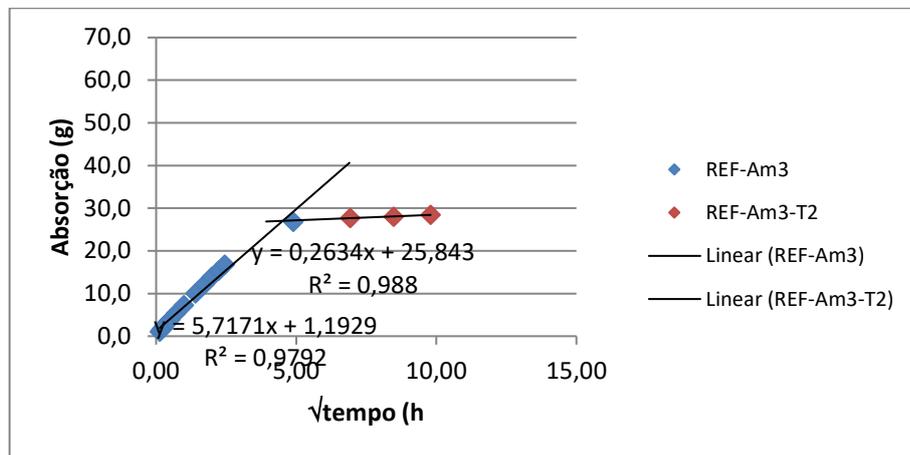
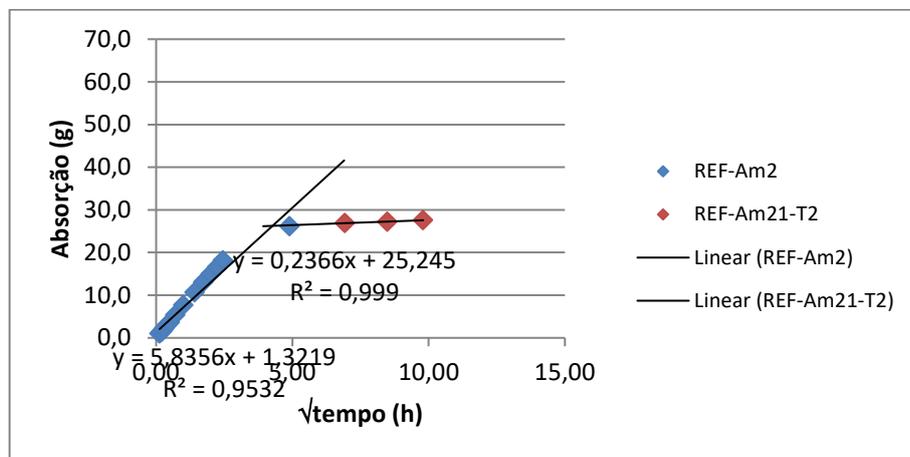
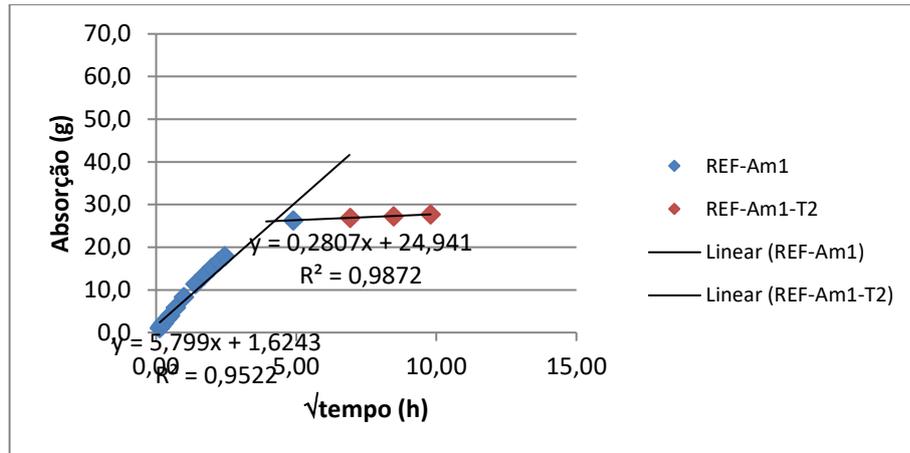
MÉDIO – 30% 7 DIAS COM PSAR



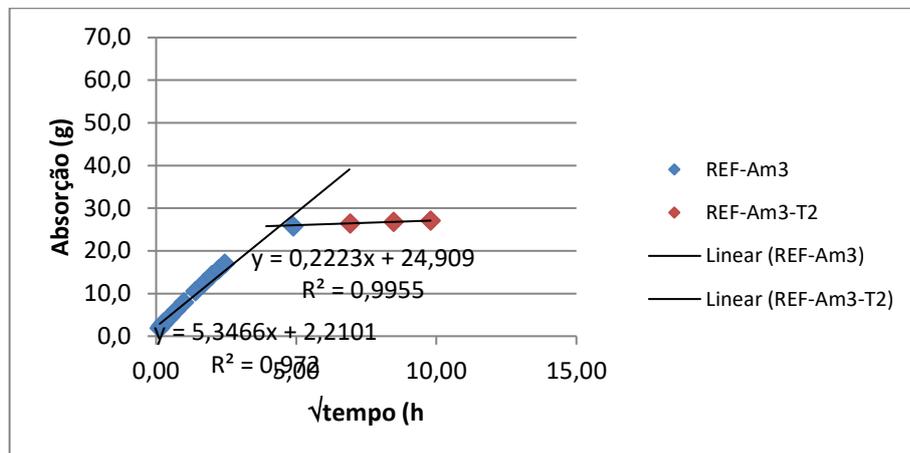
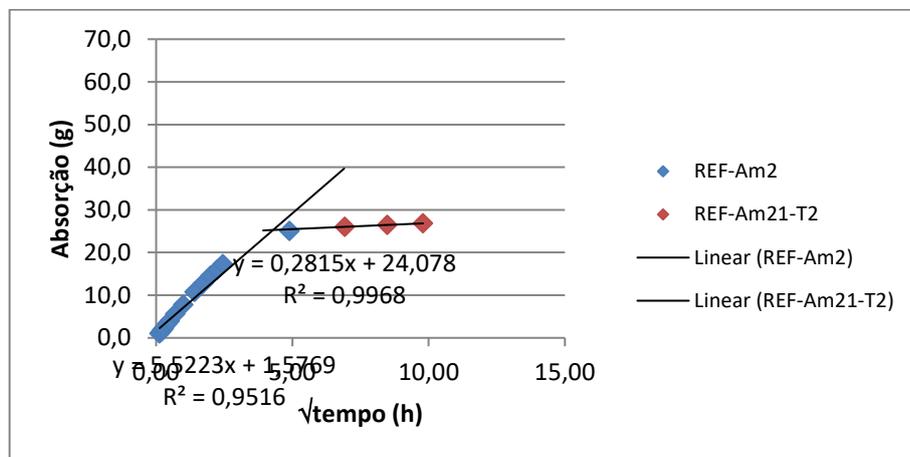
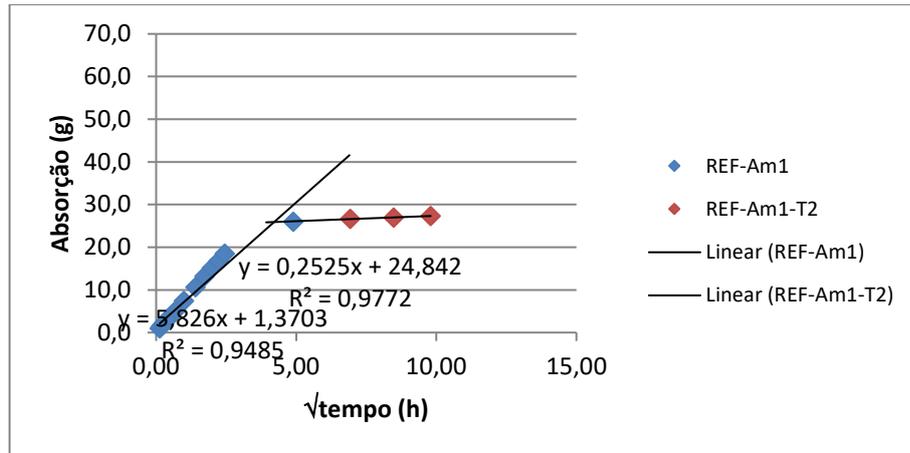
POBRE 30% - 7 DIAS COM PSAR



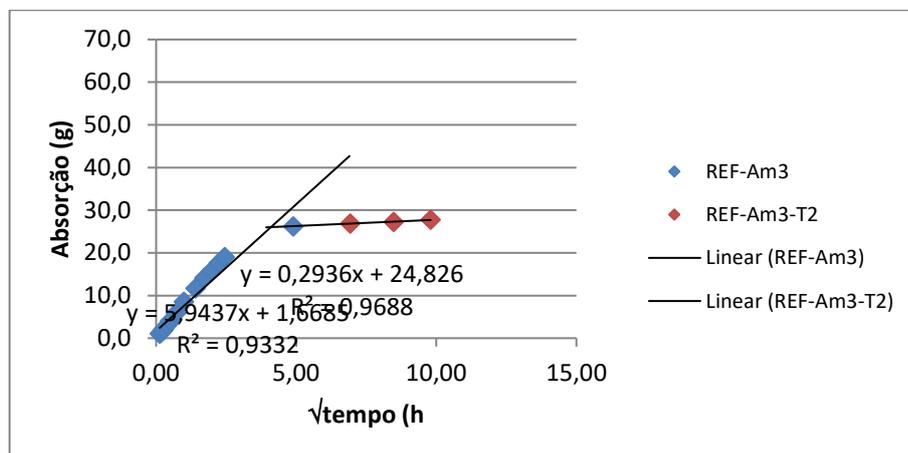
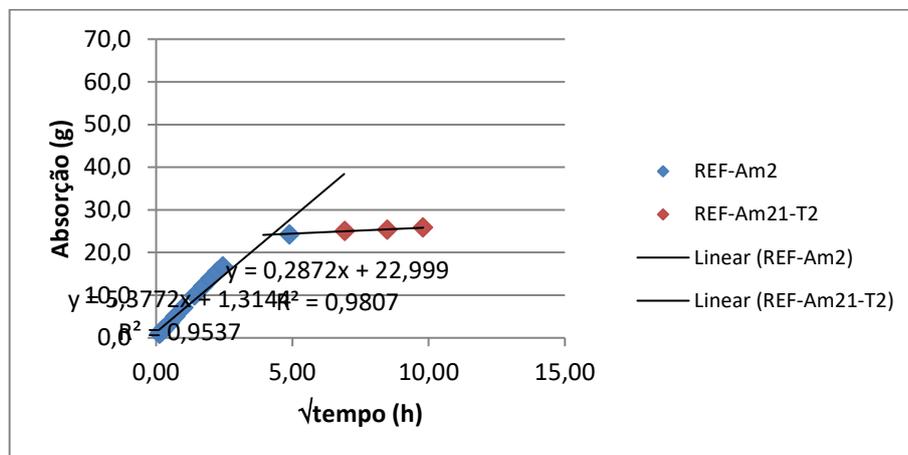
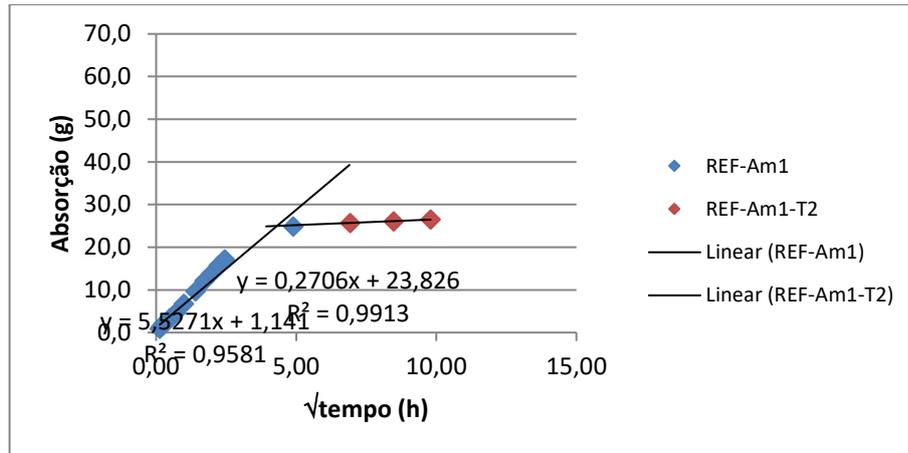
RICO 100% - 28 DIAS SEM PSAR



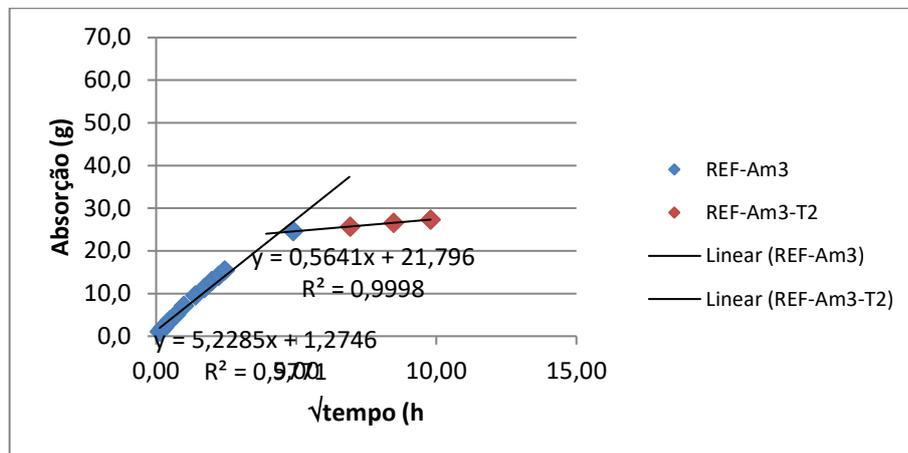
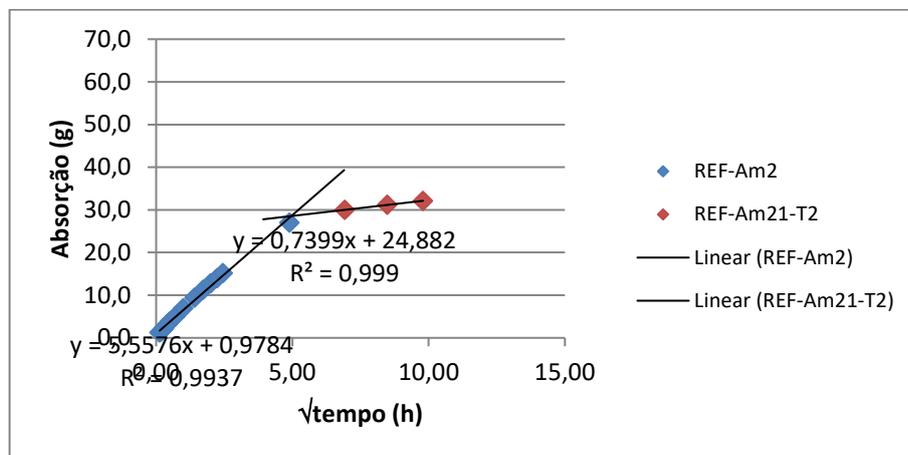
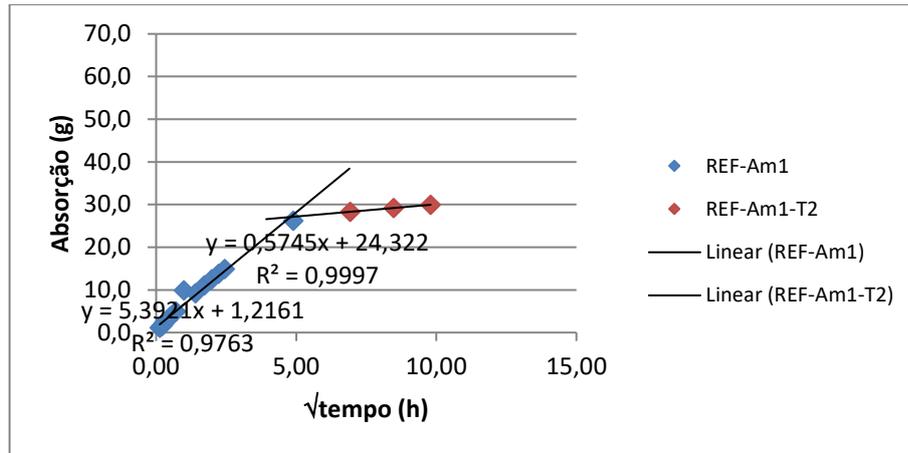
MÉDIO 100% - 28 DIAS SEM PSAR



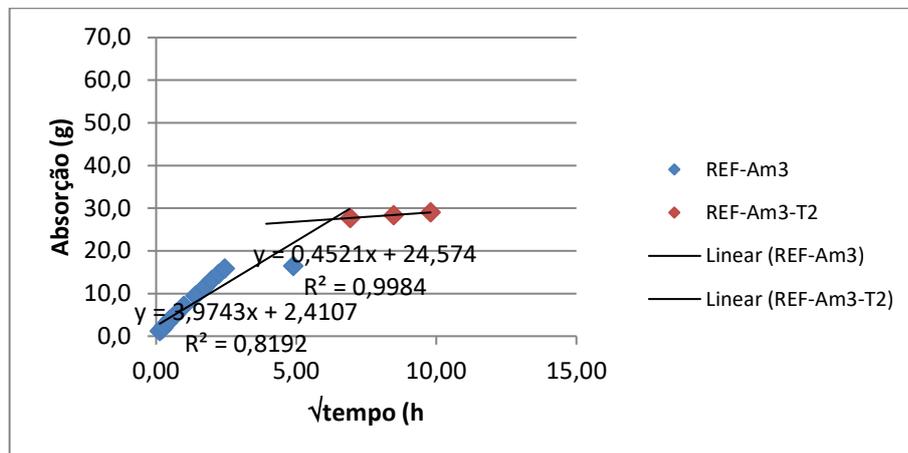
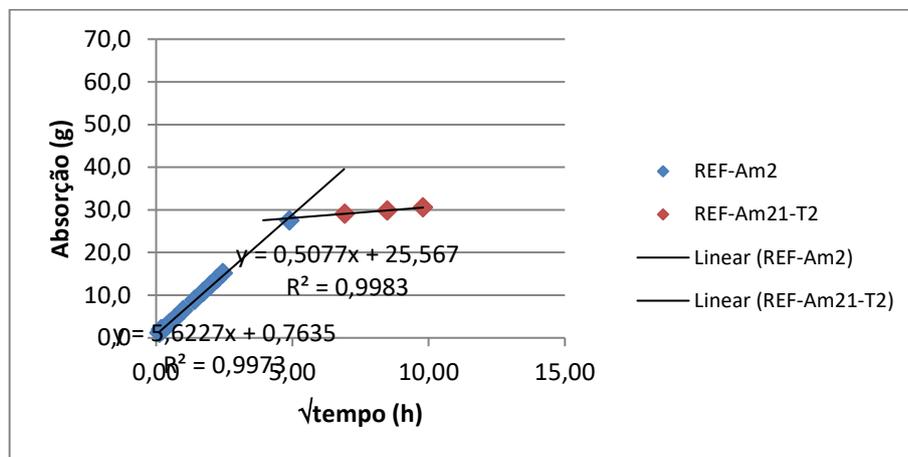
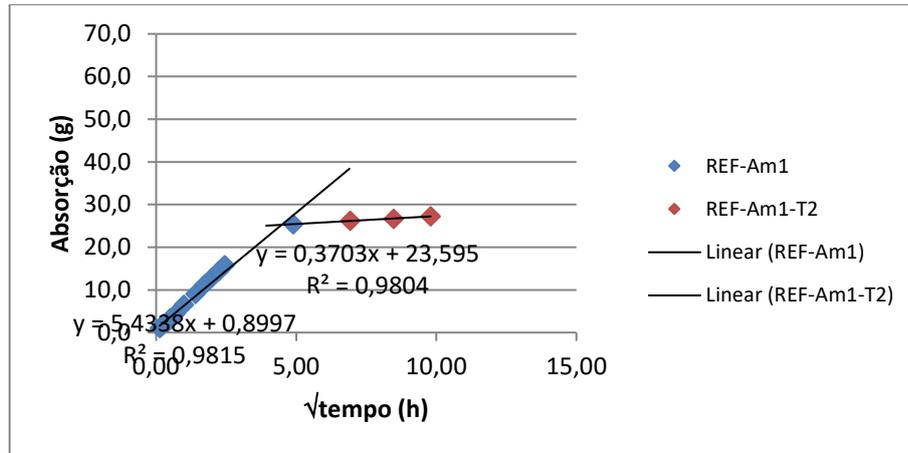
## POBRE 100% - 28 DIAS SEM PSAR



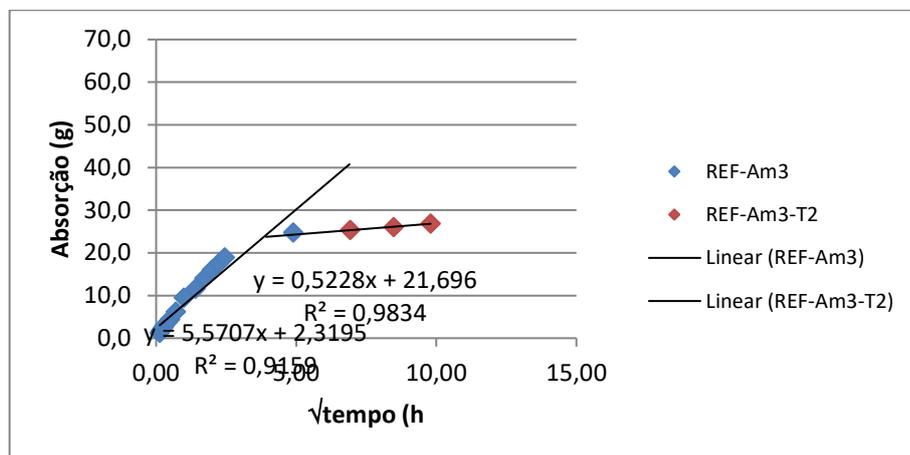
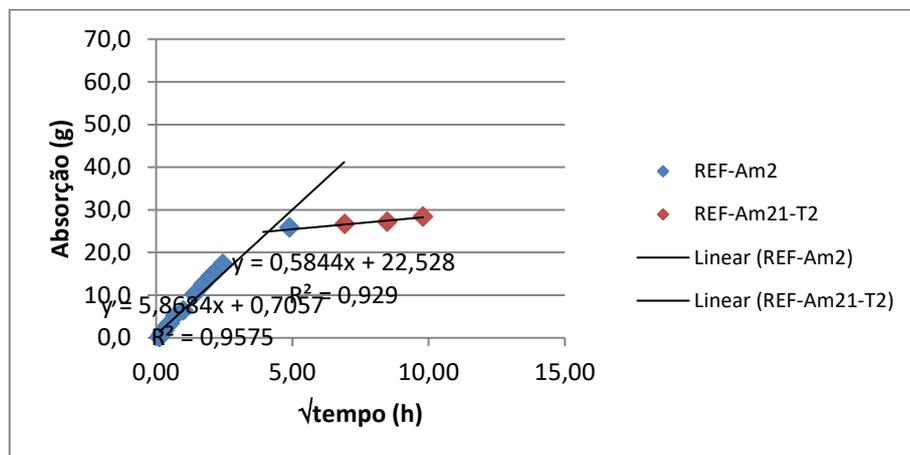
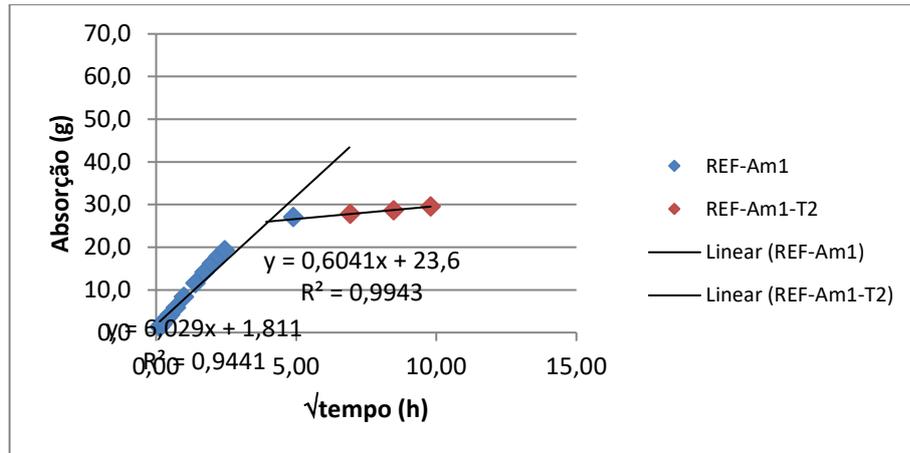
## RICO 60% - 28 DIAS SEM PSAR



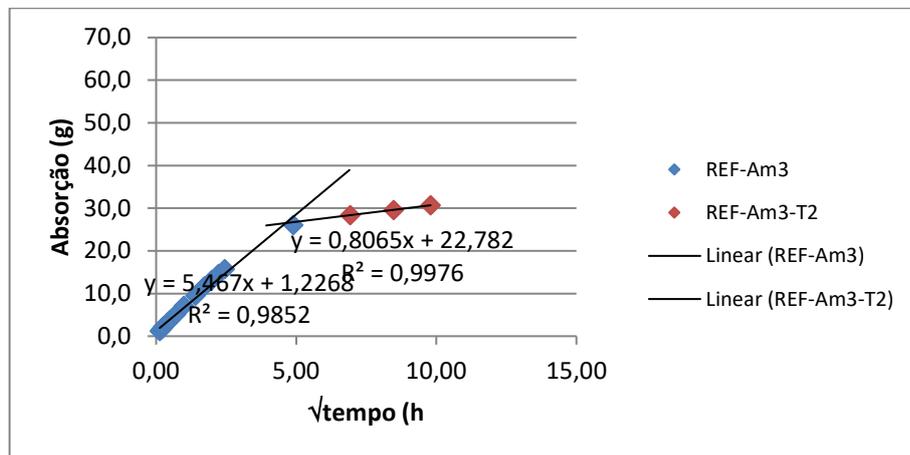
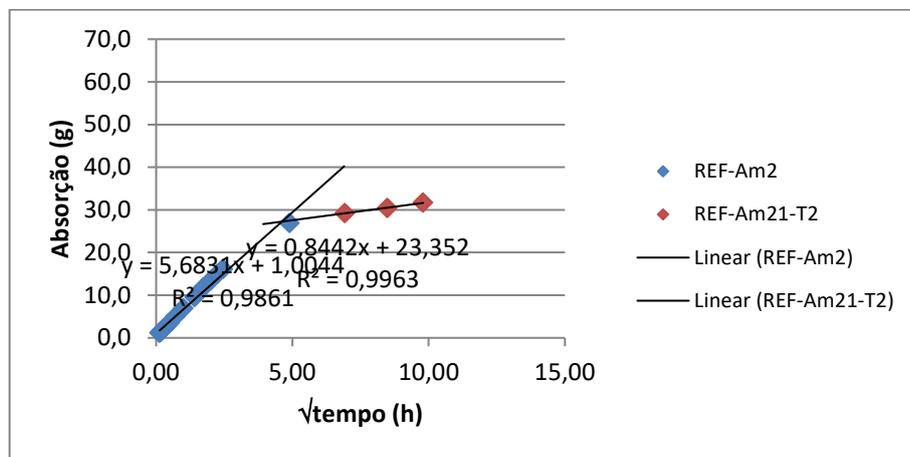
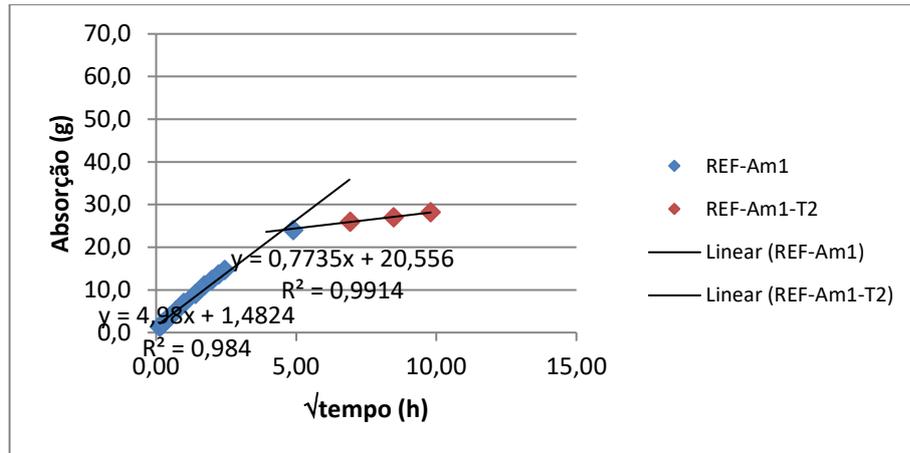
## MÉDIO 60% - 28 DIAS SEM PSAR



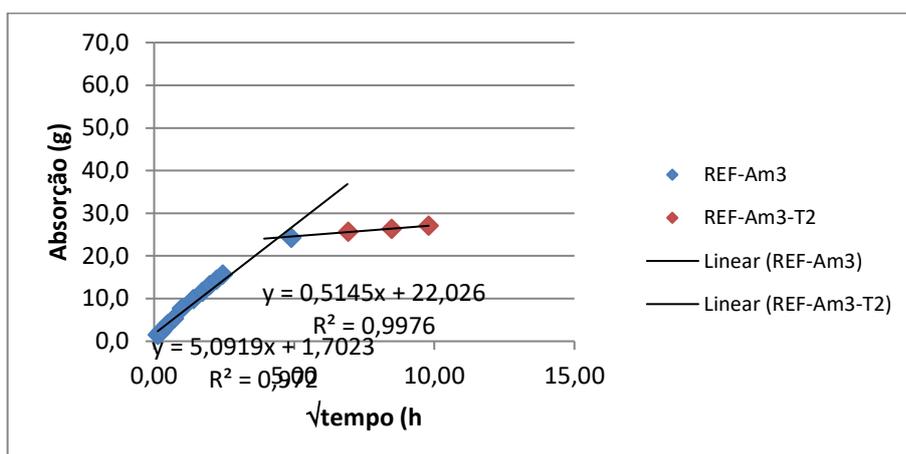
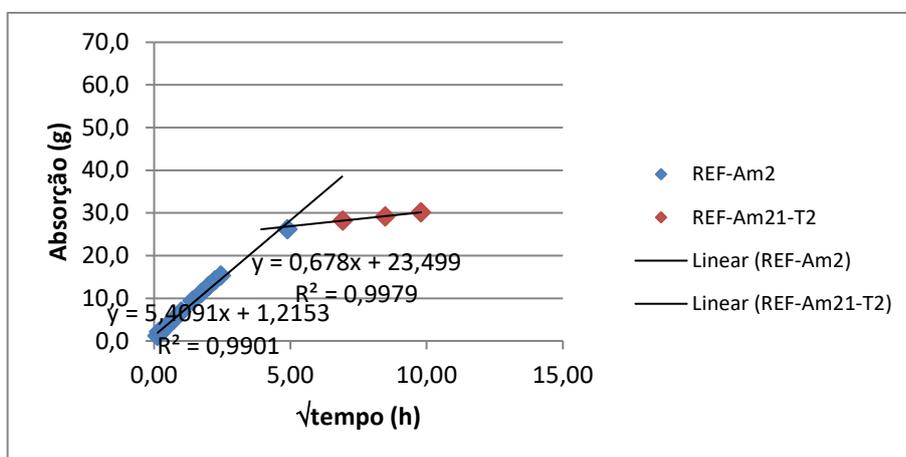
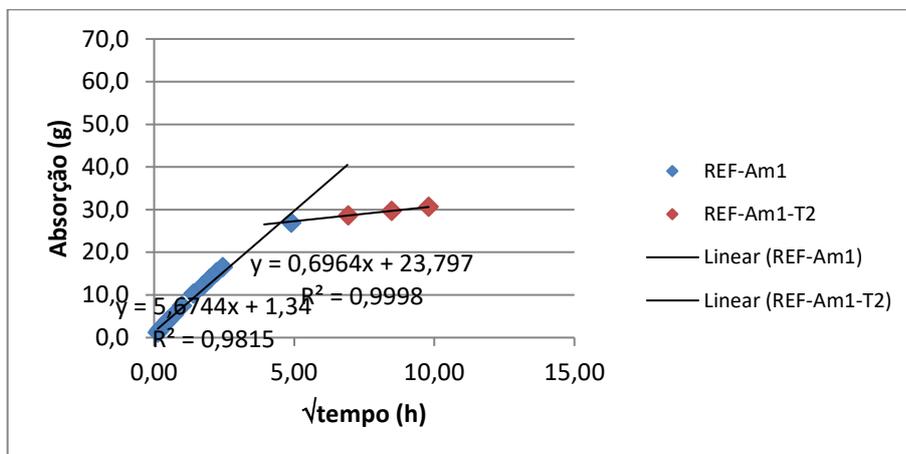
POBRE 60% - 28 DIAS SEM PSAR



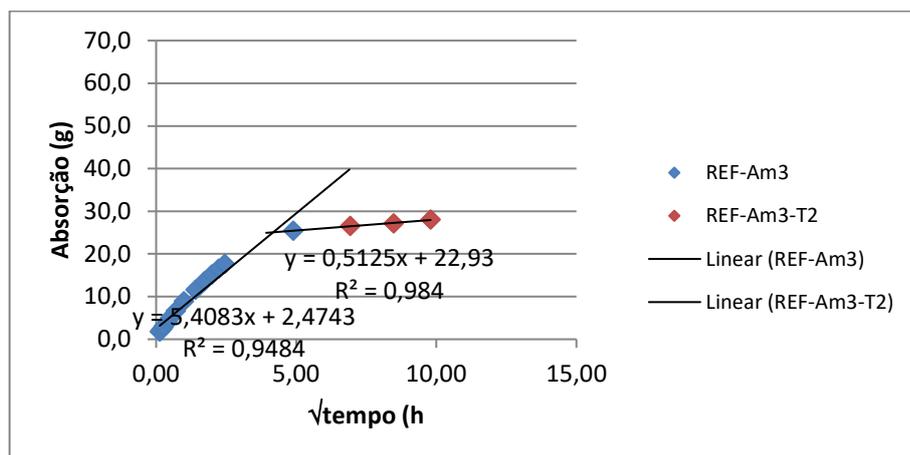
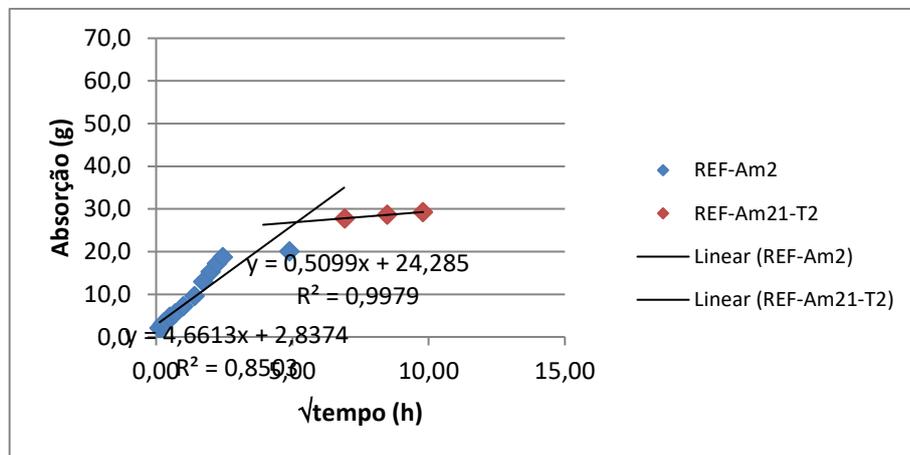
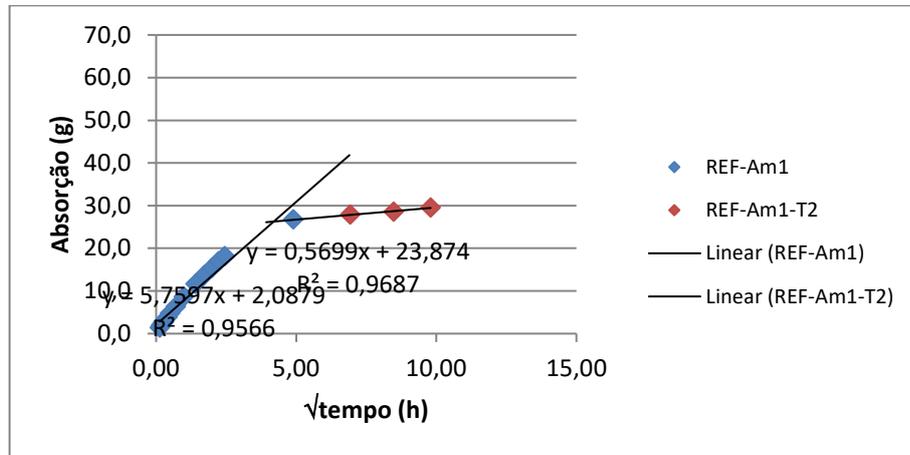
RICO 30% - 28 DIAS SEM PSAR



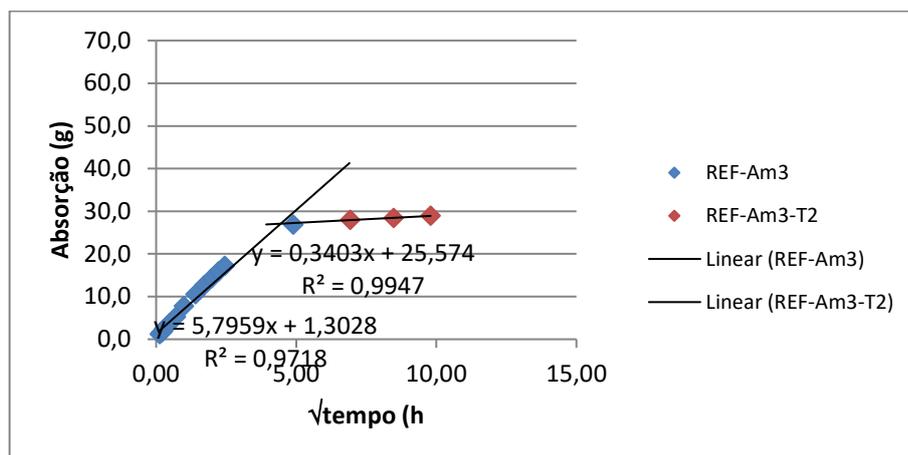
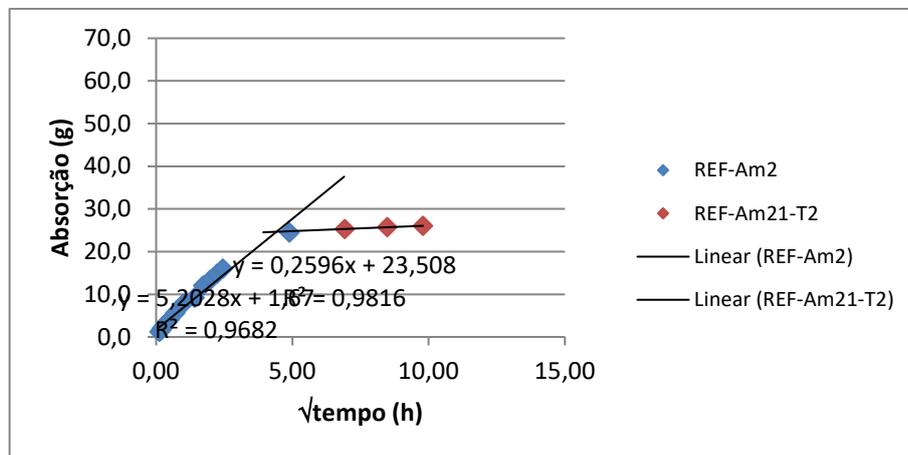
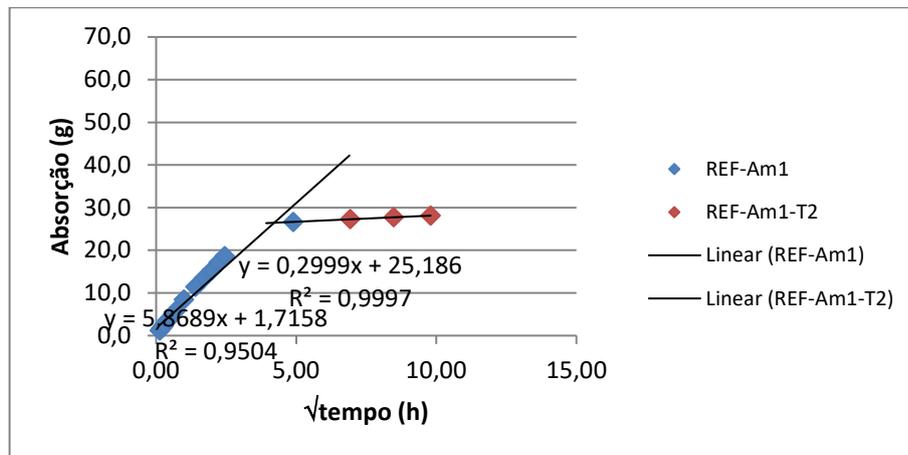
## MÉDIO 30% - 28 DIAS SEM PSAR



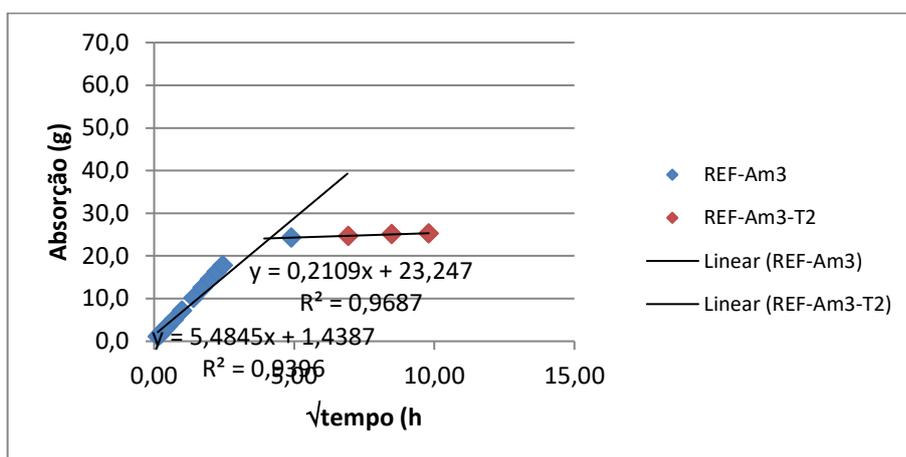
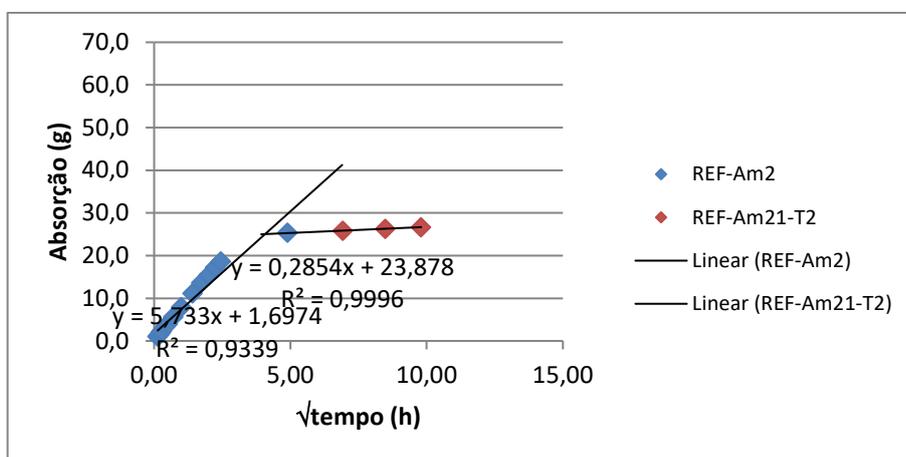
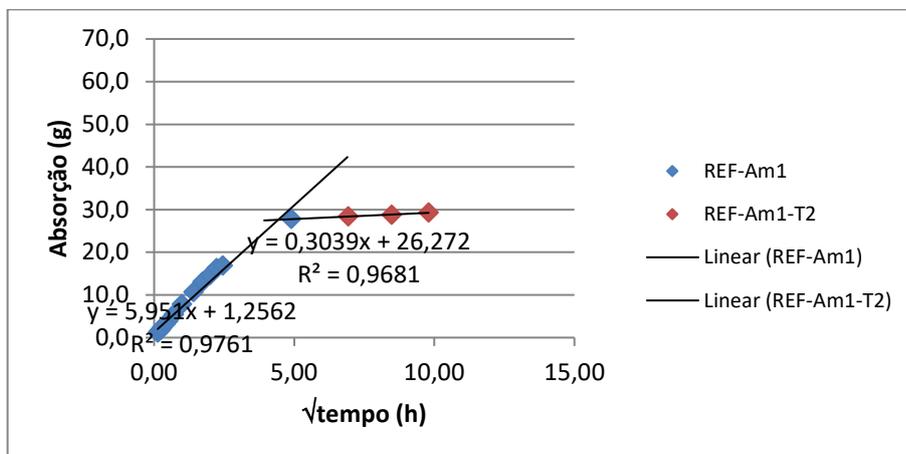
## POBRE 30% - 28 DIAS SEM PSAR



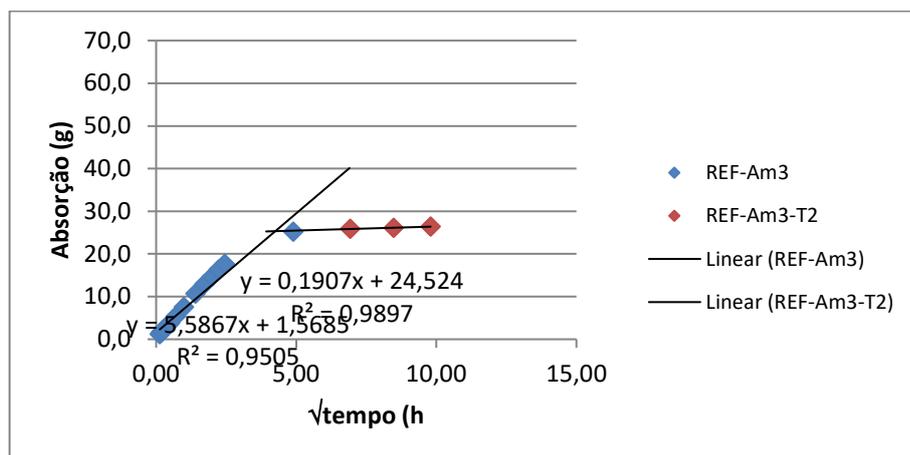
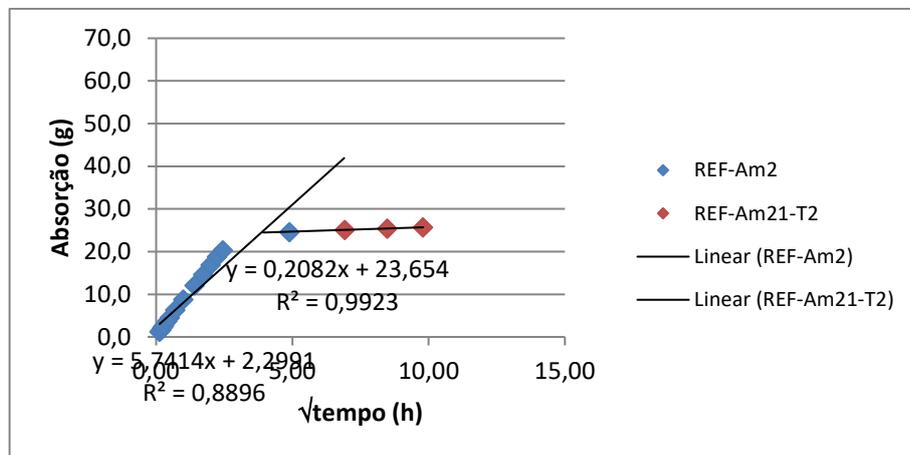
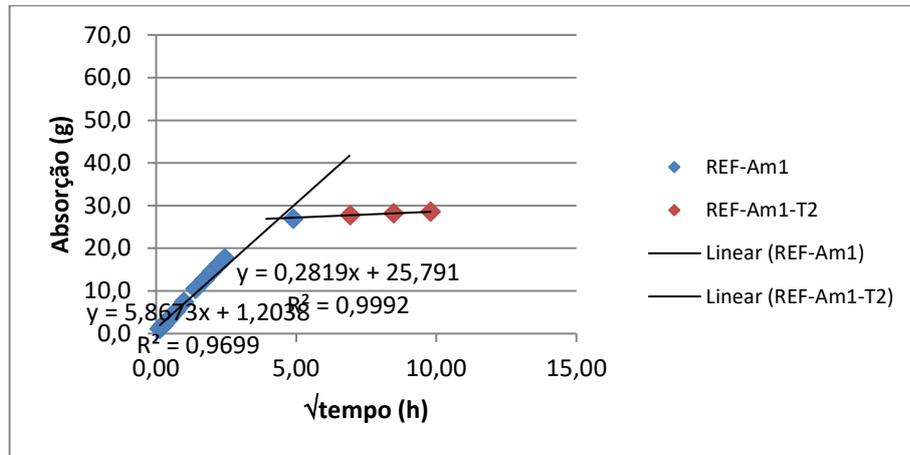
## RICO 100% 28 DIAS COM PSAR



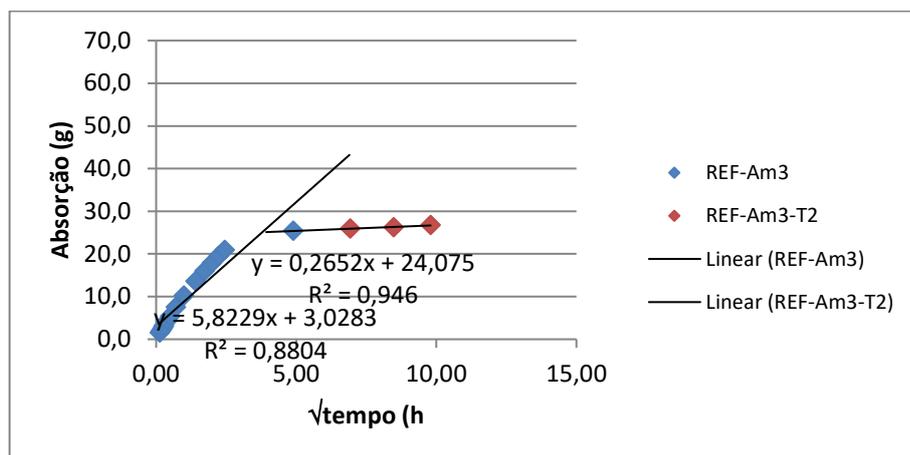
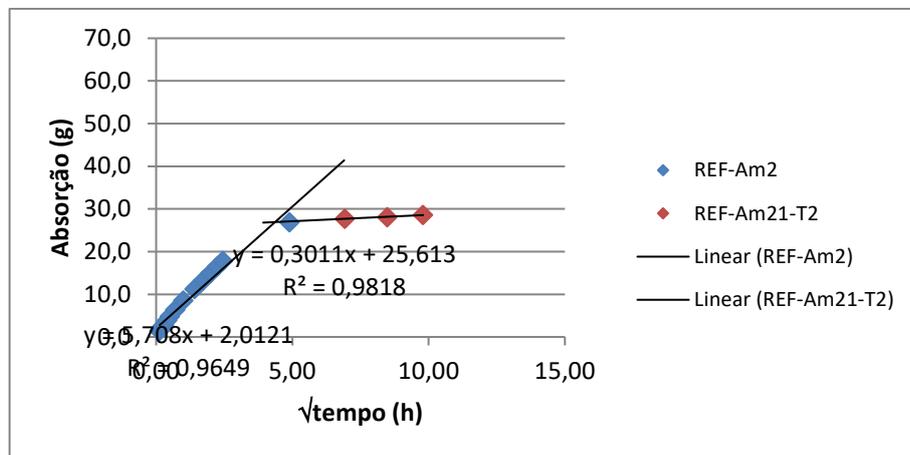
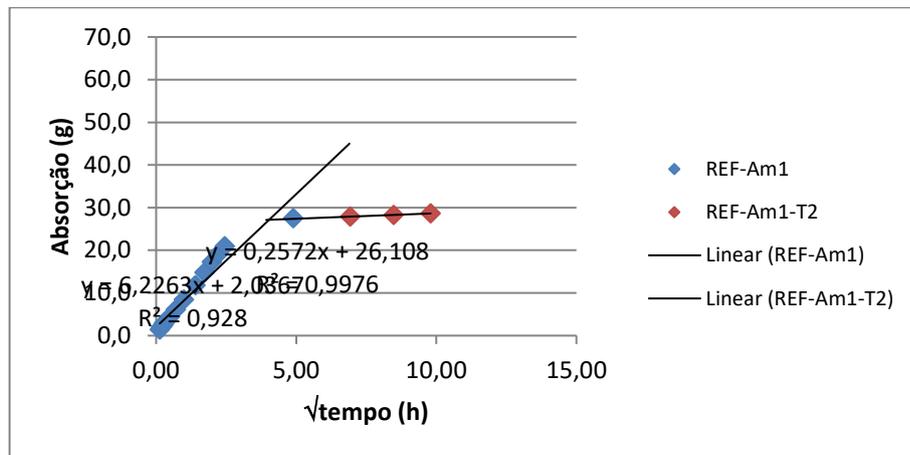
## MÉDIO 100% - 28 DIAS COM PSAR



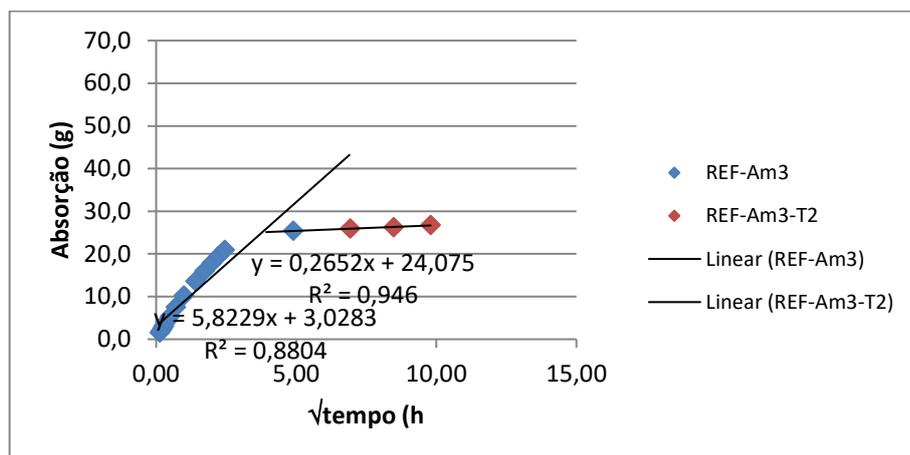
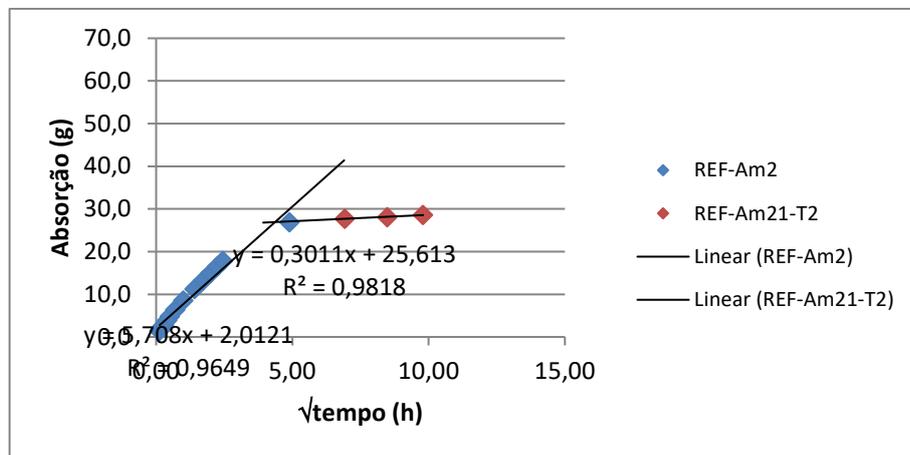
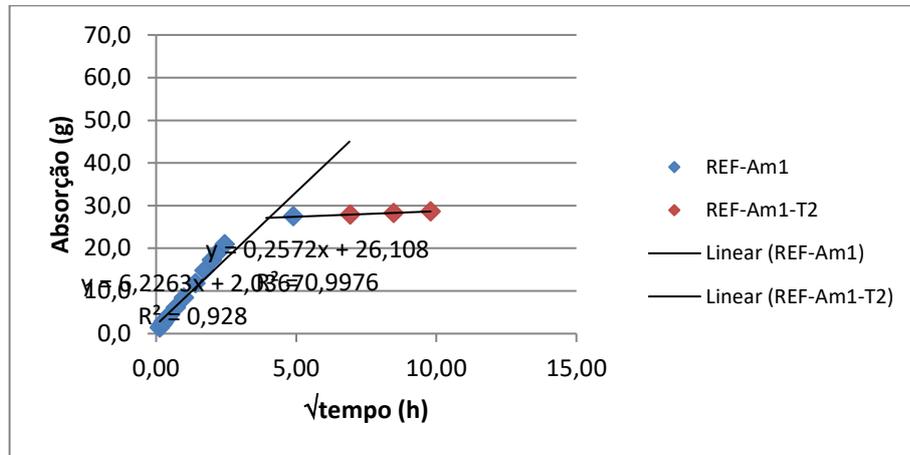
POBRE 100% - 28 DIAS COM PSAR



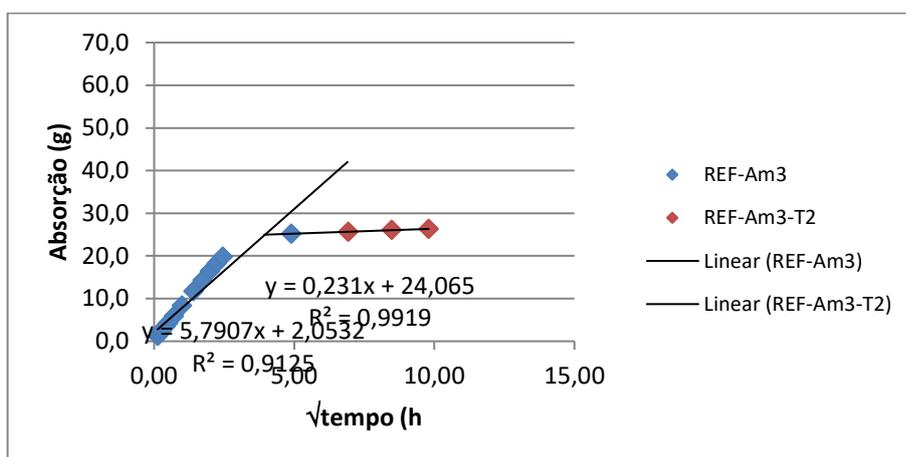
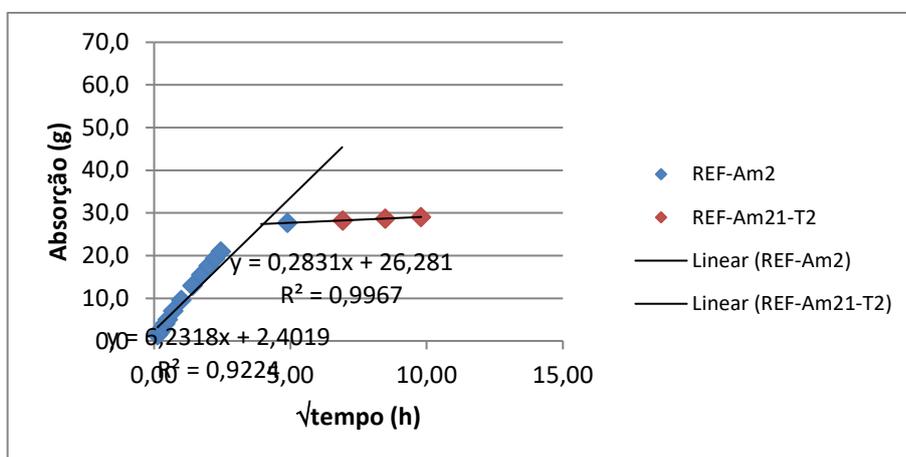
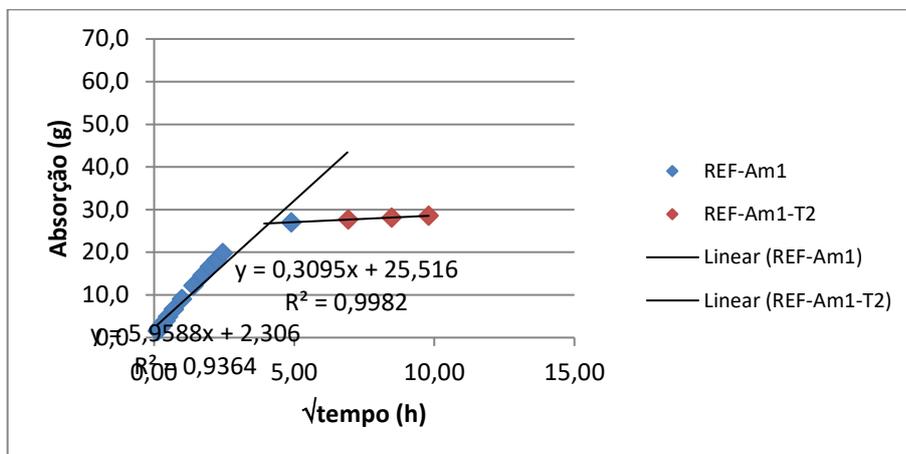
## RICO 60% - 28 DIAS COM PSAR



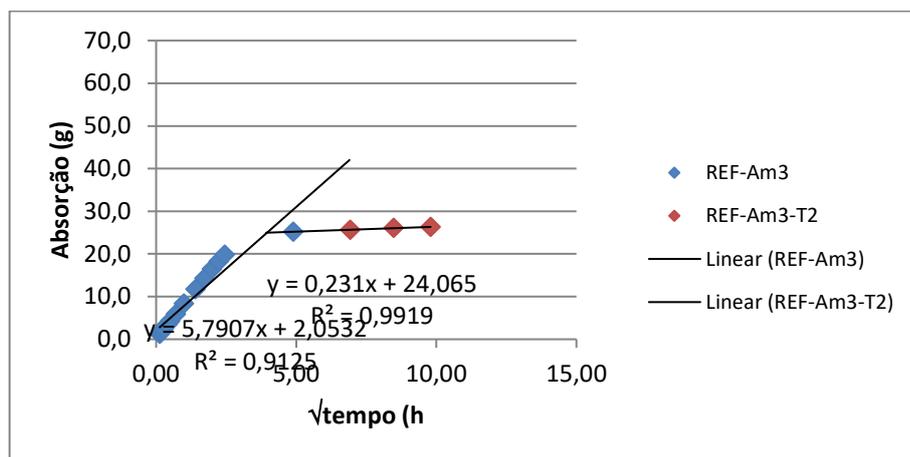
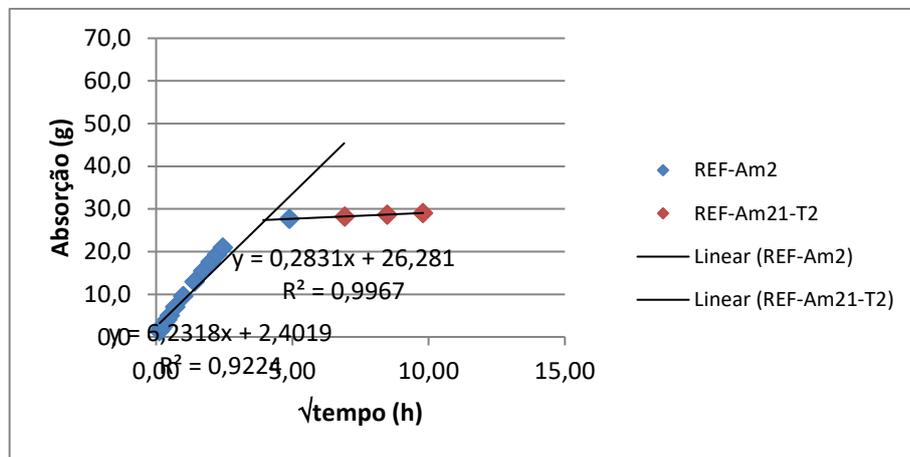
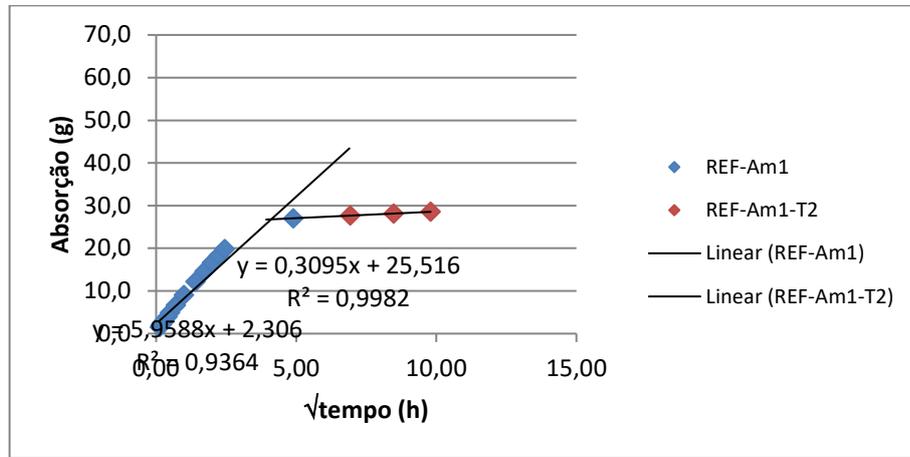
MÉDIO 60% - 28 DIAS COM PSAR



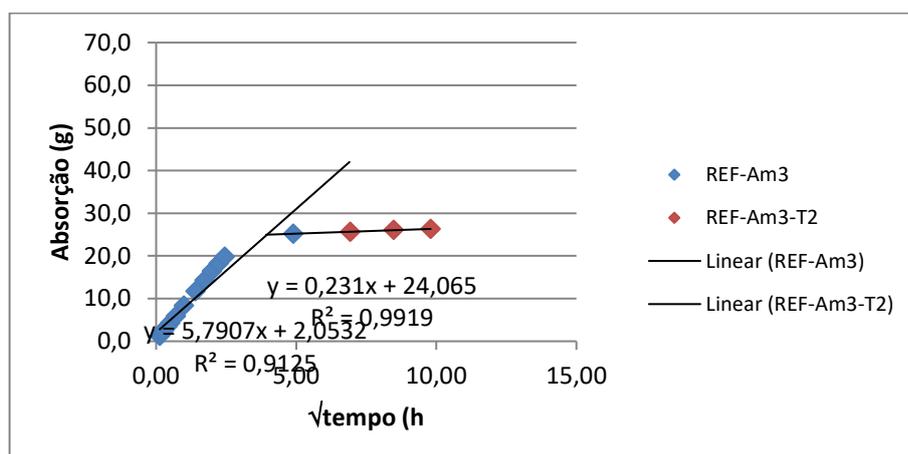
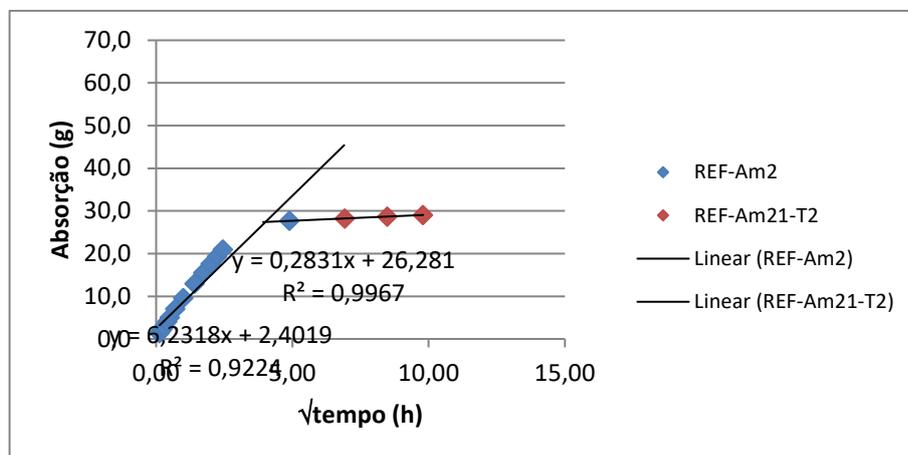
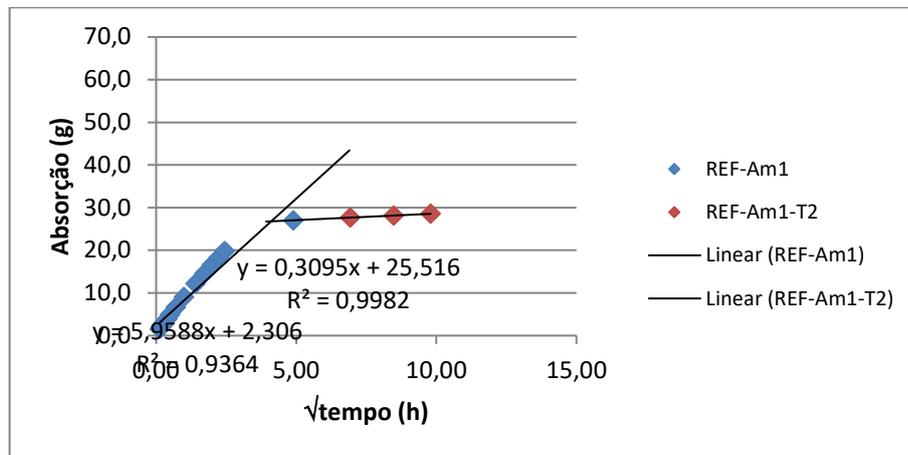
## POBRE 60% - 28 DIAS COM PSAR



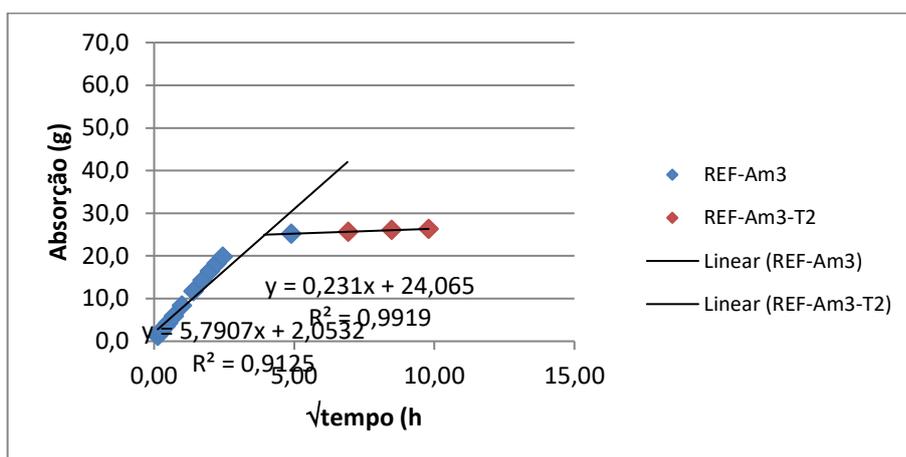
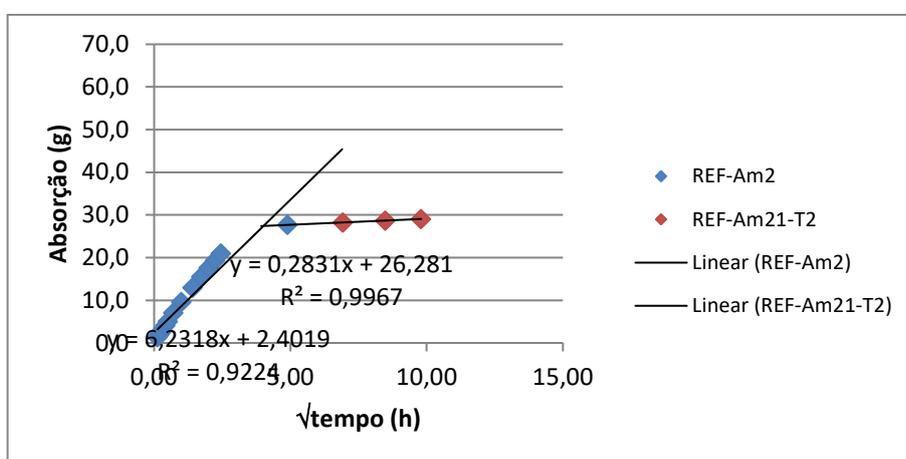
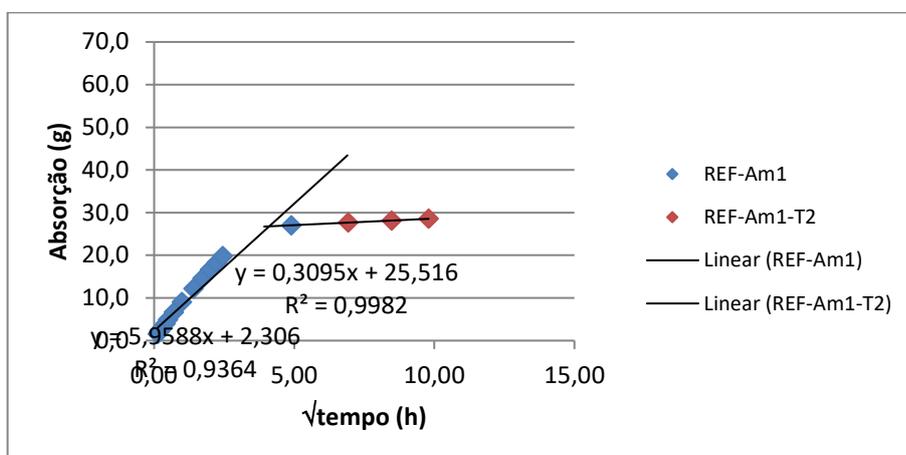
RICO 30% - 28 DIAS COM PSAR



## MÉDIO 30% - 28 DIAS COM PSAR



## POBRE 30% - 28 DIAS COM PSAR



## 8 ANEXO A – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO CIMENTO UTILIZADO NA PESQUISA

Boletim de Ensaios de Cimento																
																
Atualizado em:	10/11/2017				Produto:	CPIIF-40				Norma:	NBR 11578					
Mês e ano de referência	set/17				Marca:	Votoran				Unidade:	Rio Branco					
Ensaio	Químicos				Físicos e mecânicos											
	Teores (%)				Finura (%)		Blaine	Água de		Tempo Pega		Expansão		Resist. à Compressão (MPa)		
	PF	MgO	SO <sub>3</sub>	RI	#200	#325	(cm/g)	consist. (%)	Início (min)	Fim (min)	quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias	
Limites de Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 2,5	≤ 10,0	N/A	≥ 2800	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40	
01/09/2017	5,2	5,7	3,4	0,9	0,0	0,3	4520	30,4	205	265	0,5	23,5	34,3	40,2	47,9	
02/09/2017																
03/09/2017																
04/09/2017	5,0	5,7	3,4	0,9	0,0	0,5	4600	30,2	210	270	0,0	25,0	34,5	40,9	48,0	
05/09/2017	4,9	5,7	3,3	0,9	0,0	0,5	4490	30,2	200	260	0,5	24,4	35,3	40,4	48,5	
06/09/2017	4,9	5,7	3,2	1,3	0,0	0,5	4740	30,2	210	270	0,5	24,5	35,6	40,3	47,9	
07/09/2017																
08/09/2017	5,1	5,6	3,4	1,2	0,0	0,7	4790	30,6	200	255	0,5	26,3	36,2	40,7	49,0	
09/09/2017																
10/09/2017																
11/09/2017	5,0	6,0	3,4	0,6	0,0	0,5	4710	30,2	220	280	1,0	23,8	33,4	40,7	48,3	
12/09/2017	5,1	5,9	3,4	0,9	0,0	0,3	4630	30,2	220	280	0,0	24,1	33,9	41,6	47,3	
13/09/2017	4,8	5,7	3,2	1,4	0,0	0,5	4460	30,2	230	290	0,5	24,2	34,1	40,4	48,4	
14/09/2017	4,8	5,7	3,1	0,8	0,0	0,5	4430	29,6	205	260	1,0	23,4	34,7	41,3	47,2	
15/09/2017	4,9	5,8	3,4	0,8	0,0	0,5	4340	30,0	220	280	0,0	24,6	36,2	41,2	49,6	
16/09/2017																
17/09/2017																
18/09/2017	4,8	5,7	3,2	1,1	0,0	0,4	4790	29,8	220	280	1,0	24,4	34,1	40,8	47,5	
19/09/2017	5,1	5,8	3,7	1,1	0,0	0,5	4600	29,8	200	260	0,5	25,5	36,2	41,5	48,4	
20/09/2017	4,9	6,0	3,4	1,2	0,0	0,5	4570	29,6	220	280	0,5	24,4	33,9	41,3	47,5	
21/09/2017	5,0	5,9	3,4	1,5	0,0	0,5	4520	30,0	210	270	0,5	24,2	37,1	41,3	49,3	
22/09/2017	4,9	6,1	3,4	1,3	0,0	0,3	4630	30,0	210	270	0,0	24,2	35,5	40,1	49,3	
23/09/2017																
24/09/2017																
25/09/2017	4,6	5,8	3,5	0,8	0,0	0,3	4340	29,8	220	280	0,5	24,0	35,8	42,0	48,7	
26/09/2017	4,8	5,7	3,4	0,9	0,0	0,5	4770	29,6	200	260	0,5	25,0	34,4	40,9	46,9	
27/09/2017	4,6	5,9	3,4	1,1	0,0	0,3	4330	30,0	210	270	0,5	24,6	34,4	40,5	47,6	
28/09/2017	4,6	5,9	3,5	0,9	0,0	0,3	4340	30,0	230	290	0,0	23,0	34,0	39,9	47,3	
29/09/2017	4,7	5,9	3,2	1,0	0,0	0,4	4370	30,0	220	280	1,0	23,4	33,6	40,9	47,6	
30/09/2017																
01/10/2017																
Média	4,89	5,82	3,37	1,03	0,00	0,44	4548,50	30,02	213,00	272,50	0,48	24,33	34,86	40,85	48,11	
Desvio Padrão	0,18	0,13	0,13	0,22	0,00	0,11	155,68	0,27	9,65	10,32	0,34	0,76	1,05	0,55	0,78	
Mínimo	4,61	5,63	3,13	0,64	0,00	0,30	4330,00	29,60	200,00	255,00	0,00	23,00	33,40	39,90	46,90	
Máximo	5,22	6,06	3,73	1,45	0,00	0,70	4790,00	30,60	230,00	290,00	1,00	26,30	37,10	42,00	49,60	

Observações:

ME = 3,06 g/cm<sup>3</sup>



Abílio Estevão Galil Junior

Nome

Responsável Controle de Qualidade

Votorantim Cimentos S/A



Thomas Rheinegger

Nome

Gerente da Fábrica

Votorantim Cimentos S/A

Central de Relacionamento com o Cliente: Capitais 4003 9894 | Demais localidades 0800 701 9894  
 Serviço de Atendimento ao Consumidor: 0800 701 9898  
 Site: [www.vcimentos.com.br](http://www.vcimentos.com.br)

**9 ANEXO B – RELATÓRIO DA FEPAM**



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS ESCOLA POLITÉCNICA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE PRODUTO  
ABSORVENTE DE HIGIENE PESSOAL (RPAH) PARA USO COMO AGENTE DE  
CURA INTERNA EM MATRIZ CIMENTÍCIA**

São Leopoldo, janeiro de 2017.

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>8</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 <i>Justificativa.....</i>	12
1.2 <i>Objetivos.....</i>	12
1.2.1 <i>Objetivo Geral.....</i>	12
1.2.2 <i>Objetivos Específicos .....</i>	13
1.3 <i>Estrutura da Pesquisa.....</i>	13
1.4 <i>Delimitações do Trabalho.....</i>	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 <i>Cimento Portland.....</i>	15
2.2 <i>Enrijecimento, Pega e Endurecimento .....</i>	18
2.3 <i>Retração do concreto .....</i>	21
2.3.1 <i>Tipos de retração.....</i>	26
2.3.2 <i>Procedimentos de cura do concreto .....</i>	35
2.4 <i>Cura interna.....</i>	35
2.4.1 <i>Conceito .....</i>	36
2.5 <i>Agentes de cura interna .....</i>	36
2.5.1 <i>Dosagem de agentes de cura interna.....</i>	38
2.5.2 <i>Estudos em concreto com agentes de cura interna.....</i>	39
2.6 <i>Polímero superabsorvente residual (PSAR).....</i>	45
2.6.1 <i>Fibra Celulósica.....</i>	61
2.7 <i>Métodos de ensaios de retração.....</i>	63
2.7.1 <i>Retração plástica.....</i>	63
2.7.2 <i>Retração livre .....</i>	64
2.7.3 <i>Retração restringida.....</i>	65
<b>3 Materiais e Métodos .....</b>	<b>67</b>
3.1 <i>Ensaio piloto .....</i>	67
3.2 <i>Planejamento dos experimentos.....</i>	67
3.2.1 <i>Fatores de controle.....</i>	69
3.2.2 <i>Variáveis de resposta.....</i>	70
3.3 <i>Materiais.....</i>	71

3.3.1	Cimento .....	71
3.3.2	Agregado Miúdo Natural .....	71
3.3.3	Agregado Miúdo Artificial.....	72
3.3.4	Agregado Graúdo Natural.....	74
3.3.5	Polímero superabsorvente residual (PSAR).....	75
3.3.6	Água.....	77
3.4	<i>Dosagem, ensaios e produção dos corpos-de-prova.....</i>	77
3.4.1	Resistência à compressão .....	79
3.4.2	Retração plástica.....	79
3.4.3	Retração livre .....	80
3.4.4	Absorção de água.....	81
3.4.5	Análise Estatística .....	82
3.4.6	Ensaio de campo .....	82
<b>4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>		<b>87</b>
4.1	<i>Resultados do laboratório .....</i>	87
4.1.1	Resistência à compressão.....	87
4.1.2	Retração plástica.....	90
4.1.3	Absorção de água.....	91
4.1.4	Consumo de água adicional do polímero.....	93
4.2	<i>Dados da pesquisa em escala piloto industrial .....</i>	96
4.2.1	Resistência à compressão do traço da concreteira .....	96
4.2.2	Retração por secagem .....	97
4.2.3	Absorção de água.....	98
4.2.4	Análise do piso.....	99
<b>5 Considerações finais.....</b>		<b>101</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>104</b>
<b>7 Apêndice a – Ensaio de Absorção.....</b>		<b>117</b>
<b>8 Anexo A – Características Físico-químicas do cimento utilizado na pesquisa.....</b>		<b>153</b>
<b>9 Anexo B – Relatório da FEPAM .....</b>		<b>154</b>
<b>10 .....</b>		<b>Anexo C – Quadro de CLIMA do período do ensaio em campo</b>
		<b>173</b>
<b>11 .....</b>		<b>Anexo D – Autorização da FEPAM</b>
		<b>174</b>

## 1 EQUIPE EXECUTORA

NOME	SITUAÇÃO	FUNÇÃO NO PROJETO	ETAPA/PROJETO
Dra. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha	Professora	Coordenadora	1º e 2º
Dra. Feliciane Andrade Brehm	Professora	Pesquisadora	1º e 2º
Sr. Vasco Brandt		Colaborador	1º e 2º
Dr. Carlos Alberto Moraes	Professor	Colaborador	1º e 2º
Dra. Amanda Gonçalves Kieling	Professora	Colaboradora	1º
Dra. Marlova Kulakowski	Professora	Colaboradora	1º
Dr. Maurício Mâncio	Professor	Colaborador	1º e 2º
Angélica Koppe	Eng. Civil	Pesquisadora Mestranda	2º
Bruno Cardoso	Eng. Civil	Pesquisador Mestrando	2º
Cynthia Fleming Batalha da Silveira	Bióloga	Pesquisadora	1º
Daiane Calheiro Evaldt	Professora	Pesquisadora	1º
Leandro Gomes	Gestor Ambiental	Pesquisador – Mestrando	1º
Angélica Aroche	Bolsista Engenharia de Materiais	Pesquisador – Iniciação Científica	1º

## 2 - INTRODUÇÃO

A Universidade do Vale do Rio dos Sinos-UNISINOS (unidade de pesquisa) vem desenvolvendo trabalhos na área de gerenciamento de resíduos através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e desde 2012 com a implementação do curso de graduação em Engenharia de Materiais tem atuado também na área de materiais poliméricos.

A parceria entre Unisinos e a empresa Plásticos Brandt Ltda. (empresa responsável pelo armazenamento de resíduos sólidos industriais) teve início em 2012 através da consolidação de um convênio de cooperação técnico-científica. A partir desse convênio foi dado o início ao desenvolvimento de projetos de pesquisa e desenvolvimento de produtos. Até o momento foram desenvolvidos dois projetos com o envolvimento de professores de graduação e pós-graduação

da Universidade, 3 alunos de mestrado e dois alunos de iniciação científica. No decorrer do desenvolvimento desses projetos foram geradas duas dissertações de mestrado, artigos científicos em revistas e congressos, bem como um depósito de pedido de propriedade intelectual.

O projeto diferencia-se de uma vasta gama de estudos sobre reciclagem de resíduos na construção civil, ao considerar aspectos ambientais, técnicos e econômicos com a finalidade de agregar valor ao coproduto gerado e garantir que sua reciclagem obedeça aos princípios de desenvolvimento sustentável. Desta forma, a reciclagem externa não é vista apenas como uma forma mais econômica de destinação para o resíduo, mas como um novo material.

A empresa Plásticos Brandt Ltda., é uma empresa de gerenciamento de resíduos que já atua no mercado há muitos anos. Dentre os resíduos trabalhados pela empresa encontra-se o resíduo advindo do setor de higiene pessoal, em específico da empresa Kimberly-Clark Brasil (unidade geradora), com quem a Plásticos Brandt Ltda. mantém um relacionamento há muitos anos.

O RPAH é gerado no processo produtivo de fraldas e absorventes higiênicos da empresa Kimberly Clark Brasil, cuja quantidade estimada fica entre 30 e 40 toneladas mensais. Este resíduo é atualmente enviado para coprocessamento na empresa Renova em Farroupilha, transportados pela empresa Plásticos Brandt Ltda., gerenciadora de resíduos da empresa Kiberly Clark.

O resíduo é constituído de aproximadamente 70% de polpa de celulose e 10% de polímero superabsorvente (PSA). Em torno de 10% de polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP) e 10% de umidade e outros materiais em menor quantidade.

### **3 - OBJETIVO**

O objetivo deste relatório é apresentar os resultados obtidos, para a caracterização e aplicação do resíduo de produto absorvente de higiene pessoal (RPAH), em matrizes cimentícias visando obter a autorização da FEPAM, de acordo com a diretriz técnica N 001/2010, para ATIVIDADE DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS EM ESCALA PILOTO INDUSTRIAL para um teste em escala piloto do material desenvolvido.

#### 4 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DOS PROJETOS

O primeiro projeto teve como objetivo principal caracterizar o RPAH e avaliar as possibilidades de transformação desse resíduo advindo do setor de higiene pessoal para o desenvolvimento de novos materiais aplicáveis a diferentes áreas, tendo como foco principal a área da construção civil.

Para isso se fez necessário seguir algumas etapas, tais como:

- Diagnosticar a situação atual do RPAH na empresa Plásticos Brandt Ltda, que faz o gerenciamento e beneficiamento do mesmo;
- Caracterizar o RPAH do ponto de vista físico-químico, térmico e estrutural;
- Avaliar a capacidade de absorção para uso em aplicação de interesse;
- Adicionar o resíduo em RPAH de revestimento e testar suas propriedades em relação a uma argamassa de referência.

De uma maneira geral o primeiro projeto pode ser esquematizado conforme a figura 1

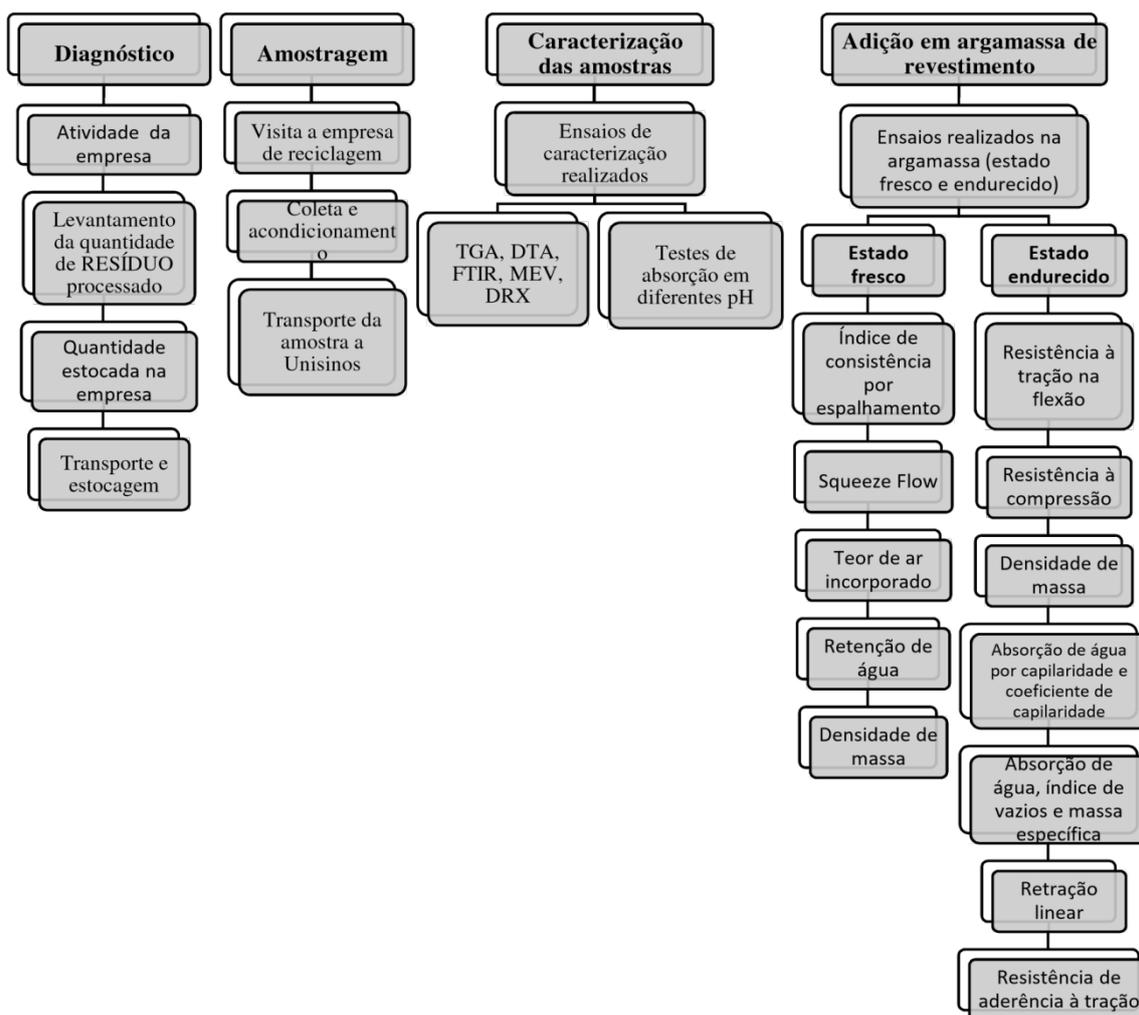


Figura 1: Esquema geral do primeiro projeto. Etapas desenvolvidas

No ensaio de absorção de soluções, o pH foi fator importante, entre o pH 4 e pH 9 encontra-se um aumento da capacidade de absorção, enquanto com pH 13 há uma redução dessa capacidade em torno de 140%. Este resultado se tornou bastante promissor para que o RPAH seja aplicado como agente de cura interna, pois o pH dos materiais cimentícios fica na faixa 12-13. Portanto neste ambiente a água absorvida pelo RPAH será liberada gradativamente para o meio, controlando a cura do cimento.

Na realização do ensaio de consistência por espalhamento, foi necessário aumentar o teor de água para as adições de 1% e 1,5%, para argamassa com adição de 0,5% não foi necessário aumentar o teor de água para obter a mesma trabalhabilidade.

No ensaio para determinação do teor de ar incorporado observou-se uma pequena variação, nota-se que na medida em que foi aumentando a adição o teor de ar incorporado também aumentou, porém pouco determinante para os outros resultados.

O resultado do ensaio de densidade de massa no estado endurecido não demonstrou variação significativa entre as argamassas.

Nos resultados obtidos no ensaio de retenção de água no estado fresco foram demonstrados que as argamassas com adição são semelhantes à retenção de água da argamassa de referência, não havendo nesse caso influência significativa.

No ensaio de *Squeeze Flow* observou-se que a argamassa com teor de 1% apresenta uma trabalhabilidade intermediária enquanto as argamassas com teores de 0,5 e 1,5% demonstraram uma trabalhabilidade reduzida, possivelmente devido à absorção mais rápida da água empregada na mistura.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão demonstraram semelhantes com e sem adição de RPAH, porém nota-se um aumento de 7% da resistência com adição de 1,5% em relação à argamassa de referência.

No ensaio de resistência à tração na flexão o teor de adição de 1,5% de RPAH demonstrou um aumento de 4% em relação à argamassa de referência.

O coeficiente de capilaridade foi aumentando com o aumento do teor de adição de RPAH, este resultado pode estar ligado com a dispersão das fibras na mistura.

Quanto à absorção total de água, foi apresentada uma redução, tendo como melhor valor o encontrado na argamassa com teor de adição de 1,0% de RPAH.

A densidade de massa se manteve estável para todas as argamassas geradas, não havendo variação significativa mesmo com adição do RPAH.

A variação dimensional das argamassas estudadas apresentou-se sendo o menor para argamassa de referência, intermediário para os teores 1,0 e 1,5. A argamassa de teor de 0,5% obteve a maior variação dimensional.

A maior perda de massa foi para a amostra com maior teor de adição, enquanto a menor perda de massa foi para a amostra com 0,5% de adição. A diferença entre os extremos da variação de massa para as amostras aos 28 dias foi de aproximadamente 10,40%.

Com relação ao ensaio de resistência à aderência à tração, todas as argamassas produzidas com adição do RPAH tiveram resultado inferior à argamassa sem adição. A argamassa com adição de 0,5% obteve um decréscimo de 37%, enquanto com adição de 1,0% obteve 51%, e a argamassa com adição de 1,5% obteve resultado mais próximo à argamassa sem adição, com 26% de redução da sua resistência. Através dos resultados os revestimentos com os teores de adição de 0,5 e 1% podem ser utilizados apenas para revestimentos de paredes internas e tetos, já o revestimento com o teor de 1,5% pode ser utilizado tanto para revestimentos de paredes internas e tetos quanto para revestimentos de paredes externas.

A partir dos resultados obtidos a incorporação do RPAH em argamassa, se mostrou viável tecnicamente. Além disso, ambientalmente, trata-se da incorporação de um resíduo que será utilizado no setor da construção civil, caracterizado pela grande demanda de matérias primas.

O segundo projeto, tendo como base os resultados obtidos no primeiro, teve como objetivo principal avaliar a viabilidade do emprego do RPAH, como agente de cura interna em matrizes a base de cimento Portland.

Neste caso foi necessário:

- Avaliar a melhor forma de incorporação do RPAH em matrizes de cimento Portland;
- Definir o percentual de adição do RPAH através de estudo de dosagem específica para cura interna;
- Incorporação do RPAH na fração argamassa do concreto e avaliação dos efeitos na consistência, ganho de resistência mecânica e estabilidade dimensional.

O trabalho limitou-se à utilização do resíduo, em matrizes de cimento Portland. Sua utilização se deu na fração argamassa de concretos produzidos com cimento CP IIF 40 e CP IV 32. O estudo avaliou o uso do resíduo como agente de cura interna curada em três condições – 100% UR a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , 60% UR a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e 30% UR a  $40^{\circ}\text{C}$  – representando três situações extremas de clima comum, principalmente na região sul do Brasil. A distribuição granulométrica das areias utilizadas no traço do estudo baseou-se na fração argamassa de um concreto comercializado pela empresa Britasinos Concretos Ltda (unidade de destino).

O programa de trabalho desse segundo projeto foi subdividido em três etapas:

A etapa I é definida como a etapa de escolha dos materiais empregados no estudo, comportamento de absorção do material residual, além do desenvolvimento do programa piloto a fim de se analisar o comportamento do RPAH na matriz cimentícia. Neste programa foram elaboradas argamassas, que foram curadas em duas distintas condições de cura e posteriormente levadas ao ensaio de resistência à compressão.

Na Etapa II, após analisados os resultados obtidos no projeto piloto, foram definidos os parâmetros de análise de caracterização necessários para a avaliação de utilização do RPAH na matriz cimentícia. Foram realizados ensaios para a análise de absorção do RPAH e posteriormente, a partir dos resultados obtidos, o cálculo do volume de material residual necessário para gerar o efeito de cura interna na matriz cimentícia. Com os dados partiu-se para a mistura das argamassas onde se avaliou a sua consistência, fixando a dosagem e água das argamassas destinadas à resistência à compressão e análise da retração.

Na Etapa III foram desenvolvidas análises complementares, em idades iniciais, para a avaliação de retração e fissuração nas primeiras 24h, além de análise estatística dos resultados obtidos.

Essas etapas estão esquematicamente demonstradas na figura 2.

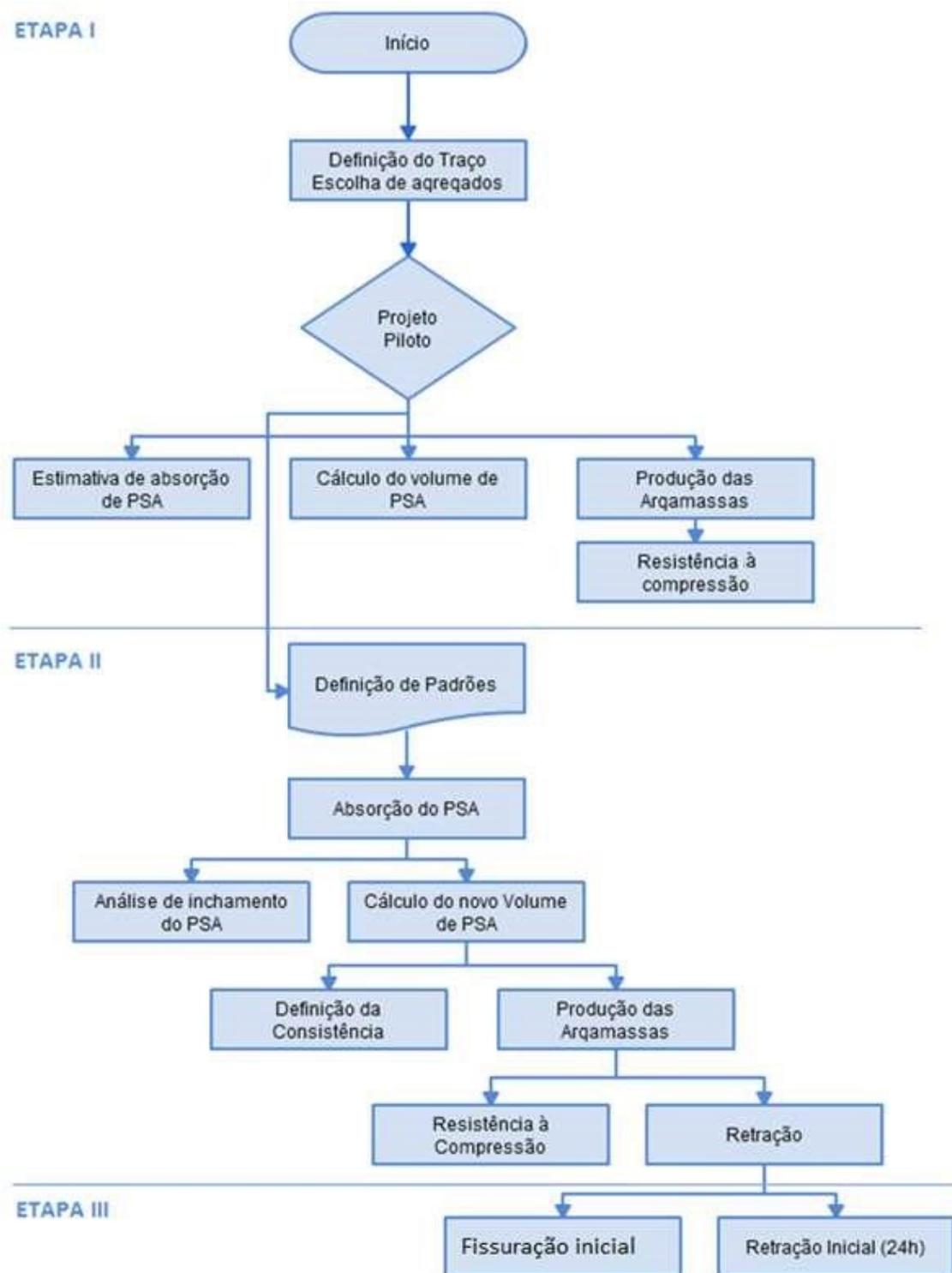


Figura 2: Esquema geral do segundo projeto. Etapas desenvolvidas

Este segundo projeto teve como objetivo a incorporação de um tipo de PSA residual oriundo das empresas de higiene pessoal, na fração argamassa de um concreto, com o intuito de se avaliar melhoras quanto à cura, observando melhoras de consistência, resistência, retração

e, principalmente fissuração. Para a realização do estudo foram utilizados três tipos de argamassa (referência, argamassas contendo RPAH calculado e argamassa contendo RPAH em dosagem estimada), curadas em três condições cura, a 100%, 60% e 30% de umidade relativa.

Inicialmente realizou-se um trabalho piloto, onde se avaliou aspectos base a serem analisados no programa experimental. A partir do desenvolvimento deste, foram realizados ensaios de quantificação de absorção de água pelo RPAH, avaliação e ajuste de consistência, ensaios de resistência à compressão e ensaios de retração por secagem. Como ensaios complementares, optou-se por analisar a retração plástica e fissuração inicial, uma vez que se constataram melhoras no comportamento das argamassas no período inferior às 24h. A análise de imagem teve como finalidade observar as características e comportamento do material em estado de transformação (inchamento).

Há diferenças significativas quanto as argamassas contendo RPAH, melhoras plastificantes são identificadas com relação às argamassas referência. Melhores trabalhabilidades foram visualizadas nas argamassas contendo RPAH, o que levaram a uma excelente redução da relação água/cimento ( $a/c$ ), de 0,54 para as argamassas referência, para 0,48 em argamassas contendo RPAH, em ambos os tipos de cimento. Este resultado torna-se muito positivo uma vez que na construção se busca uma redução da relação  $a/c$  em função da maior resistência e, automaticamente, da maior durabilidade de uma estrutura.

Os resultados obtidos indicam que mesmo sendo um PSA de origem residual (RPAH), composto de 70% de fibra celulósica e somente 10% de PSA puro, seu efeito plastificante é o mesmo observado por materiais não residuais. Sendo assim, seria possível reciclar em torno de 50 toneladas/mês (recebidas e beneficiadas pela empresa Plásticos Brandt Ltda.), transformando este resíduo em coproduto.

O RPAH, no estado seco, apresenta-se em forma de fibras alongadas, chatas e de curto comprimento, onde não é possível identificar a presença de PSA. Contudo, a partir do momento que o material é saturado com água observa-se a formação de esferas de gel, com dimensões variadas, que podem chegar a 1 mm. A formação arredondada do gel de PSA indica que, após o RPAH eliminar toda a água de cura interna em uma matriz cimentícia, tem-se a formação de vazios arredondados na estrutura, que podem, ou não, estar interligados.

A diferença na consistência gerada pelo efeito plastificante do RPAH compensou a perda de resistência gerada pela porosidade do material residual adicionado as argamassas. Houve uma compensação significativa de resultados em função das diferenças de relação  $a/c$ , contudo, mesmo assim, as argamassas contendo RPAH não apresentaram resultados superiores às argamassas referência, nas suas idades finais.

No CP IIF observou-se que até a idade de 14 dias as argamassas contendo material residual apresentam melhor desempenho, com resistências superiores às referências. Contudo este resultado se inverte até a idade de 91 dias. Tal fato é decorrente da liberação total de água destinada a cura interna (estimada em 14 dias), gerando uma estabilização da hidratação das partículas de cimento e acompanhado pela porosidade interna, que faz com que a resistência não aumente, ficando levemente inferior ao referências na idade final.

Para as argamassas moldadas com o CP IV, na idade de 91 dias os resultados são semelhantes aos obtidos com o CP IIF, porém as argamassas contendo RPAH, curadas a 30% UR apresentaram potencial de resistência superior. Na idade de 14 dias os resultados são inversos aos obtidos no CP IIF, por ser um cimento contendo material pozolânico, seu ganho de resistência é mais lento, sua ação de crescimento de resistência maior se dá após os 28 dias. Contudo, sem água para a hidratação, a resistência se estabiliza, mantendo assim, com pouco crescimento, após os 14 dias. Neste caso, observa-se somente que um crescimento significativo de resistência ocorre para as argamassas curadas a 100% UR. Por apresentar água para a hidratação das partículas, há um aumento gradativo da resistência, observado principalmente após a idade de 28 dias.

As argamassas com o dobro de RPAH na mistura (RPAH+), tanto no CP IIF, quanto no CP IV, apresentam um desempenho inferior às demais argamassas, o que nos faz concluir que o material destinado a cura interna deve ser calculado. Se adicionado em grandes quantidades gera uma diminuição da resistência e, conseqüentemente, menor durabilidade. Material em excesso gera maior porosidade, influenciando bruscamente na resistência final.

De modo geral, as argamassas contendo RPAH apresentaram um desempenho levemente inferior às argamassas referências na idade de 91 dias, contudo este percentual não chegou a ultrapassar 15% (somente uma chegou a 15%, sendo as outras inferiores a 10%). A perda de resistência final é ocasionada pela paralização da hidratação das partículas de cimento associada a uma porosidade interna (o que diminui esta resistência em relação às argamassas referências). Embora com resultado um pouco inferior, a melhora de resistência nas idades iniciais não deve ser descartada, há uma melhora na hidratação das partículas de cimento nas piores condições de cura.

Verificou-se que, em idades avançadas, à medida que as argamassas estão em piores condições de umidade e cura, maior a retração encontrada. No CP IIF, aos 91 dias, as argamassas que apresentaram maior deformação são as curadas a 30% de umidade, seguidas pelas curadas a 60% e, por fim, com uma retração próxima a zero, as argamassas curadas a 100%. Tal efeito assemelha-se as resistências à compressão, quanto pior a condição de cura,

menor a resistência à compressão final. A argamassa com o dobro de RPAH apresentou melhores resultados de retração quando comparados à argamassa referência sob mesma condição e cura.

Já para o cimento CP IV a análise não se apresenta tão linear quanto à encontrada no CP IIF, contudo com resultados mais promissores. Na idade de 91 dias, as argamassas contendo RPAH apresentam retração semelhante as argamassas referência curadas sob mesma condição de cura. Para 100% UR, a retração identificada é de 0,2 mm, para as argamassas curadas a 60% UR a retração aumenta para 1,05mm. Já para as argamassas curadas a 30% de umidade tem-se uma variação com relação ao uso de RPAH, na argamassa referência tem-se uma retração de 1,24 mm, contudo o uso de RPAH melhorou em 20% o surgimento da retração, reduzindo este valor para 1,05mm.

Os melhores resultados de retração, tanto para o CP IIF, quanto para o cimento CP IV, foram encontrados até a idade de três dias. Nas duas situações, na pior condição de cura (30% UR), as argamassas contendo RPAH apresentaram redução da retração de 45% e 62% respectivamente. Em ambos os tipos de cimento, também se observou uma retração menor para as argamassas contendo RPAH+ com relação à mesma condição e cura. Com isso, conclui-se que, na pior condição de cura e com temperaturas elevadas, até mesmo em percentuais diferentes de adição, tem-se um efeito de melhora quanto à retração, promovido pelo efeito de cura interna.

A partir disso, faz se concluir que o efeito mais satisfatório para a diminuição da retração encontra-se nas idades iniciais, até 3 dias, gerando uma necessidade de observa-se o efeito promissor que o uso do RPAH gera nas primeiras 24h de moldagem. Além disso, o efeito de retração é fortemente influenciado pelo tipo de cimento, quanto maior o calor de hidratação, maior a probabilidade de geração de retração, e quanto maior o teor de adição no cimento, como no caso do CP IV, mais variado será o efeito de retração, sendo encontrado de forma não linear.

## **5 - TESTE EM ESCALA PILOTO INDUSTRIAL**

Com base nos resultados obtidos no desenvolvimento dos dois projetos vislumbrou-se a necessidade de um teste em escala piloto industrial do material desenvolvido. Nesse sentido,

a empresa Britasinos Concretos Ltda. se propôs a disponibilizar uma área para que esse teste possa ser realizado. A seguir encontra-se uma breve descrição da área proposta para a realização do teste.

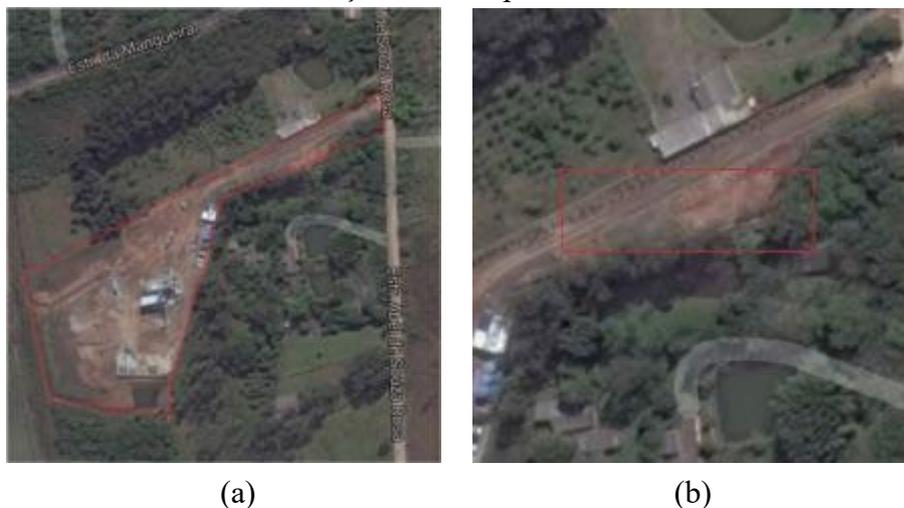
Localização: Britasinos Concretos Ltda

Filial Gravataí

Estrada Abel de Souza Rosa, 780 – Gravataí – RS

A área destinada para a realização do teste piloto industrial foi disponibilizada pela empresa Britasinos Concretos Ltda., inscrita no CNPJ sob número 93595346/0003-22, na filial da cidade de Gravataí, RS, localizada na Estrada Abel de Souza Rosa, 780 - Bairro Neólopolis - CEP 94.140-400. A figura 3 (a) mostra a localização da empresa, enquanto a figura 3 (b) destaca a área selecionada para a realização do teste piloto. Trata-se de uma área plana, sem movimentação de tráfego, que futuramente será destinada a estacionamento de veículos leves.

Figura 3 – (a) Britasinos Concretos, filial de Gravataí; (b) Área selecionada para a realização do teste piloto.



A superfície do terreno (figura 4) será nivelada e compactada previamente pela empresa para a execução de dois pisos em concreto de cimento Portland, cada um com área de 25 m<sup>2</sup> (dimensões de 5m x 5m em planta) e espessura de 15cm, totalizando um volume de 3,75 m<sup>3</sup> de concreto por piso, como ilustra a figura 5.

Figura 4 – Imagem do local onde será realizado o teste piloto.



Cada uma das placas receberá o mesmo concreto, uma mistura padrão fornecida pela própria empresa, com consumo de cimento de aproximadamente  $350 \text{ kg/m}^3$  de cimento CP IIF-40.

Figura 5 – Representação esquemática dos pisos de concreto a serem executados. Cada placa tem  $25\text{m}^2$  de área ( $5\text{m} \times 5\text{m}$  em planta) e  $15\text{cm}$  de espessura.

Referência	Concreto com cura interna
	<u>1m</u>

$e=0,15\text{m}$

O piso denominado como “Referência” receberá apenas a mistura padrão da concreteira, e não será realizado nenhum tipo de cura úmida (aplicação de umidade superficial) após a concretagem. Já o segundo piso, denominado “Concreto com cura interna” receberá a adição de um teor de  $0,65 \text{ kg}$  do material residual (RPAH) por  $\text{m}^3$  de concreto ( $0,65 \text{ kg/m}^3$ ), totalizando, portanto, uma adição de  $2,44 \text{ kg}$  de RPAH no volume de  $3,75 \text{ m}^3$  de concreto utilizado nesse piso.

As placas serão concretadas no mesmo dia, com ambos concretos tendo a mesma consistência (abatimento de tronco de cone, ou *slump*, igual a  $160\text{mm}$ ). O acabamento

superficial do concreto será executado através de reguamento (sem o uso de polidora mecânica), e a superfície dos pisos ficará exposta ao ambiente (sol e vento) durante todo o período de ensaio, a fim de induzir a formação de fissuras superficiais. A análise da presença de fissuras será realizada diariamente durante a primeira semana após a concretagem, e semanalmente um período de três meses, por meio de inspeção visual, registro fotográfico (com análise das imagens digitais) e controle da abertura das fissuras com uso de um fissurômetro (uma régua graduada utilizada especificamente para este fim).

São Leopoldo, 16 de março de 2018.

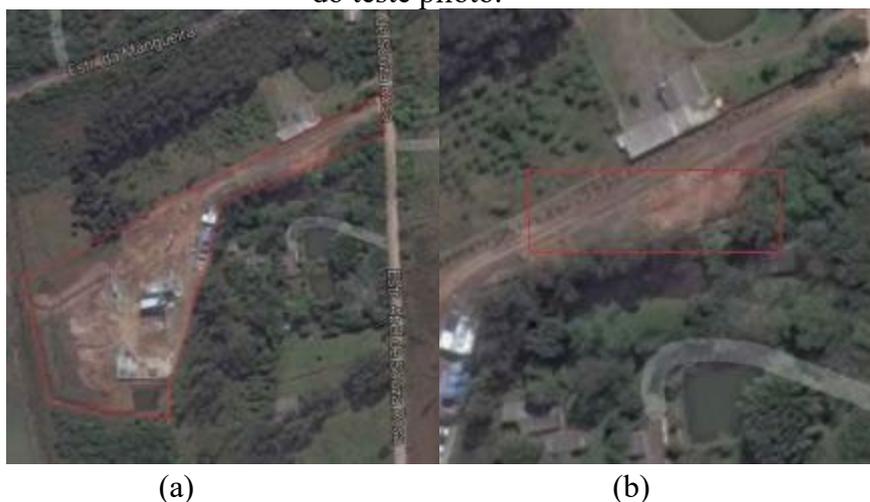
Prezadas Senhoras,

Em resposta, aos questionamentos realizados no Of. FEPAM/SELMI-OFGSOL nº 00440/2018, datado em 22 de fevereiro de 2018, referente ao processo administrativo nº 000205-0567/18-3, são feitas as seguintes colocações:

**Questionamento 1:** Desenho/figura com a localização exata de onde serão executadas as duas placas cimentícias na área da destinatária, visto que o local informado na imagem apresentada no Relatório Plastibrandt (no acesso) difere do informado no formulário 1010 - item 1.1.2 (abaixo da esteira de alimentação das baias de agregados).

**Resposta:** Durante o desenvolvimento do projeto foi acordado a alteração do local de execução das duas placas cimentícias, em função de alguns aspectos como: acesso dos pesquisadores envolvidos, ambiente onde ofereça uma agressividade maior ao concreto (tráfego intenso de veículos pesados) e lugar onde não prejudique o funcionamento da empresa. Na figura 1, está descrito o local correto onde serão executadas as duas placas cimentícias.

Figura 1 – (a) Britasinos Concretos, filial de Gravataí; (b) Área selecionada para a realização do teste piloto.



**Questionamento 2:** Descrição do processo de armazenamento e beneficiamento dado ao resíduo antes de sua utilização no teste piloto, bem como esclarecer se o referido percentual de resíduo estará sendo utilizado em substituição a alguma das matérias-primas utilizadas no concreto ou será apenas um agregado/aditivo para fins de cura interna, além de informar o período de tempo previsto para realização do teste, do início até a avaliação/conclusão final.

**Resposta 2:** Após coletado o material, foi verificado, em estudos anteriores que para a aplicação em concretos é necessária uma hidratação do polímero durante o período mínimo de uma semana, para que a água seja absorvida completamente pelo material. Para o cálculo da quantidade necessária foi utilizada a equação 1 (Bentz, Lura e Roberts 2005):

$$M_{LWA} = \frac{C_f \times CS \times \alpha^{máx}}{S \times \Phi_{LWA}}$$

(Equação 1)

O material utilizado será inserido como aditivo para o concreto, tendo em visto suas propriedades plastificantes e propriedade para redução de fissuras, desta forma o polímero utilizado contribui tanto para melhorar a fluidez do concreto quanto para a redução de fissuras do mesmo. O período de ensaio será de 28 dias a partir da data da concretagem. Após este período, os resultados obtidos no ensaio piloto industrial serão relacionados com os resultados obtidos em escala laboratorial.

**Questionamento 3:** Documento de ciência e concordância entre as empresas envolvidas, isto é, uma manifestação de interesse, por parte da Unidade de Destino (Britasinos) e o comprometimento por parte da Unidade Geradora do resíduo (Kimberly-Clark), em relação à proposta, explicitando as responsabilidades de cada uma delas nesta etapa, conforme solicitado no item 7.3 da Diretriz N°01/2010, que trata de incorporação de resíduos sólidos em processos industriais.

**Resposta 3:** Documentos em anexo, intitulados respectivamente como:  
CienciaKimberly.pdf e CienciaBritasinos.pdf

**Questionamento 4:** Cópia das Licenças de Operação das empresas Plásticos Brandt e Britasinos Concretos, conforme solicitado no item 7.4 da Diretriz N°01/2010

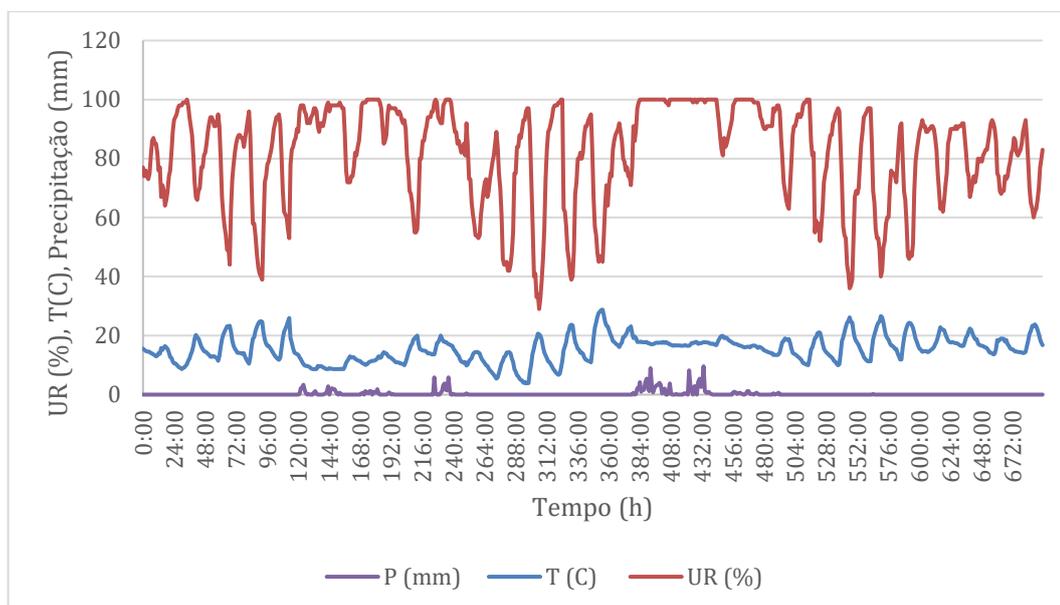
**Resposta 4:** Documentos em anexo, intitulados respectivamente como: LOBritasinos.pdf e LOKimberly.pdf

**Questionamento 5:** Informações acerca de limitações relativas à utilização do resíduo no processo industrial, conforme solicitado no item 7.5 da Diretriz N°01/2010, além de definir condição/padrão/forma de como o resíduo deve ser "apresentado" para que seja aceito como "produto" pela destinatária, a fim de assegurar a validade do estudo realizado.

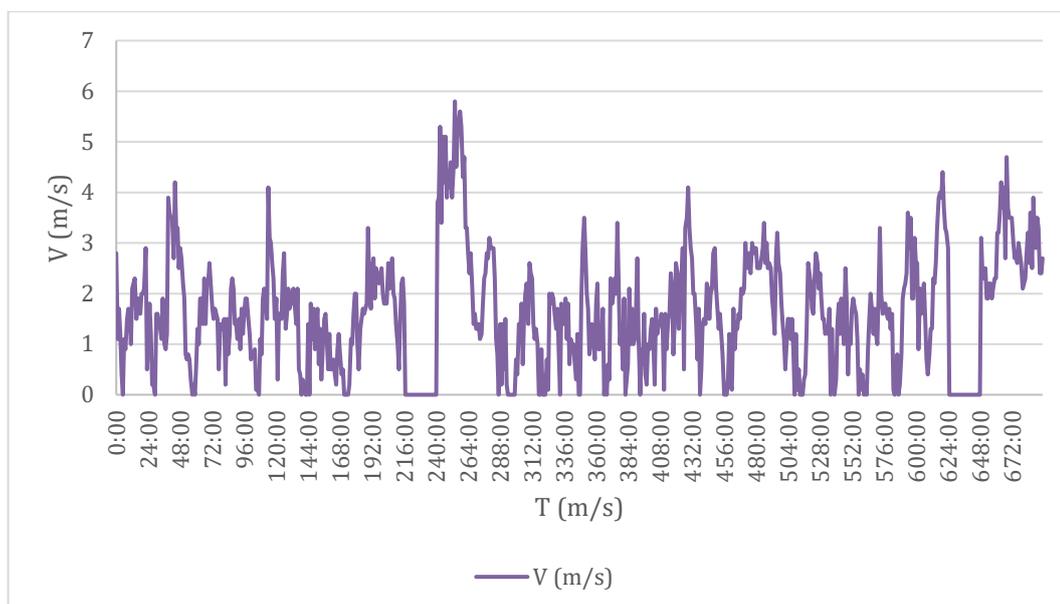
**Resposta 5:** Conforme calculado o volume de material a ser incorporado no concreto é de aproximadamente 0,13% do consumo de cimento. Como o material possui uma

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC)

absorção de 55 g/g, uma quantidade maior poderia comprometer o concreto, devido à geração de poros. A princípio será “apresentado” embalado já hidratado, para que possa ser comercializado e, incorporado diretamente na produção do concreto. O Limite máximo, conforme indicado no relatório, seria um consumo de 0,65 kg/m<sup>3</sup> do material.

**10 ANEXO C – QUADRO DE CLIMA DO PERÍODO DO ENSAIO EM CAMPO**

Fonte: Adaptado de INMET



Fonte: Adaptado de INMET

## 11 ANEXO D – AUTORIZAÇÃO DA FEPAM



Processo nº

205-05.67 / 18.3

AUTGER Nº

00068 / 2018

### AUTORIZAÇÃO GERAL

A Fundação Estadual de Proteção Ambiental, criada pela Lei Estadual nº 9.077 de 04/06/90, registrada no Ofício do Registro Oficial em 01/02/91, e com seu Estatuto aprovado pelo Decreto nº 51.761, de 26/08/14, no uso das atribuições que lhe confere a Lei nº 6.938, de 31/08/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 06/06/90 e com base nos autos do processo administrativo nº 205-05.67/18.3 concede a presente AUTORIZAÇÃO GERAL.

#### I - Identificação:

EMPREENDEDOR RESPONSÁVEL: 167251 - KIMBERLY - CLARK BRASIL IND E COM PROD DE HIGIENE LTDA

CPF / CNPJ / Doc Estr: 02.290.277/0020-94  
 ENDEREÇO: ESTRADA DO CONDE, 1785  
 FLOR DO CONDE  
 92990-000 ELDORADO DO SUL - RS

EMPREENDIMENTO: 15145

LOCALIZAÇÃO: ESTRADA DO CONDE, 1785  
 FLOR DO CONDE  
 ELDORADO DO SUL - RS  
 COORDENADAS GEOGRÁFICAS: Latitude: -30,01754074 Longitude: -51,31113800

A PROMOVER: FABRICAÇÃO DE PRODUTOS HIGIENE PESSOAL DESCARTAV

RAMO DE ATIVIDADE: 2.110,10  
 MEDIDA DE PORTE: 40.000,00 área útil em m<sup>2</sup>  
 ÁREA DO TERRENO (m<sup>2</sup>): 87.000,00  
 ÁREA CONSTRUÍDA (m<sup>2</sup>): 21.000,00  
 Nº DE EMPREGADOS: 452

#### II - Condições e Restrições:

##### 1. Quanto ao Empreendimento:

- 1.1- a presente Autorização refere-se à realização de Projeto Piloto, em escala industrial, para Incorporação de Resíduo de Produto Absorvente de Higiene (RPAH), proveniente do processo industrial da empresa Kimberly-Clark Brasil Ltda, em 02 (duas) placas de concreto de 25m<sup>2</sup>, com dimensões de 5m por 5m e 15cm de espessura, sem uso de armadura, com base de lona;
- 1.2- o Projeto Piloto será executado em área da empresa Britasinos Concretos Ltda, Licença de Operação N°119/2016, localizada na Estrada Abel de Souza Rosa N°780, município de Gravataí - RS, conforme apresentada no projeto (acesso ao empreendimento);
- 1.3- na execução do Projeto Piloto:
  - 1.3.1- não está prevista a geração de resíduos sólidos e para os efluentes líquidos, eventualmente gerados na limpeza dos caminhões, deverão ser tratados com os demais resíduos da central dosadora de concreto na empresa Britasinos Concretos Ltda;
  - 1.3.2- não está previsto o manejo de vegetação na área destinada ao teste;
  - 1.3.3- o resíduo de produto absorvente de higiene deverá ser fornecido hidratado, nas condições adequadas para adição à placa cimentícia de prova, sendo o mesmo inserido como aditivo ao concreto, em virtude de suas propriedades plastificantes e de redução de fissuras;
  - 1.3.4- a placa cimentícia de prova (concreto com cura interna) terá adição de 0,65Kg do Resíduo de Produto Absorvente de Higiene - RPAH por m<sup>3</sup> de concreto, num total de 2,44Kg de RPAH para o volume de 3,75m<sup>3</sup> utilizado nesse piso;

AUTGER Nº 00068 / 2018

Gerado em 28/03/2018 17:32:05

Id Doc 890711

Folha 1/3

- 1.3.5- a placa de referência terá mistura padrão - cimento CP IIF-40 - 350Kg/m<sup>3</sup> - sem aplicação de umidade superficial após a concretagem;
- 1.3.6- ambas as placas cimentícias serão concretadas no mesmo dia, tendo concretos com mesma consistência (slump=160mm), acabamento através de regulamento, com superfícies expostas ao ambiente durante o período de ensaio;
- 1.3.7- o período de ensaio será de 28 dias a partir da data da concretagem;
- 1.4- os responsáveis técnicos pela execução do Projeto Piloto são:
  - 1.4.1- Eng. Civil Emerson Cruz Macedo - CREA RS 085212 - ART N°9321897 e,
  - 1.4.2- Eng. Civil Luis Paulo Ledur - CREA RS 093470 - ART N°9297110;
- 1.5- o empreendedor é responsável por manter condições operacionais adequadas, respondendo por quaisquer danos ao meio ambiente decorrentes da má operação do empreendimento;
- 1.6- deverão ser atendidas, na íntegra, as condições e restrições constantes da Licença de Operação vigente, expedida pela FEPAM, sob pena de suspensão desta Autorização;
- 1.7- quaisquer alterações a serem efetuadas e/ou procedimentos operacionais diferentemente do apresentado no Projeto Piloto deverão ser informadas imediatamente a esta FEPAM;
- 1.8- o não cumprimento das disposições da Autorização emitida poderá acarretar no seu cancelamento, estando ainda o empreendedor sujeito às penalidades previstas na Legislação;

#### **2. Quanto aos Riscos Ambientais e Plano de Emergência:**

- 2.1- em caso de acidente ou incidente com risco de danos a pessoas e/ou ao meio ambiente, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM deverá ser imediatamente informada através do telefone (51) 99982-7840 (24h);

#### **3. Quanto ao Monitoramento:**

- 3.1- durante o período de realização dos testes deverá ser avaliada a viabilidade do uso pretendido, garantindo as condições técnicas e de proteção ambiental tanto do processo quanto do bem produzido, o qual deverá apresentar características de acordo com as especificações técnicas do produto, executando para tanto todas as avaliações necessárias para tal;
- 3.2- deverá ser apresentado à FEPAM, em um prazo de até 60 (sessenta) dias após o término dos testes, o resultado dos mesmos, através de um Relatório Técnico conclusivo da avaliação de desempenho do objeto desta autorização, contendo, no mínimo, informações acerca dos ensaios executados, procedimentos na mistura, percentuais testados de resíduo e dados sobre o percentual a ser incorporado, dificuldades enfrentadas, interpretações acerca dos testes, conclusões e recomendações necessárias quanto à aplicação prática continuada desta utilização, entre outras informações julgadas importantes, em especial no âmbito ambiental, devidamente assinado por toda a equipe técnica responsável pela elaboração e desenvolvimento do projeto, anexando a(s) ART(s) do(s) responsável(is) pelo mesmo;

#### **4. Quanto ao Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN:**

- 4.1- deverá ser feita a comunicação imediata ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN na hipótese de descoberta fortuita de quaisquer elementos de interesse arqueológicos ou pré-histórico, histórico, artístico ou numismático, na área do empreendimento, conforme previsto no art. 18 da Lei 3.924 de 26 de julho de 1961;

### **III - Documentos a apresentar para solicitação da Atualização da Licença de Operação:**

- 1- acessar o Sistema on line de Licenciamento, disponível no site da FEPAM, <http://www.fepam.rs.gov.br>, e preencher/atualizar as informações solicitadas. O Manual de Operação do Sistema on line encontra-se disponível no site;

Qualquer alteração na representação do empreendedor ou alteração do endereço para recebimento de correspondência da FEPAM, deverá ser imediatamente informada à mesma;

Esta Autorização é válida para as condições acima até 28 de março de 2019, caso ocorra o descumprimento das condições e restrições desta autorização, o empreendedor estará sujeito às penalidades previstas em Lei.

Esta Autorização deverá estar disponível no local da atividade licenciada para efeito de fiscalização;

Esta Autorização não dispensa nem substitui quaisquer alvarás ou certidões de qualquer natureza exigidos pela Legislação Federal, Estadual ou Municipal, nem exclui as demais licenças ambientais.

Data de emissão: Porto Alegre, 26 de março de 2018.

Este documento licenciatório é válido para as condições acima no período de 28/03/2018 à 28/03/2019.

Este documento licenciatório foi certificado por assinatura digital, processo eletrônico baseado em sistema criptográfico assimétrico, assinado eletronicamente por chave privada, garantida integridade de seu conteúdo e está à disposição no site [www.fepam.rs.gov.br](http://www.fepam.rs.gov.br).

fepam®.

Documento Assinado Digitalmente



Nome do arquivo: 1grj1nat.2lu  
Autenticidade: Documento Integro



DOCUMENTO ASSINADO POR	DATA	CPF/CNPJ	VERIFICADOR
Gabriel Simioni Ritter	29/03/2018 11:57:00 GMT-03:00	01081643064	Assinatura válida

Documento Assinado Digitalmente

Documento eletrônico assinado digitalmente conforme MP nº 2.200-2/2001 de 24/08/2001, que institui a infraestrutura de Chaves Públicas Brasileira - ICP-Brasil.