

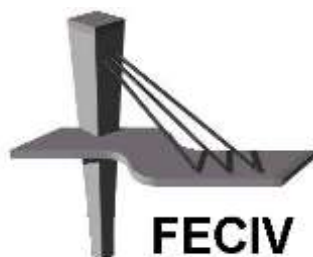


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS  
COM ADIÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS E DE  
POLIPROPILENO PARA USO EM PAREDES  
ESTRUTURAIS**

**ANA PAULA SILVA NASCENTES BORGES**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**ANA PAULA SILVA NASCENTES BORGES**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM  
ADIÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS E POLIPROPILENO  
PARA USO EM PAREDES ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Aparecida de Castro Motta**

Uberlândia, 15 de março de 2017.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

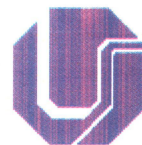
---

- B364e  
2017      Borges, Ana Paula Silva Nascentes, 1990-  
            Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais  
            e de polipropileno para uso em paredes estruturais / Ana Paula Silva  
            Nascentes Borges. - 2017.  
            90 f. : il.
- Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta.  
            Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
            Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
            Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1101>  
            Inclui bibliografia.
1. Engenharia civil - Teses. 2. Concreto - Aditivos - Teses. 3. Fibras  
            - Teses. 4. Polipropileno - Teses. I. Motta, Leila Aparecida de Castro. II.  
            Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em  
            Engenharia Civil. III. Título.

---

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



## ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

**ATA Nº:** 178/2017

**CANDIDATO:** Ana Paula Silva Nascentes Borges

**Nº. Matrícula:** 11422ECV002

**ORIENTADOR:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Aparecida de Castro Motta

**TÍTULO:** "Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e polipropileno para uso em paredes estruturais".

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Estruturas e Construção Civil

**LINHA DE PESQUISA:** Construção Civil

**PROJETO DE PESQUISA:** Inovação em Materiais de Construção Civil

**DATA DA DEFESA:** 15 de março de 2017

**LOCAL:** Sala de Projeções, bloco 1Y. **HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO:** 09h / 11h45 min

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Turíbio José da Silva – FECIV/UFU; Eugênia Fonseca da Silva – PECC/UnB e Leila Aparecida de Castro Motta** orientadora da candidata. Ressalta-se que a **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eugênia Fonseca da Silva** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de Brasília/DF e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Aparecida de Castro Motta** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, a senhora presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata APROVADA. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

\_\_\_\_\_  
Professor Orientador: **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU**

\_\_\_\_\_  
Membro externo: **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eugênia Fonseca da Silva – PECC/UnB**

\_\_\_\_\_  
Membro interno: **Prof. Dr. Turíbio José da Silva – FECIV/UFU**

Uberlândia, 15 de MARÇO de 2017.

# Agradecimentos

---

Primeiramente à Deus por tudo.

Aos meus queridos pais que sempre me incentivaram, deram todo suporte e apoio necessário, e não pouparam esforços para que esta pesquisa pudesse ser concluída, amo muito vocês!

À minha mais amada irmã, Mariana, pelo incentivo, conselhos, piadas, puxões de orelha, dentre várias outras formas de demonstrações de amor, que contribuíram bastante para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora Leila, um verdadeiro exemplo de amor pela docência, agradeço por tudo, pela paciência, compreensão, além de todo conhecimento transmitido e otimismo demonstrado no decorrer da pesquisa.

À Cristiane Pires (Cris!), do laboratório de estruturas, por toda ajuda, conselhos, frases motivadoras, esclarecimentos, além de todo auxílio necessário para que os ensaios pudessem ser concluídos, inclusive em feriados, férias e finais de semana.

Aos amigos e colegas, inclusive de pós-graduação, que me ajudaram a ultrapassar todas as barreiras do dia a dia, auxiliando no que foi necessário além dos incentivos e conselhos.

À Eliane Bernardes que teve grande participação na preparação dos concretos e dos ensaios e pela motivação para a conclusão dos mesmos.

Aos funcionários da FECIV. Aos professores que tiveram participação importante para a conclusão deste trabalho, com sugestões e esclarecimentos. Ao secretário do PPGECC Rafael Monteiro, sempre solícito a todos os pedidos que foram realizados. À Amanda do laboratório de pavimentação e Tulio do laboratório de solos que contribuíram com materiais e equipamentos que foram necessários no decorrer da pesquisa.

Aos meus avós e tios que, com muito amor, me acompanham com orações e sábios conselhos (Amo vocês!).

À BASF® pela doação do aditivo e à Brasmix® pela doação da fibra de polipropileno.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente nesta conquista: Muito obrigada!

BORGES, A. P. S. N. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. 90 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

## RESUMO

---

Estudou-se neste trabalho as propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. Foram utilizados diferentes teores de fibras vegetais (sisal e rami) e de polipropileno. Com a atual necessidade de preservação da natureza, tem-se uma busca pela redução do uso dos materiais responsáveis por grandes impactos ambientais, tanto na fabricação, quanto na utilização e no descarte. Buscou-se assim, realizar uma comparação do desempenho do concreto com a adição de fibras vegetais, que apesar de serem bastante estudadas em compósitos cimentícios, não costumam ser incorporadas na prática, e as fibras sintéticas, especificamente a fibra de polipropileno, já bastante utilizada pelas construtoras com o objetivo de reduzir as fissuras nas paredes, a fim de se verificar a possível substituição. Quanto aos ensaios realizados, foram avaliadas a retração por secagem restringida, pelo ensaio do anel, além das propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) e físicas (massa específica, índice de vazios, absorção por imersão e por capilaridade). Os teores utilizados foram de 0,25% e 0,5% para as fibras vegetais e para a fibra de polipropileno apenas o teor de 0,25%, pelo fato do teor de 0,5% dessa fibra ter apresentado trabalhabilidade extremamente baixa, inviabilizando sua aplicação. Em relação à retração restringida foi observado que a adição de 0,25% de fibras não resultou em incremento do desempenho quando comparado ao concreto sem adição de fibras. Porém a adição de 0,5% de fibras vegetais demonstrou resultados satisfatórios, sendo superiores ao concreto de referência (sem adição de fibras). Foi constatado também que as propriedades mecânicas dos concretos com adição de fibras, em geral inferiores ao concreto tido como referência, não sofreram grandes alterações, exceto para o concreto com o maior teor de rami, que por não apresentar dispersão adequada das fibras, apresentou resultados inferiores. Em contrapartida, as propriedades físicas apresentaram maiores variações, principalmente quanto ao tipo de fibra utilizado, sendo que o concreto com 0,25% de rami apresentou a maior absorção e índice de vazios, dentre todos os concretos estudados. Em relação à absorção por capilaridade, os concretos com adição das fibras vegetais demonstraram melhor desempenho, ou seja, redução da absorção por capilaridade. Assim conclui-se que é possível a substituição da fibra de polipropileno pelas fibras vegetais, principalmente de sisal, devido às proximidades nos resultados encontrados, porém devem ser realizados mais estudos a fim de se comprovar a eficiência dos dois tipos de fibras utilizados.

Palavras-chave: Propriedades do concreto. Fibra de polipropileno. Fibra de rami. Fibra de sisal. Retração por secagem restringida.

BORGES, A. P. S. N. Study of concrete properties with addition of vegetal and polypropylene fibers for use in structural walls. 90 p., MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2017.

## ABSTRACT

---

The properties of concrete with and without addition of fibers was studied in this research. Different vegetal fiber contents (sisal and ramie) and polypropylene fiber were used. With the current need for nature preservation, there is a search by reducing the use of materials responsible for major environmental impacts, both in manufacturing, use and disposal. In this way, was done a performance comparison between concrete with addition of vegetal fibers and synthetic fibers, to propose a possible replacement, was done. Vegetal fibers are studied in cementitious composites but are not usually incorporated in the practice. Synthetic fibers, specifically the polypropylene fiber, are already used by construction companies to reduce cracks in the walls. For the tests performed, was evaluated the shrinkage under restrained conditions by ring test, the mechanical properties (compressive strength, tension strength by diametrical compression and static modulus of elasticity) and physical properties (density, voids, immersion and capillary absorption). The contents used were 0.25% and 0.5% for the vegetable fibers and for the polypropylene fiber only the content of 0.25%, because the 0.5% content of this fiber showed extremely low workability. In relation to the restricted retraction, it was observed that the addition of 0.25% of fibers did not result in an increase in performance compared to concrete without fiber addition, but the addition of 0.5% of vegetal fibers showed satisfactory results, being superior to the reference concrete. It was verified that the mechanical properties of the concrete with fiber addition, generally lower than the reference concrete (without addition of fibers), did not undergo major changes, except for concrete with the highest rami content, which did not present adequate dispersion, presented much lower results. On the other hand, the physical properties presented greater variations, mainly in the type of fiber used, the concrete with 0.25% ramie content presented the highest absorption and voids, among all the concretes studied. In relation to the absorption by capillarity the concretes with addition of the vegetal fibers demonstrated better performance, that is, reduction of absorption by capillarity. Thus, it is concluded that polypropylene fiber substitution by vegetal fibers, especially sisal, is possible due to the proximity of the results found, but more studies must be carried out to prove the efficiency of the two types of fibers used.

**Keywords:** Concrete properties. Polypropylene fiber. Ramie fiber. Sisal fiber. Shrinkage under restrained conditions.

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 - Dados do programa Minha Casa Minha Vida desde o início (2009) até dezembro de 2015 .....	15
Figura 2 – Quantidade de unidades habitacionais construídas utilizando a parede de concreto .....	16
Figura 3 – Fluxograma para a execução das paredes de concreto .....	17
Figura 4 – Habitação em parede de concreto após a desforma .....	18
Figura 5 –a) C-S-H antes da saída da água adsorvida; b) C-S-H após a saída da água adsorvida.....	23
Figura 6 – Medida da variação unidimensional do prisma de concreto .....	26
Figura 7 – Resultado típico do ensaio do anel.....	27
Figura 8 – Esquema da constituição de compósitos fibrosos .....	30
Figura 9 – Classificação das fibras vegetais .....	33
Figura 10 – Seção transversal da fibra de coco .....	35
Figura 11 – Esquema da célula individual fibra vegetal com dimensões aproximadas .....	36
Figura 12 – Planta de sisal.....	37
Figura 13 – Plantação de rami .....	38
Figura 14 – Representação de fissura em materiais compósitos .....	39
Figura 15 – Imagem de elétrons retroespalhados aos sete dias de idade no compósito com fibras de coco. Seta 1- descolamento da fibra. Seta 2 - fissura .....	40
Figura 16 – Imagem de elétrons retroespalhados aos 149 dias de idade no compósito com fibras de sisal .....	41
Figura 17 – Fluxograma das etapas do programa experimental.....	44
Figura 18 – Fibra de sisal .....	45
Figura 19 – Fibra de rami .....	45
Figura 20 – a) Fibra de sisal; b) Fibra de rami; c) Fibra de polipropileno .....	50
Figura 21 – a) Ensaio de abatimento do tronco de cone; b) Ensaio de determinação da massa específica no estado fresco; c) Moldagem dos corpos de prova.....	52
Figura 22 – Equipamento para o ensaio de retração restringida (ASTM 1581– 16).....	53



Figura 23 – Representação esquemática do posicionamento dos extensômetros.....	54
Figura 24 – a) Equipamento para a aquisição de dados; b) Anel instrumentado .....	54
Figura 25 – a) Preenchimento da primeira camada do anel; b) Moldagem do anel finalizada .....	55
Figura 26 – Processo de cura úmida nas primeiras 24 horas após a moldagem.....	56
Figura 27 – a) Esquema do processo de secagem; b) Finalização do processo de selagem .....	56
Figura 28 – a) Corpos de prova preparados para ensaio; b) Ensaio de compressão finalizado .....	57
Figura 29 – Disposição do corpo de prova para o ensaio de compressão diametral .....	58
Figura 30 - Distribuição da tensão de tração ao longo do diâmetro de um corpo de prova com carregamento .....	58
Figura 31 – a) Disposição dos corpos de prova para a realização do ensaio de absorção por capilaridade; b) Pesagem do corpo de prova .....	60
Figura 32 – Deformação do anel de aço para o concreto de referência.....	63
Figura 33 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,25S .....	64
Figura 34 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,25R.....	64
Figura 35 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,25P .....	65
Figura 36 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,5S .....	66
Figura 37 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,5R.....	67
Figura 38 – a) fissura no concreto 0,25S; b) fissura no concreto 0,5R .....	69
Figura 39 – Efeito do tipo e teor de fibra na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias .....	71
Figura 40 – Distribuição da fibra de rami no concreto 0,5R com destaque para os “ninhos” .....	71
Figura 41 – Seção transversal de um corpo de prova do concreto 0,5S .....	72
Figura 42 – Efeito do tipo e teor de fibra no módulo de elasticidade dos concretos estudados .....	73
Figura 43 – Efeito do tipo e teor de fibra na resistência à tração dos concretos .....	74
Figura 44 – Absorção de água por capilaridade nos concretos estudados .....	78
Figura 45 – Absorção de água por capilaridade a) Ref; b) 0,25S; c) 0,25R; d)0,25P; e) 0,5S; f)0,5R.....	79
Figura 46 – Representação esquemática de materiais com porosidade similar a) alta permeabilidade; b)baixa permeabilidade.....	80

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Valores típicos de propriedades físicas e mecânicas das fibras.....	32
Tabela 2– Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais .....	35
Tabela 3 – Propriedades mecânicas da fibra de sisal.....	45
Tabela 4 – Propriedades das fibras de rami .....	46
Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de polipropileno .....	46
Tabela 6 – Características do cimento CP V ARI ensaiadas em laboratório .....	47
Tabela 7 – Características do cimento CP V ARI de acordo com o fabricante.....	47
Tabela 8 – Caracterização dos agregados miúdos utilizados .....	47
Tabela 9 – Caracterização do agregado graúdo utilizado.....	48
Tabela 10 – Dados técnicos do aditivo hiperplastificante utilizado .....	48
Tabela 11 – Dosagem do concreto (1 m <sup>3</sup> ) .....	49
Tabela 12 – Relação do teor de fibras e de aditivo utilizados na pesquisa.....	51
Tabela 13 – Resultados de abatimento e massa específica no estado fresco.....	62
Tabela 14 – Valores médios de idade da fissuração ocorrida nos concretos.....	67
Tabela 15 – Resultados médios das propriedades mecânicas dos concretos estudados.....	70
Tabela 16 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos utilizados.....	75
Tabela 17 – Absorção de água por capilaridade nos concretos estudados .....	77

# SÍMBOLOS E SIGLAS

---

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEF	Caixa Econômica Federal
CP V ARI	Concreto Portland V de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
EDS	Espectroscopia de raio-X por dispersão de energia ( <i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i> )
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FJP	Fundação João Pinheiro

# SUMÁRIO

---

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Importância do tema .....	11
1.2 Objetivo .....	12
1.2.1 Objetivos específicos.....	12
1.3 Estrutura do trabalho .....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
2.1 Paredes de concreto .....	14
2.1.1 Execução das paredes de concreto.....	17
2.1.2 Normalização quanto às paredes de concreto.....	18
2.1.2.1 Requisitos da qualidade da estrutura .....	19
2.1.2.2 Concreto .....	20
2.1.2.3 Lançamento e adensamento.....	20
2.2 Retração do concreto .....	21
2.2.1 Tipos de retração .....	22
2.2.1.1 Retração plástica.....	22
2.2.1.2 Retração por secagem ou retração hidráulica .....	23
2.2.1.3 Retração autógena.....	24
2.2.1.4 Retração térmica.....	24
2.2.1.5 Retração por carbonatação.....	25
2.2.2 Métodos de medição da retração .....	25
2.2.3 Atuação da fibra na retração do compósito .....	27
2.3 Materiais Compósitos .....	29
2.3.1 Classificação dos compósitos .....	29
2.3.2 Utilização de fibras na matriz cimentícia .....	31
2.3.3 Fibras naturais .....	32
2.3.3.1 Análise microestrutural.....	35

2.3.3.2 O sisal .....	37
2.3.3.3 O rami .....	37
2.3.4 Desempenho e durabilidade dos compósitos reforçados com fibras vegetais.....	38
2.3.4.1 Zona de transição e incompatibilidade física entre fibra e matriz.....	39
2.3.4.2 Degradação das fibras.....	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 Materiais utilizados .....	44
3.1.1 Fibra de sisal.....	44
3.1.2 Fibra de rami.....	45
3.1.3 Fibra de polipropileno .....	46
3.1.4 Cimento .....	46
3.1.5 Agregados.....	47
3.1.5.1 Agregado miúdo .....	47
3.1.5.2 Agregado graúdo .....	48
3.1.6 Água e aditivo.....	48
3.2 Produção do compósito .....	49
3.2.1 Dosagem utilizada no concreto.....	49
3.2.2 Produção do compósito .....	49
3.2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova .....	52
3.3 Métodos de ensaio .....	53
3.3.1 Análise da retração por secagem restringida (ASTM C1581-16) .....	53
3.3.2 Determinação das propriedades físicas e mecânicas do compósito .....	57
3.3.2.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	57
3.3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral .....	58
3.3.2.3 Massa específica e absorção de água por imersão.....	59
3.3.2.4 Absorção por capilaridade .....	59
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	61
4.1 Resultados no estado fresco.....	61
4.2 Resultados no estado endurecido.....	62
4.2.1 Retração por secagem restringida.....	62
4.2.2 Propriedades mecânicas.....	69
4.2.3 Propriedades físicas .....	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	81
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	82

6 REFERÊNCIAS.....	83
--------------------	----

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Com o aumento da conscientização ambiental pela sociedade como um todo, tem-se uma busca por métodos construtivos de modo a racionalizar a mão de obra, reduzir desperdícios e buscar a incorporação de materiais renováveis, de forma a reduzir os materiais responsáveis por grandes impactos ambientais, tanto na fabricação, quanto na utilização e descarte.

A construção civil geralmente está associada à baixa produtividade, elevado desperdício, além do controle de qualidade insatisfatório. Assim, várias técnicas construtivas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reduzir algumas deficiências existentes nesse setor. Exemplos de modelos construtivos que podem ser considerados como uma evolução do modelo tradicional são: os pré-moldados que possuem como atributos o aumento da produtividade, diminuição do tempo de construção, além da redução de desperdícios e custos (OLIVEIRA, 2002) e as paredes de concreto maciças moldadas no local, que proporcionam maior qualidade e produtividade em comparação com a alvenaria (LORDSLEEM Jr., 1998).

De acordo com Sjöström (1996 apud JOHN, 2000) a construção civil é responsável por consumir cerca de 14% a 50% dos recursos naturais extraídos no planeta. Sendo assim, a busca por materiais renováveis e de baixo custo para utilização na construção civil é motivo de pesquisas desenvolvidas em todo mundo. Podem ser citados como exemplos a incorporação no concreto de resíduos cerâmicos de telha e tijolo (DIAS, 2004; LEITE et al., 2010) e a utilização de fibras vegetais (DANTAS; AGOPYAN, 1988).

### 1.1 Importância do tema

Com a necessidade de preservação da natureza, tem-se uma busca pela redução do uso dos materiais responsáveis por grandes impactos ambientais, tanto na fabricação, quanto na utilização e no descarte. A indústria da construção é conhecida por empregar materiais que geram grandes impactos ambientais na sua produção além da elevada produção de resíduos.

Diversas pesquisas e modelos construtivos já foram desenvolvidos com o intuito de melhorar esse panorama. Nesta pesquisa verifica-se a possibilidade de substituição das fibras de polipropileno pela fibra vegetal, uma vez que a fibra de polipropileno atualmente é empregada nos concretos utilizados em paredes estruturais para habitações de interesse social. Justifica-se esse tema na semelhança e até superação das propriedades mecânicas das fibras de sisal e rami quando comparadas à fibra de polipropileno, tendo como vantagens o baixo custo, o fato de ser renovável, ampla disponibilidade e eficiência energética.

Também essa pesquisa dá continuidade às pesquisas realizadas pelo grupo de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil (Universidade Federal de Uberlândia-UFU) que estuda o concreto para aplicação no sistema construtivo de paredes de concreto (CINTRA, 2015; MAGALHÃES, 2016; CAMPOS, 2017) comumente utilizado na região para construção de habitações de interesse social.

## **1.2 Objetivo**

Estudar a influência da adição das fibras vegetais (sisal e rami) na retração e em outras propriedades mecânicas e físicas do concreto para aplicação em paredes estruturais de edificações. Foram realizadas também comparações do desempenho das fibras vegetais com a fibra de polipropileno.

### *1.2.1 Objetivos específicos*

- a) definir dosagens e teores de fibras com desempenho adequado nos estados fresco e endurecido para a aplicação a que se destina;
- b) avaliar e comparar o fenômeno da retração por secagem restringida dos compósitos produzidos;
- c) avaliar e comparar as propriedades mecânicas e físicas dos compósitos estudados;
- d) analisar a viabilidade de substituição da fibra de polipropileno pela fibra vegetal.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos.



O trabalho se inicia com uma introdução aos temas que serão abordados, a importância e motivação para desenvolvê-lo, ainda no primeiro capítulo tem-se o objetivo deste estudo e a estruturação do texto.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica acerca do tema, com ênfase nos conceitos e assuntos que serão abordados no decorrer do texto.

No terceiro capítulo são especificados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, a forma de produção dos compósitos e os ensaios realizados.

No quarto capítulo é feita a apresentação análise e discussão dos resultados encontrados no decorrer da pesquisa.

Finalmente no último capítulo são apresentadas as considerações finais sobre esse trabalho, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

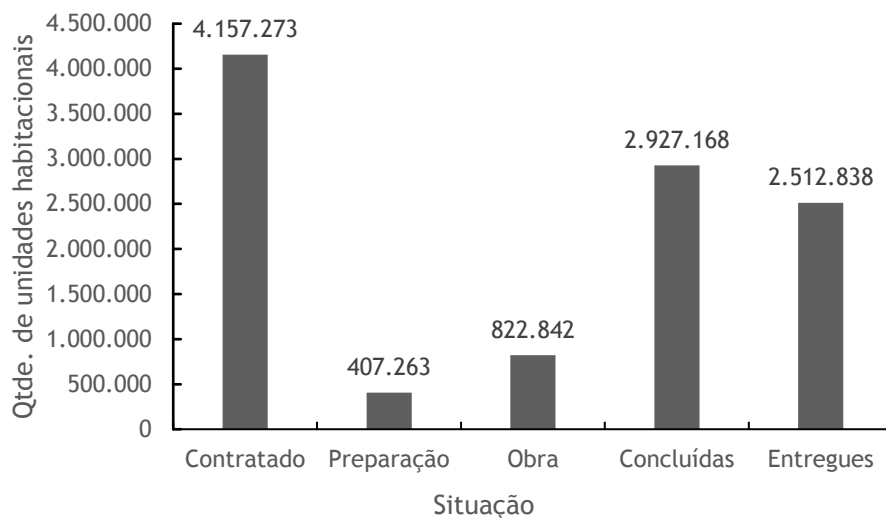
### 2.1 Paredes de concreto

A construção civil tem apresentado mudanças que contribuem significativamente para a melhoria na qualidade da cadeia produtiva, por meio de exigências contidas nas normas técnicas, redução do desperdício em canteiros de obras, utilização de sistemas industrializados e a formação de um sistema nacional de certificação (ABIKO; ORNSTEIN, 2002).

Mesmo com essas melhorias ainda se tem a carência em inovação tecnológica e em processos produtivos que resultariam na redução de custos e na melhoria da qualidade. Essas limitações contribuem para que o déficit habitacional no Brasil ainda apresente índices elevados. Segundo pesquisa da Fundação João Pinheiro (Fundação João Pinheiro – FJP, 2014) o déficit habitacional brasileiro em 2012 correspondia a 5,792 milhões de domicílios. Dentre as regiões do Brasil cabe destacar as regiões sudeste e nordeste, com os maiores índices.

Para reverter esse problema várias medidas já foram adotadas entre elas o programa habitacional Minha Casa Minha Vida. De acordo com Ana Maria Castelo, da Fundação Getúlio Vargas (FGV) os subsídios e condições de financiamento desses programas habitacionais ajudam a reduzir o déficit habitacional (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL – CEF, 2014). O programa Minha Casa Minha Vida teve início em 2009 e até dezembro de 2015 já foram entregues mais de 2,5 milhões de casas. Na Figura 1 pode ser visualizado o total de unidades habitacionais contratadas, em preparação, em obra, concluídas e entregues pelo programa desde o início em 2009 até dezembro de 2015.

Figura 1 - Dados do programa Minha Casa Minha Vida desde o início (2009) até dezembro de 2015

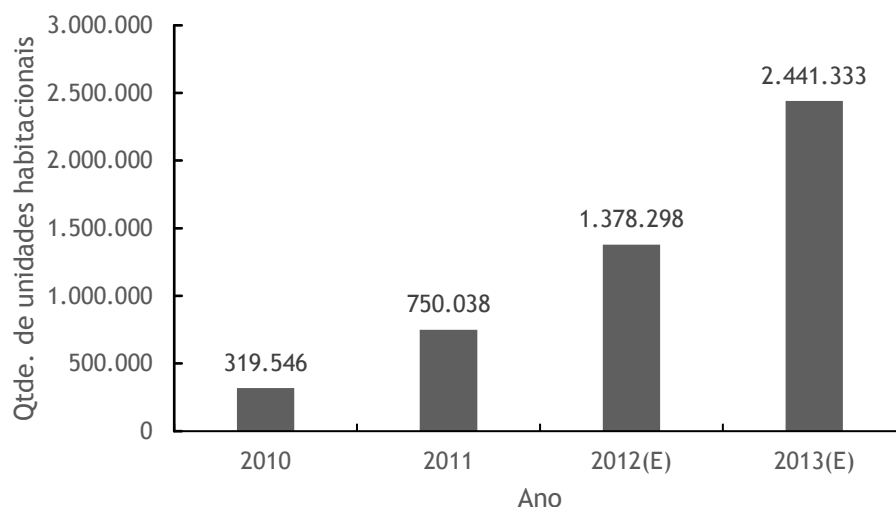


Fonte: Caixa Econômica Federal - CEF (2015).

Um dos sistemas construtivos utilizados em programas habitacionais financiados pela Caixa Econômica Federal são as paredes de concreto. Esse sistema vem ganhando mais espaço no mercado brasileiro.

O movimento nacional denominado Comunidade da Construção, que busca integrar a cadeia produtiva e aumentar o desempenho dos sistemas construtivos a base de cimento, reunindo construtoras, fabricantes de materiais, projetistas, prestadores de serviços, universidades, entidades e consultores, realizou uma pesquisa com as construtoras que representam grande parte do mercado de parede de concreto (dados de 2012). Na Figura 2 pode ser visualizado o aumento da quantidade de unidades habitacionais construídas utilizando esse sistema dos anos de 2010 e 2011 de acordo com a pesquisa realizada em nove grandes construtoras, assim como a estimativa indicada por “E” que foi realizada na época para os anos de 2012 e 2013.

Figura 2 – Quantidade de unidades habitacionais construídas utilizando a parede de concreto



Fonte: Coletânea ... (2013).

A adesão crescente deste modelo é consequência do mesmo ser um sistema construtivo racionalizado, que oferece as vantagens da produção em alta escala e sem perda de qualidade, possuindo condições técnicas e econômicas que atendem à demanda atual do mercado brasileiro da construção (COLETÂNEA ..., 2013).

Lordsleem Jr. (1998) cita algumas características que podem favorecer o emprego das paredes maciças moldadas no local quando comparada à alvenaria, entre elas:

- a) aumento da qualidade, tanto na execução quanto no acabamento;
- b) aumento da produtividade da mão de obra devido a sequência definida de tarefas, o que imprime um ritmo definido e resulta na redução do custo global da obra;
- c) planicidade da parede o que permite a utilização de um revestimento pouco espesso;
- d) menor quantidade de mão de obra necessária quando comparado ao sistema construtivo convencional;
- e) as atividades não dependem da habilidade do operário, não exigindo dessa forma qualificação da mão de obra, apenas treinamento.

Ainda de acordo com Lordsleem Jr. (1998), mesmo com suas vantagens, naquela época a utilização desse sistema ainda era vista por muitos com certo preconceito devido a sua utilização no passado, por ter sido feita de forma incorreta alguns problemas patológicos surgiram,

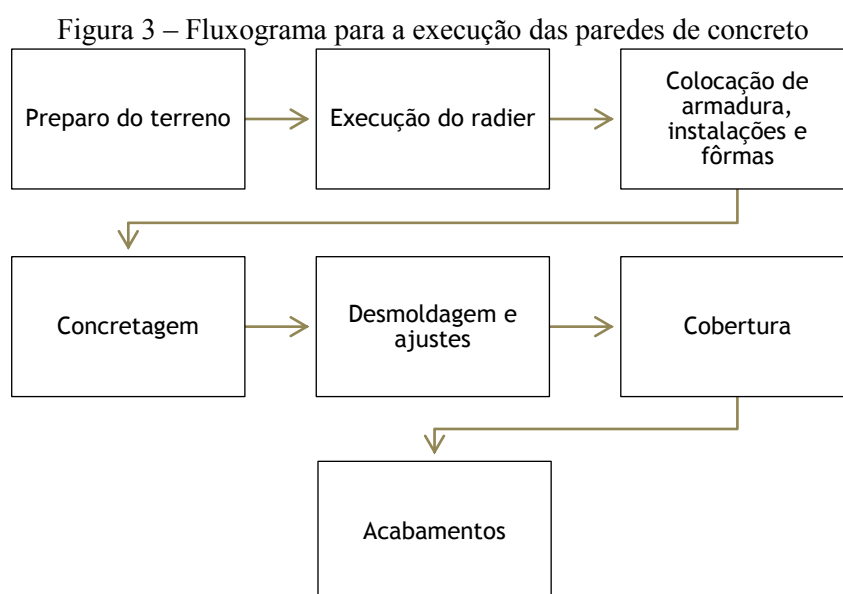
principalmente fissuras e umidade, juntamente com o desempenho insatisfatório da edificação, o que acabou se tornando uma desvantagem de sua utilização. Outros fatores que podem dificultar a implantação do sistema de paredes de concreto em relação a alvenaria são:

- a) elevado custo das fôrmas (podendo ser compensado com sua reutilização);
- b) necessidade de utilização de equipamentos de grande porte em alguns casos.

### 2.1.1 Execução das paredes de concreto

Na parede de concreto a estrutura e a vedação são formadas por um único elemento, que é a parede de concreto moldada *in loco*, podendo ser incorporadas também, parcialmente, instalações e esquadrias (COLETÂNEA..., 2008).

Para a produção das unidades, de acordo com Silva (2013) a obra é transformada em uma linha de montagem, em que as equipes são separadas de acordo com o serviço a ser executado, conforme pode ser visualizado no fluxograma na Figura 3. Misurelli e Massuda (2009) descrevem que nesse processo de produção o desperdício de mão de obra com as atividades não produtivas entre trabalhos, assim como materiais, pedaços de madeira, pregos e resíduos diversos acabam sendo substituídos por uma execução planejada, padronizada e com grande qualidade final.



Fonte: Adaptado de Silva (2013).

Sacht (2008) descreve que para a utilização desse sistema é recomendado um concreto com trabalhabilidade adequada para a moldagem (abatimento do tronco de cone acima de 150 mm). Quanto à resistência à compressão, de acordo com a mesma autora, é recomendada aos 28 dias

de acordo com o projeto estrutural, devendo ser levada em consideração o ambiente de exposição e durabilidade compatível com a vida útil de projeto.

De acordo com pesquisa realizada pelo movimento Comunidade da Construção, com as principais construtoras que utilizam esse sistema, outra característica desse concreto é a adição de fibras, adotada por 73% das construtoras pesquisadas, com a finalidade de reduzir as fissuras nas paredes. Das construtoras que utilizam concreto com fibra, todas utilizam a fibra de polipropileno (COLETÂNEA..., 2013).

Na Figura 4 pode ser visualizada as paredes logo após a desforma. De acordo com Sacht (2008), dependendo da complexidade do projeto e da equipe disponível, a montagem de fôrmas, armaduras, instalações e concretagem pode ocorrer em um tempo médio de 24 horas. A cobertura em habitações térreas pode ser feita com telhas de concreto, cerâmica ou ainda metálicas e a estrutura de madeira, metálica ou pré-fabricada.

Figura 4 – Habitação em parede de concreto após a desforma



Fonte: Autora.

### *2.1.2 Normalização quanto às paredes de concreto*

Como esse sistema vem sendo adotado de forma crescente, foi de suma importância a publicação de um documento para normalizar os procedimentos e requisitos para sua construção. Em 2012 entrou em vigor a norma para paredes moldadas in loco, a ABNT NBR 16055:2012 - Parede de concreto moldada no local para construção de edificações- Requisitos e Procedimentos. Esse documento possui a função de normalizar o dimensionamento e a execução, apesar desse sistema ser utilizado no Brasil há cerca de 30 anos (CORSINI, 2011).

Na ABNT NBR 16055:2012 a parede de concreto é definida como “elemento estrutural autoportante, moldado no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz

de suportar carga no mesmo plano da parede”. Nessa norma são estabelecidos requisitos básicos para as paredes de concreto moldadas *in loco* com fôrmas removíveis. É aplicada às paredes submetidas à carga axial, podendo ser com ou sem flexão, concretadas com todos os elementos que farão parte de sua construção final, como os detalhes de fachada, armaduras distribuídas e localizadas, instalações (elétricas e hidráulicas) se embutidas, e considera as lajes incorporadas ao sistema por solidarização com as paredes, tornando assim o sistema monolítico. Dentre as várias prescrições contidas na ABNT NBR 16055:2012 relacionadas aos materiais utilizados, critérios de projeto, análise estrutural, dimensionamento, procedimentos para a fabricação da parede, controle de qualidade, entre outros, serão citadas nas próximas seções as de maior importância para o desenvolvimento deste trabalho.

#### *2.1.2.1 Requisitos da qualidade da estrutura*

De acordo com a ABNT NBR 16055:2012 uma estrutura em parede de concreto deve ser projetada e construída de forma que:

- a) resista a todas as ações que produzam sobre ela efeitos significativos tanto na sua construção quanto durante a sua vida útil;
- b) conserve sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço em todo período correspondente à sua vida útil, sob as condições ambientais previstas na época de projeto e quando utilizada conforme recomendado no projeto;
- c) considere detalhes construtivos que possibilitem manter a estabilidade pelo tempo necessário à evacuação quando da ocorrência de ações excepcionais localizadas previsíveis, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

E o projeto deve ser elaborado adotando-se:

- a) sistema estrutural adequado à função desejada para a edificação;
- b) combinação de ações compatíveis e representativas;
- c) dimensionamento e verificação de todos os elementos estruturais presentes;
- d) especificação de materiais de acordo com os dimensionamentos efetuados;
- e) modulação coordenada conforme a ABNT NBR 15873:2014.

### 2.1.2.2 Concreto

Quanto ao concreto devem ser atendidas as especificações contidas nas normas de acordo com a classe de agressividade ambiental a que a estrutura estiver submetida, as normas prescritas são citadas a seguir:

- a) ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Essa norma deve ser consultada para a análise de tensões devido à retração na falta de ensaios específicos;
- b) ABNT NBR 8953:2015 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Essa norma deve ser consultada para estabelecer a consistência do concreto;
- c) ABNT NBR 12655:2015 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento e a ABNT NBR 7212:2012 – Execução de concreto dosado em central – Procedimento.
- d) ABNT NBR 5739: 2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Essa norma deve ser consultada para a caracterização do concreto, o ensaio de resistência a compressão;
- e) ABNT NBR 9778:2009 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Essa norma deve ser consultada para os ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios.

Outras recomendações são em relação a dimensão máxima do agregado que deve ser definida considerando a espessura das paredes e a densidade da armadura; e quanto ao uso de aditivos químicos, que devem seguir as normas ABNT NBR 11768:2011 e ABNT NBR 12655:2015, destacando-se que não devem ser adotados aditivos que possam atacar quimicamente as armaduras, como os aditivos à base de cloreto.

### 2.1.2.3 Lançamento e adensamento

Antes do início do lançamento do concreto deve ser verificado se sua trabalhabilidade está de acordo com a especificada no documento de entrega (ensaio de abatimento do tronco de cone e de espalhamento) além das dimensões e posição (nivelamento, alinhamento e prumo) das fôrmas, assegurando assim a geometria dos elementos estruturais. O lançamento e adensamento



devem ser realizados de modo que toda armadura e componentes embutidos previstos no projeto sejam adequadamente envolvidos na massa de concreto. Deve-se ter atenção também quanto aos fatores que podem contribuir para a segregação do concreto, principalmente quando a altura em queda livre ultrapassar 2 m.

Em relação ao adensamento, há uma série de recomendações quando o concreto utilizado não for o auto adensável, são elas:

- a) o adensamento pode ser manual ou mecânico e deve garantir que todos os espaços da fôrma sejam preenchidos, sem prejuízo da aderência nas armaduras;
- b) com a utilização de alta densidade de armaduras, devem ser tomados cuidados especiais para que o concreto seja distribuído em todo o volume da peça e o adensamento se processe de forma homogênea;
- c) o enchimento da fôrma deve ser realizado sem a ocorrência de falhas por ar aprisionado, devendo ter dispositivos que permitam a saída desse ar durante a concretagem, em especial nas regiões propícias à formação de vazios, como logo abaixo das janelas, o enchimento das fôrmas deve ser acompanhado com leves batidas com martelo de borracha nos painéis.

## **2.2 Retração do concreto**

Nunes (2006) descreve a retração como uma variação volumétrica de um material ao longo do tempo com a redução de seu volume, sendo que, no concreto de cimento Portland a retração é associada principalmente à perda de água para o ambiente externo.

De acordo com Sales (2006) em misturas cimentícias a retração pode ocorrer tanto por perda de água para o meio externo denominada secagem exógena, quanto por adsorção da água para formação dos produtos de hidratação do cimento, denominado secagem endógena.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) as deformações por retração podem ser prejudiciais para o concreto, uma vez que, quando restringidas, se manifestam na forma de tração. Considerando a baixa resistência a tração do material, as estruturas de concreto frequentemente fissuram como consequência da retração restringida devido às alterações da umidade e temperatura (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Ainda segundo os mesmos autores uma das mais sérias desvantagens das estruturas construídas com concreto é a tendência à fissuração.

### 2.2.1 Tipos de retração

Aitcin *et al.* (1997, apud Aitcin, 2000) identificaram cinco tipos de retração, são elas: a retração plástica que ocorre na superfície de um concreto fresco quando submetido à secagem; a retração hidráulica que tem como causa a perda de água no concreto endurecido devido à evaporação da água interna; a retração autógena ou retração por autosssecagem que pode ocorrer durante a hidratação do cimento; a retração térmica que pode ocorrer como resultado do decréscimo da temperatura do concreto; o último tipo é a retração por carbonatação, somando-se todas esses tipos de retração tem-se a retração total. A seguir são descritos os cinco tipos de retração.

#### 2.2.1.1 Retração plástica

Também denominada de retração por pré-endurecimento ou retração pré- pega, uma vez que ocorre quando o concreto ainda está no estado fresco (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Essa retração ocorre quando o concreto perde água para a superfície, devido à evaporação da mesma ou pela sucção das formas (por não ter sido realizada a impermeabilização) ou ainda por sucção do substrato, provocando a contração volumétrica da pasta de cimento, essa contração, uma vez restringida pelos agregados de grandes dimensões, pela armadura, ou por outro fator, provoca tensões de tração e por consequência a fissuração (NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Quando ocorre essa perda de água, tem-se a formação de uma série complexa de meniscos capilares, criando pressões capilares negativas provocando contrações volumétricas na pasta de cimento (NUNES, 2006). Ainda segundo o mesmo autor as tensões de tração também podem surgir devido às variações diferenciais de volume por toda a massa de concreto, pois os efeitos da retração não são uniformes para toda essa massa. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) as fissuras decorrentes da retração plástica são típicas, apresentando como características fissuras paralelas entre si, afastadas umas das outras de 0,3 m a 1,0 m, com 25 mm a 50 mm de profundidade.

A fissuração por retração plástica pode causar danos consideráveis às misturas cimentícias, pois além de alterações no comportamento mecânico devido ao enfraquecimento do material, podem causar também o aparecimento de vias de entrada para a umidade e substâncias agressivas que estão presentes no meio externo fazendo com que a vida útil do compósito seja menor (SALES, 2006).

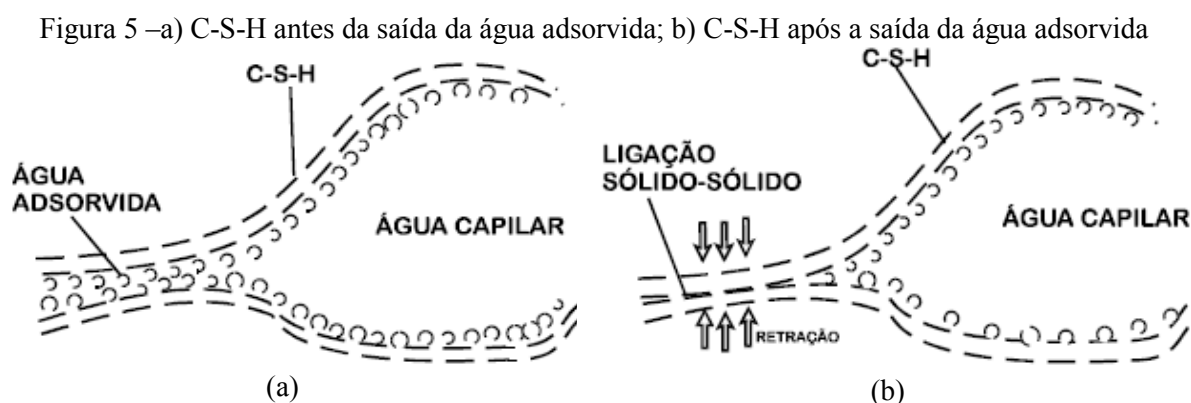
A ocorrência da retração plástica é maior em elementos de concreto que a relação área superficial/ espessura é muito grande, pois nesse caso a quantidade de água perdida por

evaporação é maior (NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Como a perda de água é uma das principais causas da retração plástica, fatores como vento, temperatura e umidade relativa do ar podem ser controlados para se evitar esse tipo de retração, logo dispensar cuidados à cura inicial do concreto é o procedimento mais adequado para o controle da retração plástica (NUNES, 2006).

### 2.2.1.2 Retração por secagem ou retração hidráulica

A retração por secagem ocorre quando o concreto fresco e úmido é exposto à umidade do ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esse tipo de retração é provocada principalmente perda de água adsorvida, em consequência das trocas de umidade com o meio ambiente (NUNES; FIGUEIREDO, 2007)

A água adsorvida é a água que se encontra próxima à superfície dos sólidos na pasta de cimento hidratada, sob influências das forças de atração (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Feldman e Sereda (1970 apud NUNES, 2006) descrevem que com a perda dessa água durante a secagem, algumas superfícies dos cristais de C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) aproximam-se uma das outras formando novas ligações (Figura 5), resultado na retração. Sendo esse tipo de retração considerado o principal responsável pela deterioração das estruturas de concreto (BISSONNETTE *et al.*, 1999 apud SENISSE, 2015).



Fonte: Feldman e Sereda (1970) apud Nunes (2006).

De acordo com Akers e Partl (1990) a intensidade de movimentação da água nos poros depende de inúmeros fatores como: a forma do elemento; o tipo de aplicação (cobertura ou vedação); temperatura e umidade relativa do ambiente ao entorno; velocidade do vento; condições de chuva, neve e gelo; porosidade do material; presença de fibras; tipo de revestimento ou impregnação aplicada e a idade do material. Com isso percebe-se que seria uma difícil tarefa a

predição ou descrição da movimentação da água nos poros de um composto a base de cimento com a adição de fibras (AKERS; PARTL, 1990).

#### *2.2.1.3 Retração autógena*

De acordo com o *Japan Concrete Institute* (1998, apud MEHTA; MONTEIRO, 2008) a retração autógena, também denominada retração de autodessecação, pode ser definida como a redução macroscópica do volume de materiais cimentícios quando o cimento sofre a hidratação após a pega inicial, nesse tipo de retração não há variação volumétrica devido à perda ou ingresso de substâncias, variação de temperatura e aplicação de uma resistência externa e restrição. Na retração autógena tem-se um consumo de água nos poros capilares, processo denominado autossecação, que ocorre no interior da pasta, com a hidratação da fração anidra ainda restante, ou seja, tem-se a redução da umidade interna do material (BASTOS, 2001). Com a migração da água para participar das reações de hidratação tem-se a formação de meniscos capilares cuja a tensão superficial leva a contração da pasta (NUNES, 2006).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) esse tipo de retração ocorre em todos os tipos de concreto, entretanto possui maior intensidade em concretos de alta resistência por geralmente apresentarem um alto consumo de cimento e uma baixa relação água/cimento.

#### *2.2.1.4 Retração térmica*

O comportamento dos sólidos em geral é sofrer expansão com o calor e retração com o resfriamento, em função do coeficiente de expansão térmica dos materiais tem-se a deformação associada à mudança de temperatura (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Usualmente as estruturas de concreto não são afetadas pela alteração da temperatura ambiente (a não ser em condições extremas de temperatura), entretanto em estruturas massivas de concreto (com aproximadamente um metro ou mais de espessura) a combinação do calor produzido pela hidratação do cimento e as baixas condições de dissipação de calor resulta em uma grande elevação de temperatura do concreto poucos dias após o lançamento (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Quando a temperatura do concreto se equilibra com a temperatura ambiente frequentemente ocorre a fissuração do mesmo (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esse tipo de retração não gera grandes interferências em paredes de concreto, uma vez que, por ser um elemento de pouca espessura (geralmente 10 cm) tem-se a dissipação do calor de hidratação rapidamente para o ambiente.

### 2.2.1.5 Retração por carbonatação

Na retração por carbonatação tem-se a reação do CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) com os compostos hidratados do cimento, causando diminuição de volume na pasta endurecida (AITCIN *et al.*, 1997 apud SALES, 2006). Esse tipo de retração é maior quando a umidade relativa do ar está próxima de 50 %, quando a umidade relativa está em torno de 100% a carbonatação é menor, pois os poros são preenchidos com água e a difusão do CO<sub>2</sub> no interior da pasta é lenta. Com a formação de compostos carbonatados ocorre uma diminuição dos espaços existentes entre as partículas sólidas da estrutura interna do compósito cimentício, resultando na retração por depressão capilar (BASTOS, 2001).

### 2.2.2 Métodos de medição da retração

Vários ensaios foram propostos para avaliar o potencial de retração em concretos, inclusive alguns normatizados, porém ainda não se tem um consenso geral quanto ao emprego de uma forma padrão. Os ensaios podem ser classificados, quanto ao grau de restrição, em livres ou restringidos, a seguir são citados exemplos normatizados de cada um desses ensaios.

Em muitas literaturas recentes (PEÑA, 2004; MOKAREM, WEYERS, LANE, 2005; NUNES, 2006; SENISSE, 2010; SENISSE 2015) utiliza-se o de retração livre descrito na ASTM C157/C157M: *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. De acordo com a ASTM C157– 08 (2014), esse ensaio, realizado sob condições de umidade e temperatura controladas, é utilizado para determinação da variação das dimensões produzidas por outras causas que não sejam forças aplicadas externamente e variação de temperatura na argamassa e concreto de cimento hidráulico endurecido. Simplificadamente esse ensaio consiste no preparo de prismas de concreto ou argamassa moldados e curados de acordo com a ASTM C157 – 08 (2014). Nesses prismas são realizadas leituras de sua variação unidimensional (comprimento da amostra), assim como exemplificado na Figura 6 em períodos de tempo determinados. A análise é feita a partir da diferença da leitura inicial, realizada após 24 horas da moldagem, com as leituras subsequentes. De acordo com Sales (2006), uma vez que o comprimento é maior que as dimensões da seção transversal, pode ser considerado que a retração ocorre preferencialmente de modo uniaxial.

Figura 6 – Medida da variação unidimensional do prisma de concreto

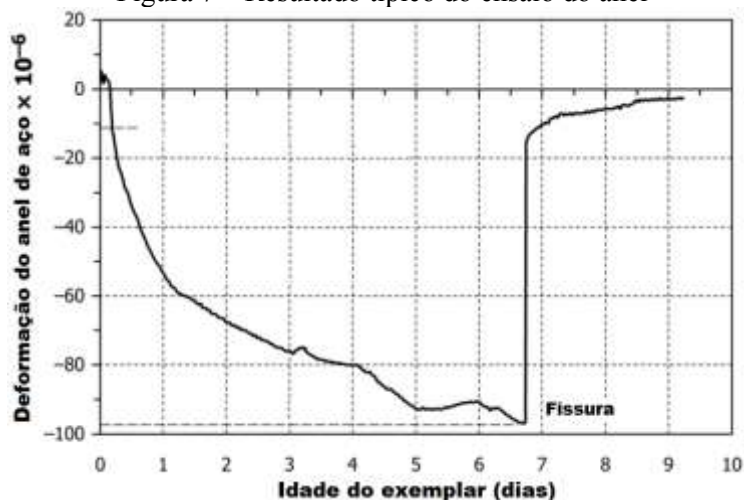


Fonte: Senisse (2015).

Bentur e Mindess (2007) descrevem que métodos para a avaliação da retração livre como o da ASTM C157 não são suficientes, uma vez que a retração livre não é uma indicação útil da eficácia da fibra em reduzir os problemas de retração, pois não é a tensão de retração livre que necessita de ser reduzida, mas sim a fissuração associada com a retração restringida. De acordo com Toledo Filho *et al.* (2005) a redução na retração livre não fornece necessariamente uma indicação da tendência a fissuração, para isso devem ser realizados ensaios de retração restringida considerando diferentes restrições e condições de secagem.

Em relação a avaliação do potencial de fissuração na retração, o ensaio do anel tem se tornado um teste amplamente utilizado devido à sua simplicidade e versatilidade (HOSSAIN; PEASE; WEISS, 2003). O ensaio do anel consiste da moldagem do concreto ao entorno de um anel de aço, simulando uma retração restringida, com a fixação de extensômetros no aço é possível ter dados sobre a deformação que o concreto impõe. Esse ensaio foi desenvolvido baseado no comportamento em conjunto do anel de aço e de concreto. Com a retração do concreto induz-se a formação de esforços de compressão no anel de aço e consequentemente tensões de tração se desenvolvem no concreto (BENTUR; MINDESS, 2007). Ainda de acordo com os mesmos autores, esse ensaio pode ser utilizado para a determinação da acumulação de tensão durante a retração restringida assim como o tempo até a fissuração. Na Figura 7 tem-se um exemplo de gráfico obtido nesse ensaio, em que é apresentada a deformação do anel em função do tempo. O tempo de fissuração é determinado quando ocorre uma súbita diminuição da deformação no anel de aço.

Figura 7 – Resultado típico do ensaio do anel



Fonte: Adaptado de ASTM C1581– 16.

Uma das normas que tratam do ensaio do anel é a ASTM C1581/C1581M – 16 *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Stress Characteristics of Mortar and concrete under Restrained Shrinkage*, utilizada nesse trabalho. De acordo com a ASTM C1581– 16 esse ensaio pode ser utilizado para determinação dos efeitos das variações de proporção dos materiais além das propriedades da argamassa e do concreto, em relação à fissuração devido à retração de secagem além de deformações causadas pela retração autógena e calor de hidratação.

Os elementos de concreto quase sempre sofrem algum tipo de restrição, seja por atrito na base ou engastamento nas extremidades, isso geralmente ocorre devido a presença do aço da armadura e por deformações diferenciais que se desenvolvem entre a parte interna e externa do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008). O ensaio do anel possibilita a reprodução do comportamento do concreto quando submetidos às restrições. No sistema construtivo de paredes de concreto, além das restrições normalmente impostas ao concreto (armadura, presença de agregado graúdo etc), também se tem as instalações (hidráulica e elétrica). Devido à esses fatores, escolheu-se seguir as recomendações da ASTM C1581-16 para avaliação da retração dos concretos estudados neste trabalho.

### 2.2.3 Atuação da fibra na retração do compósito

Fibras curtas distribuídas aleatoriamente são frequentemente adicionadas ao concreto para aumentar o desempenho à fissuração por retração restringida em lajes (RAOUI; WEISS, 2011). Quando há a fissuração do concreto, as fibras tendem a formar pontes transferindo a carga através das fissuras (RAOUI; WEISS, 2011). A adição de fibras em pequenas frações, principalmente as de baixo módulo de elasticidade, nos compósitos cimentícios muitas vezes

tem a finalidade de reduzir a fissuração devido à retração plástica (BENTUR; MINDESS, 2007). Alguns autores chegam a afirmar que a utilização de fibras em pequenos volumes (geralmente inferiores à 0,5 %) no concreto têm mostrado uma redução significativa, senão completa, da fissuração por retração plástica (BAYASI, MCINTYRE, 2002; FOLLIARD; SIMPSON, 1988; SOROUSHIAN; MIRZA; ALHOZAIMY, 1995; BERKE; DALLAIRE, 1994 apud BOGHOSIAN; WEGNER, 2008).

Vários estudos foram realizados incorporando fibras de baixo módulo em matrizes cimentícias (RESENDE, 2003; TOLEDO FILHO, 1997; AL-TAYYIB *et al.*, 1988; BOGHOSIAN; WEGNER, 2008; TOLEDO FILHO; SANJUÁN, 1999) e um dos fatores analisados foi a redução da fissuração devido à retração.

A utilização da fibra de sisal ajuda a controlar a retração plástica e prevenir o aparecimento de fissuras individuais que possuem grandes dimensões durante a fase de envelhecimento (RESENDE, 2003). Toledo Filho (1997, apud RESENDE, 2003) demonstrou em seus estudos que argamassas reforçadas com fibras de sisal tiveram sua resistência ao impacto aumentada significativamente e que as fibras são bastantes efetivas na transferência de tensões através das fissuras e na prevenção da fragmentação da matriz. Resultados como esses demonstram a eficiência da adição da fibra de sisal e a possível substituição da fibra de polipropileno por fibras vegetais em concretos.

No trabalho de Al-Tayyib *et al.* (1988) foi estudado o efeito da fibra de polipropileno como reforço em concreto, o teor adotado foi de 0,2 % em volume de concreto. Uma das propriedades analisadas foi a fissuração devido à retração plástica em placas de 750 x 375 x 75 mm, foi observado que a presença dessa fibra eliminou esse tipo de fissuração.

Boghossian e Wegner (2008) estudaram a fissuração por retração plástica em argamassa contendo fibra de linho com teores de 0,05 % a 0,3 %. Foi observado que com o teor máximo de fibras ocorreu uma redução drástica tanto na quantidade quanto na largura das fissuras. Ainda de acordo com os mesmos autores a diferença no comprimento de 10 mm e 38 mm da fibra não causou influência significativa no comportamento de fissuração (BOGHOSIAN; WEGNER, 2008). Ao comparar a capacidade de reduzir a área total das fissuras formadas por retração plástica restringida, os autores concluíram que a fibra de linho apresentou uma performance geralmente melhor quando comparadas as fibras sintéticas (vidro e polipropileno comerciais).



Toledo Filho e Sanjuán (1999) estudaram argamassas reforçadas com adições de pequenos volumes de fibras de sisal distribuídas aleatoriamente e concluíram que ocorreu uma redução da retração plástica livre, retardando o aparecimento da primeira fissura e reduzindo a tendência de fissuração inerente das primeiras idades da matriz, devido o módulo de elasticidade das fibras ser maior que o do concreto nas idades iniciais.

Ressalta-se que neste trabalho, a degradação das fibras vegetais nas matrizes cimentícias descrita anteriormente, não constitui uma preocupação no combate à retração, visto que a atuação principal das fibras seria nas primeiras idades, quando ainda não sofreram deterioração por ação da matriz.

### **2.3 Materiais Compósitos**

Um compósito pode ser considerado, de maneira geral, um material composto de duas ou mais fases (multifásico), sendo a maioria composta por apenas duas fases, uma é denominada matriz, que é contínua e envolve a outra fase denominada dispersa (CALLISTER Jr.; RETHWISCH, 2013). Ainda de acordo com os mesmos autores na tentativa de se obter a melhor combinação de propriedades, o compósito é formado de uma proporção significativa das fases constituintes, sendo que, as características do material resultante são dadas em função das quantidades relativas, das propriedades das fases constituintes e da geometria da fase dispersa (forma, tamanho, distribuição e orientação das partículas ou fibras).

#### *2.3.1 Classificação dos compósitos*

Callister Jr. e Rethwisch (2013) classificam os compósitos a partir de três divisões principais:

##### **Compósitos reforçados com partículas:**

As partículas são materiais que possuem aproximadamente as mesmas dimensões em todas as direções. Como exemplo pode-se citar o concreto composto por cimento (matriz), areia e brita (particulados).

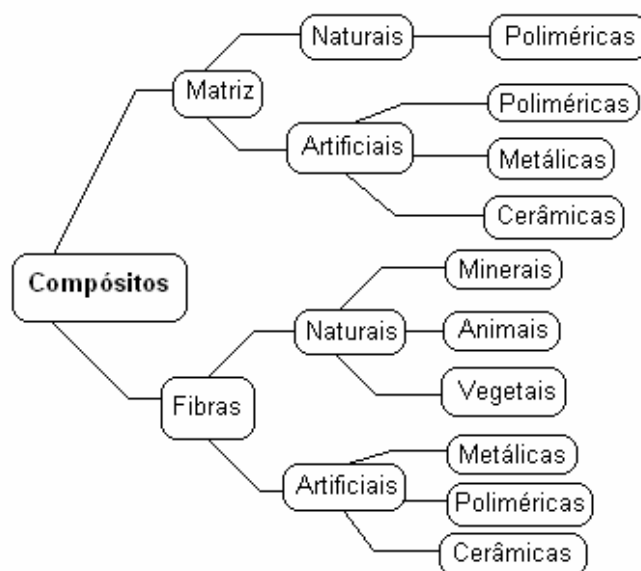
##### **Compósitos estruturais:**

São formados normalmente tanto por materiais compósitos quanto por materiais homogêneos como os laminados e os painéis sanduíches.

### Compósitos reforçados com fibras:

As fibras são materiais que possuem grande razão entre o comprimento e o diâmetro, tecnologicamente são considerados os compósitos mais importantes. Na Figura 8 é apresentado um esquema da constituição dos compósitos fibrosos.

Figura 8 – Esquema da constituição de compósitos fibrosos



Fonte: Picanço (2005).

A matriz ou fase aglutinante permite que a fase dispersa, também denominada fase de reforço, transfira os esforços mecânicos entre si e trabalhem de forma integrada (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Ainda de acordo com os mesmos autores, por esse motivo é possível a criação de compósitos com características especiais que nenhum dos materiais integrantes possui isoladamente, justificando a existência de compósitos com altos índices de resistência e rigidez por unidade de peso.

A distribuição de tensões é um fator de extrema importância para os elevados valores de resistência e rigidez. De acordo com Tanesi e Figueiredo (1999), atingindo a tensão de ruptura na matriz ocorre então o aparecimento de fissuras. Inicialmente a carga que era suportada pela matriz é transferida para a fibra que intercepta a fissura, formando assim um tipo de ponte de transferência de tensões, controlando a abertura da mesma. Ainda segundo os mesmos autores esse efeito de transferência de tensão tem como consequência um maior número de fissuras, porém com aberturas menores, além de promover o aumento da deformação para o aparecimento da primeira fissura.

As propriedades da fibra e da matriz determinam as propriedades do compósito, outros fatores que podem influenciar nessas propriedades são:

- a) tipo, geometria, arranjo e distribuição, fração volumétrica, aspecto superficial, tratamento prévio, propriedades físicas, mecânicas e químicas das fibras;
- b) grau de aderência entre fibra e matriz;
- c) métodos de produção (mistura, adensamento e cura) do compósito.

### *2.3.2 Utilização de fibras na matriz cimentícia*

A busca de materiais para serem utilizados como reforço da matriz cimentícia é devido a fragilidade desta, que mesmo apresentando características ideais para a construção civil, como boa trabalhabilidade e resistência, apresenta baixa resistência a tração e pouca deformabilidade.

Uma das fibras mais conhecidas utilizadas como reforço em matrizes cimentícias é a fibra de amianto. A fibra amianto (ou asbesto) é utilizada há cerca de um século e possui propriedades ideais para a utilização em compósitos pois não é atacada por soluções alcalinas, possui elevada resistência à tração e módulo de elasticidade cerca de cinco vezes maior que da pasta de cimento (STEELE, 1971). Ainda podem ser citadas outras propriedades do amianto que justificam sua ampla utilização, tais como: sua afinidade com a matriz cimentícia, permitindo uma dispersão efetiva de volumes relativamente grandes de fibras (cerca de 10% ou mais), além da excelente aderência da fibra à matriz no compósito endurecido (BENTUR; MINDESS, 2007).

Mesmo com o ótimo desempenho da fibra de amianto, o uso desse material está sendo cada vez mais restrito devido aos riscos à saúde causados por sua inalação, como fibrose pulmonar e até câncer. Por ser nocivo à saúde, o amianto já foi proibido em 66 países e em alguns estados brasileiros (NOVAES, 2013). Com essa proibição a busca por um material com propriedades mecânicas semelhantes ao do amianto para emprego em materiais compósitos, tem sido motivo de pesquisas em todo o mundo.

Desde o início da utilização das fibras de amianto, uma ampla variedade de outras fibras foram utilizadas com o cimento hidráulico, essas fibras podem ser classificadas de acordo com sua origem em dois grupos: as artificiais como aço, vidro, carbono, Kevlar®, polipropileno e nylon; e as naturais como a celulose, sisal e juta, sendo que esses tipos de fibra variam consideravelmente tanto em propriedade, como em eficácia e custo (BENTUR; MINDESS, 2007). Algumas fibras e suas respectivas propriedades estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores típicos de propriedades físicas e mecânicas das fibras

Fibra	Diâmetro (µm)	Peso específico	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Elongação de ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Aramida(Kevlar®)	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Sisal	-	1,27-1,5	3,8-62,0	0,126-0,8	2,8-10
Rami	-	1,51	7,3-25,0	0,39-0,90	1,8-5,3
Matriz de argamassa (comparação)	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007); Levy Neto e Pardini (2006).

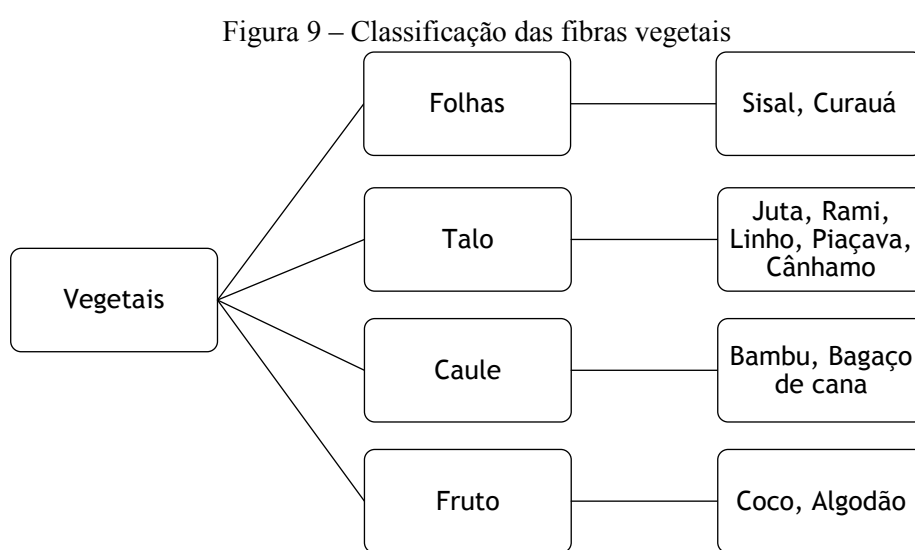
### 2.3.3 Fibras naturais

O uso das fibras naturais em materiais compósitos tem em sua maioria, a função principal de fazer com que o mesmo atue como uma carga de material reciclável e de baixo custo à matriz, ao invés de realmente reforçá-la mecanicamente de forma significativa. Isso ocorre devido às propriedades mecânicas das fibras vegetais serem normalmente inferiores em relação às fibras sintéticas como o vidro e o carbono (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Porém, quando comparadas algumas fibras vegetais com as fibras de polipropileno, por exemplo, as propriedades das fibras vegetais podem superar as das fibras de polipropileno (MOTTA; AGOPYAN, 2007).

Apesar do desempenho de compostos sintéticos muitas vezes superar os compostos naturais, se tem a necessidade de proteção ao meio ambiente frente as agressões causadas pelos processos industriais, minimizar a dependência de recursos não renováveis como o petróleo, promovendo o desenvolvimento sustentável (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Ainda de acordo com os mesmos autores em aplicações como aeronáuticas, aeroespaciais e biomédicas o desempenho estrutural do compósito é de extrema importância, sendo que os fatores econômicos possuem menor relevância, ao passo que, para a construção civil, o baixo custo do material se torna um fator de extrema importância.

As fibras naturais são utilizadas como reforço de materiais há milhares de anos, mas somente durante a segunda guerra mundial foi dada a devida atenção às fibras vegetais especificamente. Devido a diminuição da reserva de fibras de asbesto, a fibra celulósica começou a ser empregada em substituição parcial ou total, atuando como reforço em materiais cimentícios, e, posteriormente teve sua utilização mais difundida, quando descoberto os malefícios causados pela fibra de asbesto à saúde (SILVA, 2009).

Na Figura 9 é detalhada a classificação das fibras vegetais, que podem ser subdivididas em quatro grupos, assim como os principais exemplos de cada classe.



Fonte: Adaptado de Picanço (2005).

Savastano Jr. (1986) detalha cada uma das classes das fibras vegetais existentes:

- a) fibras obtidas das folhas: possuem a função na planta de conferir resistência e estabilidade à folha e ainda fornecem o suporte aos vasos de condução de água no interior. A utilização dessas fibras para reforço em argamassas ou concretos tem demonstrado viabilidade, porém é necessária atenção quanto a durabilidade dessa fibra em meio alcalino e quando submetida a ciclos contínuos de umedecimento e secagem. A fibra foliar mais utilizada é a fibra de sisal, sendo o Brasil um dos principais países produtores.
- b) fibras provenientes do talo ou tronco vegetal: São obtidas de plantas dicotiledôneas e ocorrem no floema na forma de agulhas. Possuem grande aplicação na indústria têxtil, com destaque para juta e o rami.

- c) fibras provenientes do caule: São relativamente pequenas e rígidas, em destaque as fibras de bambu e de cana de açúcar, sendo que a fibra de bambu deve ser utilizada no estado não desfibrilado (fibras ligadas entre si pela lignina vegetal) e a fibra de cana de açúcar deve passar por tratamento para retirada do açúcar residual que pode afetar na hidratação do cimento.
- d) fibras do fruto: Formam uma espécie de camada protetora nas plantas. Nesse grupo merecem destaque as fibras de algodão e de coco; a fibra de algodão é uma fibra relativamente fraca enquanto que a do coco apresenta sua durabilidade em meios alcalinos como sua principal vantagem.

Embora com propriedades diferentes entre as classes existentes, podem ser enumeradas as principais vantagens de utilização das fibras vegetais (LEVY NETO; PARDINI, 2006):

- a) baixa massa específica;
- b) maciez e abrasividade reduzida;
- c) são recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis;
- d) baixo custo;
- e) estimulam empregos na zona rural;
- f) baixo consumo de energia na produção.

Entre as desvantagens, são citadas pelos autores:

- a) alta sensibilidade aos efeitos ambientais como variação de umidade e temperatura;
- b) apresentam seções transversais de geometria complexa e não uniforme;
- c) propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais estruturais tradicionais, com algumas exceções;
- d) sofrem significativas influências referentes ao solo, à época de colheita, ao processamento após a colheita e à posição relativa na planta, entre outras;
- e) acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional.

A acentuada variação nas propriedades mecânicas das fibras vegetais é devido ao fato de ser um material natural, Savastano Jr. (2000) descreve que essas fibras possuem coeficientes de variação geralmente superior a 40%. Algumas propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais mais utilizadas e suas variações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2– Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais

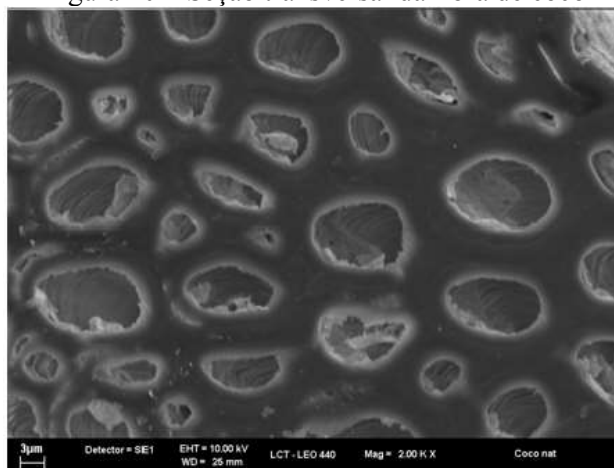
Tipo de fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Sisal	126 - 800	3,8 - 62,0	2,8 - 10	1,27 - 1,5
Coco	95 - 149	2,8 - 13,7	3,3 - 5,1	1,18 - 1,45
Juta	320 - 500	12,0 - 100	1,3 - 2,8	1,5
Malva	160	17,4	5,2	1,41
Rami	393 - 900	7,3 - 25,0	1,8 - 5,3	1,51
Piaçava	143	5,6	5,9	1,05

Fonte: Levy Neto e Pardini (2006).

### 2.3.3.1 *Análise microestrutural*

As fibras vegetais são constituídas de células individuais também denominadas microfibras que são ligadas umas às outras por meio de uma lamela média (lamela intercelular) constituída de hemicelulose, lignina e pectina (GRAM, 1988). A região central da fibra pode apresentar uma cavidade denominada lacuna (SAVASTANO Jr., 2000). A Figura 10 ilustra o aglomerado de células que forma a seção transversal da fibra vegetal, no caso exemplificado, a fibra de coco.

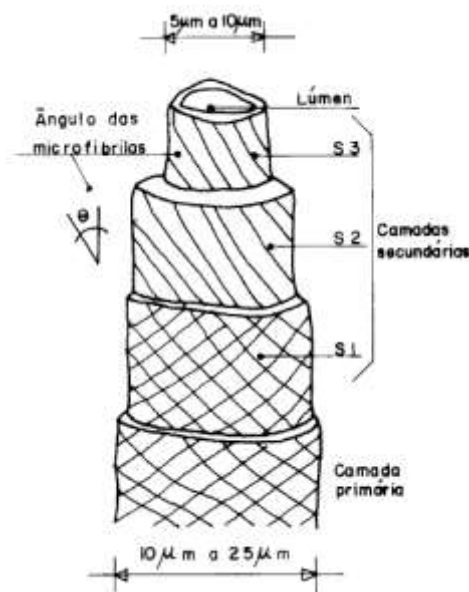
Figura 10 – Seção transversal da fibra de coco



Fonte: Motta (2006).

As células individuais possuem de 10  $\mu\text{m}$  a 25  $\mu\text{m}$  de diâmetro e são compostas por microfibrilas dispostas em camadas com diferentes espessuras e ângulos de orientação (SAVASTANO Jr., 1992). Na Figura 11 é apresentado um esquema da microfibrila, em que podem ser visualizados o lúmen, as camadas primária e secundária (dividida em três subcamadas: S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>).

Figura 11 – Esquema da célula individual fibra vegetal com dimensões aproximadas



Fonte: Savastano Jr. (1992).

Nas quatro camadas estão presentes as microfibrilas, sob a forma de espiral com ângulos de inclinação diferentes, influenciando no comportamento mecânico da fibra (PICANÇO, 2005). A camada primária, que é a mais externa, assim como a camada secundária S<sub>1</sub> apresentam uma estrutura reticulada; a camada secundária S<sub>2</sub> possui microfibrilas orientadas segundo um ângulo  $\theta$  com o eixo longitudinal da célula em espiral, essa camada também é a de maior espessura e com maior teor de celulose; na camada mais interna S<sub>3</sub> também são encontradas as microfibrilas em espiral (GRAM, 1983).

Na região central da célula individual existe o espaço denominado lúmen, que juntamente com a lacuna, são responsáveis pela grande absorção de água e baixa massa específica aparente, que são características comuns às fibras vegetais (SAVASTANO Jr., 1992). As substâncias agressivas, como os compostos hidratados de cimento, costumam penetrar nos poros permeáveis (incluindo o lúmen e a lacuna) podendo provocar a degradação e o enrijecimento das fibras (PICANÇO, 2005).



### 2.3.3.2 *O sisal*

A planta do sisal é resistente ao clima seco, geralmente cultivada em regiões tropicais e subtropicais (PICANÇO, 2005). Ainda de acordo com o mesmo autor é uma cultura comum no nordeste brasileiro, tem como características folhas grandes e pontiagudas em roseta (Figura 12), possuindo vida útil de cerca de 25 anos. Aproximadamente aos 3 anos de vida da planta ou quando suas folhas atingem cerca de 140 cm, inicia-se o processo de transformação da folha de sisal em fibras naturais, com comprimento de 90 cm a 120 cm, sendo que as fibras representam apenas de 4% a 5% da massa bruta da folha de sisal (IZQUIERDO, 2011).

Figura 12 – Planta de sisal



Fonte: The sisal rug store [s.d.].

De acordo com Picanço (2005) a retirada das fibras é realizada com a descarnação, esmagamento e raspagem do cerne da folha juntamente com um jato de água e posterior secagem ao ar, sendo que esses processos podem ser mecânicos ou manuais; as fibras produzidas podem ser utilizadas para a fabricação de cordas, sacos, alguns tecidos, barbantes, redes, reforços em compósitos, canos, passareiras, tapetes e reforço para cabo de arame.

### 2.3.3.3 *O rami*

O rami (Figura 13) pertence à família Urticaceae, geralmente são plantas herbáceas de caule cilíndrico que crescem de um a três metros de altura e de 0,7 a 1,2 cm de diâmetro, as folhas são cobertas por pelos longos em toda sua face inferior (MEDINA, 1959 apud FREIRE *et al.*, 1996)

Figura 13 – Plantação de rami



Fonte: Oliveira *et al.* (2009).

As fibras de rami são extraídas do caule da planta, o processo de obtenção dessas fibras é descrito por Benatti Jr. (1988) iniciando-se com a colheita do caule, que até 24 horas após o corte deve ser levado à desfibriladora, responsável pela quebra da parte lenhosa, em seguida com a raspagem é obtida a fibra bruta. Após esse processo as fibras ainda úmidas são levadas ao sol para secarem e então serem recolhidas e armazenadas. As características das fibras de rami são excelentes para a confecção de artigos de tecidos, cordas e barbantes (SOUSA, 2013).

#### *2.3.4 Desempenho e durabilidade dos compósitos reforçados com fibras vegetais*

Em se tratando de materiais novos para o emprego na construção civil é de suma importância a avaliação da durabilidade, tendo-se em mente que uma habitação é o bem de maior valor adquirido por uma pessoa ao longo de sua vida (SAVASTANO Jr., 2000).

Savastano Jr. (2000) descreve que dois fatores são de extrema importância para a análise da durabilidade dos compósitos com fibras vegetais, são eles: a incompatibilidade física existente entre a fibra e a matriz e a degradação das fibras vegetais, principalmente devido ao ataque alcalino às fibras, resultado da elevada alcalinidade da água nos poros da matriz de cimento Portland, que possui pH superior a 13.

#### 2.3.4.1 Zona de transição e incompatibilidade física entre fibra e matriz

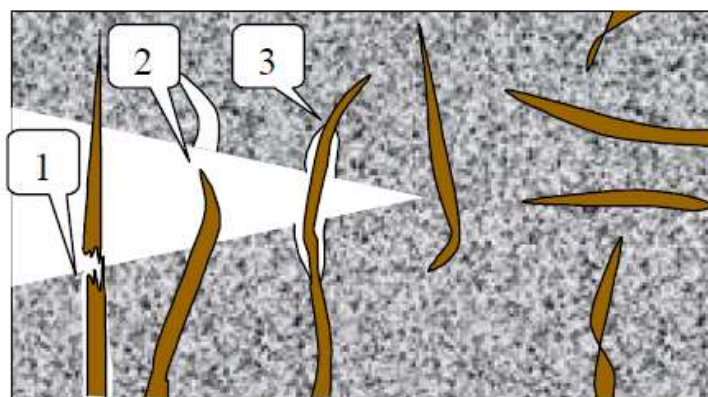
Um fator de extrema importância no desempenho do compósito é a zona de transição entre a fibra e a matriz. A interação entre esses dois elementos influencia significativamente no desempenho e na durabilidade do compósito (CALDAS e SILVA; JOHN, 2003).

A zona de transição ou auréola de transição é definida como a região da pasta de aglomerante que se situa próximo à fibra, possui espessura de 10  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  e características diferentes do resto da matriz (SAVASTANO Jr. *et al.*, 1994). Essa região deve proporcionar adequada transferência de esforços entre o reforço e a matriz.

A aderência da fibra na matriz é o principal fator de influência na tenacidade (energia total absorvida) do compósito. Em matrizes frágeis reforçadas com fibras de baixo módulo de elasticidade, como algumas fibras vegetais, o arrancamento da fibra predomina sobre a ruptura, ou seja, fibras com baixo módulo de elasticidade tendem a ser arrancadas da matriz ao invés de se romper, fazendo com que ocorra a ruptura do compósito (SAVASTANO Jr., 2000). Esse fato ocorre devido às altas deformações suportadas por esse tipo de fibra que são incompatíveis com as deformações da matriz, juntamente com a resistência de aderência entre a fibra e a matriz que é inferior a resistência à tração da fibra (CALDAS e SILVA; JOHN, 2003).

Na Figura 14 tem-se uma representação de uma fissura atravessando o compósito, 1 representa a fibra rompida; 2 uma fibra arrancada (predominante em fibras com baixo módulo de elasticidade); e 3 uma fibra íntegra atravessando a fissura (predominante em fibras com alto módulo de elasticidade), sendo que essa fibra colabora na absorção de energia quando o material está sendo submetido a alguma tensão.

Figura 14 – Representação de fissura em materiais compósitos

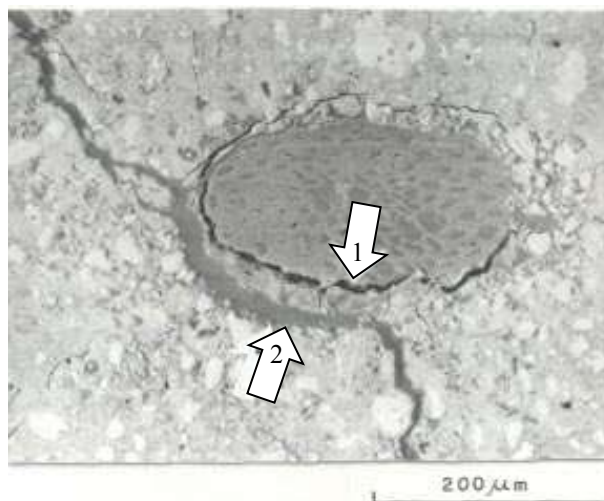


Fonte: Coutts (1986) apud Caldas e Silva; John (2003).

Segundo Savastano Jr. (2000) em compósitos cimentícios, o aumento da aderência entre a fibra e a matriz se dá por meio do melhor desempenho da zona de transição, fazendo com que fibras e matriz trabalhem solidariamente. Cabe destacar que a melhor adesão é obtida com a redução da porosidade e da menor concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) nas proximidades das fibras (SAVASTANO Jr., 2000).

Juntamente com a porosidade, a aderência da fibra na matriz também pode ser prejudicada pelo descolamento da mesma. Esse descolamento é devido à variação dimensional que a fibra sofre ao perder a água absorvida durante a mistura do compósito (AGOPYAN; SAVASTANO Jr., 2010). Segundo os mesmos autores, repetidos ciclos de molhagem e secagem também introduzem tensões, destruindo progressivamente a ligação existente entre a fibra e a matriz, reduzindo a ductilidade do material e, conseqüentemente, a sua vida útil. Na Figura 15 pode ser observado o descolamento da fibra (seta 1), também é destacada evolução de uma fissura que atravessa uma zona de transição (seta 2) demonstrando sua baixa resistência (provavelmente devido à sua alta porosidade), no compósito de fibra de coco aos sete dias de idade (SAVASTANO Jr., 1992).

Figura 15 – Imagem de elétrons retroespalhados aos sete dias de idade no compósito com fibras de coco. Seta 1- descolamento da fibra. Seta 2 - fissura



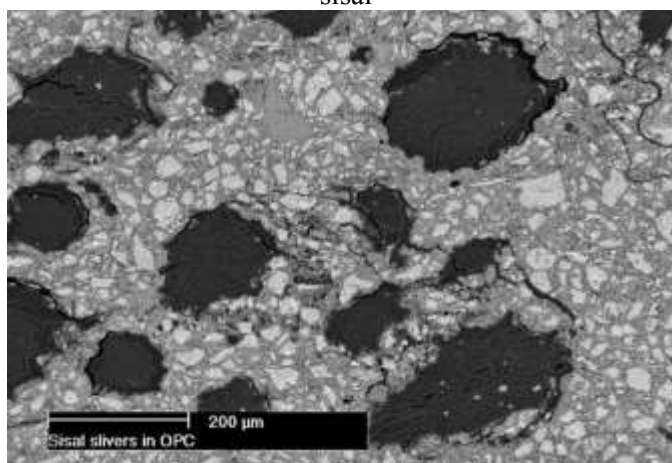
Fonte: Savastano Jr. (1992).

Savastano Jr. e Agopyan (1999) realizaram um estudo sobre a zona de transição das fibras (malva, sisal, coco, polipropileno e asbesto) dispersas em uma pasta de cimento Portland comum, sendo que nenhuma das fibras receberam tratamento químico. Os comprimentos dessas fibras variaram entre 15 a 30 mm e foram dispersas randomicamente na pasta de cimento Portland. No compósito de fibra de sisal aos 180 dias foi encontrada uma zona de transição porosa e rica em hidróxido de cálcio, com espessura de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ . Isso ocorre

devido à alta taxa de absorção de água das fibras vegetais, produzindo um grande fluxo de água na direção da fibra. Esse fluxo induz a um aumento na relação água/cimento do local e causando a alta porosidade na zona de transição, levando também à formação de grandes cristais de portlandita, que não se formam na superfície da fibra, mas no interior da zona de transição (SAVASTANO Jr.; AGOPYAN, 1999).

Savastano Jr., Warden e Coutts (2005) também realizaram um estudo sobre a microestrutura dos compósitos fibrosos, porém em compósitos submetidos a vácuo e pressão elevada após a moldagem, nos compósitos de fibras vegetais de cimento portland comum, foram obtidas zonas de transição mais densas (Figura 16) e não foi comprovada a presença da portlandita na análise realizada por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) ao contrário dos compósitos moldados sem a utilização de vácuo ou pressão.

Figura 16 – Imagem de elétrons retroespalhados aos 149 dias de idade no compósito com fibras de sisal



Fonte: Savastano Jr., Warden e Coutts (2005).

#### 2.3.4.2 Degradação das fibras

A utilização das fibras vegetais como reforço em concreto, mesmo com algumas vantagens, por ser um material barato que necessita de um processamento de baixo grau de industrialização, constitui um desafio para a indústria da construção, pois quando adicionadas no concreto sofrem um processo de envelhecimento gerando uma redução da resistência pós primeira fissura, com redução da tenacidade do material (SILVA, 2009). O envelhecimento está relacionado ao processo de migração de produtos de hidratação (principalmente  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para seu interior, processo denominado mineralização da fibra (SILVA, 2009).

Agopyan (1991) explica que a principal causa da degradação das fibras vegetais em meio alcalino deve-se à decomposição química da lignina e da hemicelulose, rompendo assim a ligação entre as células fibrosas, ou seja, a fibra decompõe-se em partes menores fazendo com que ela perca sua capacidade de reforço.

De acordo com Gram (1988) a velocidade da decomposição das fibras é dependente de fatores como a temperatura ambiente, a intensidade de movimento da água alcalina do poro até às fibras e dos produtos de sua decomposição.

Gram (1988) estudou a degradação da fibra de sisal imersa em água com cal, com a temperatura ambiente elevada a 50 °C e verificou que a fibra de sisal após 12 dias perdeu toda sua resistência mecânica. Ainda de acordo com o mesmo autor em compósitos cimentícios reforçados com fibra de sisal que foram rompidos com idade de 10 meses as fibras superficiais possuem características semelhantes às fibras novas, devido à carbonatação superficial da matriz, enquanto que as do centro do corpo de prova ficaram amareladas, frágeis e eram facilmente desfeitas. Para aumentar a durabilidade dos compósitos são apresentadas como sugestões:

- a) emprego de chumaços ao invés de filamentos;
- b) impregnação das fibras com agentes bloqueadores das reações de decomposição (silicatos e sulfatos de sódio ou magnésio, ou compostos metálicos);
- c) impregnação das fibras com agentes repelentes à água (resinas, óleos e asfaltos);
- d) aplicação simultânea dos agentes bloqueadores e dos repelentes;
- e) impermeabilização da matriz por agentes internos ou externos;
- f) redução da alcalinidade da matriz para valores de pH inferiores a nove por meio da carbonatação acelerada, adição de escória ou pozolanas, substituição do cimento comum pelo aluminoso ou adição de miscrossílica (também reduz a permeabilidade da matriz) ;
- g) impregnar a fibra com bloqueadores e hidrorrepelentes e atuar na matriz.

Algumas dessas soluções são onerosas, aumentando o custo do material e tornando a utilização da fibra vegetal inviável economicamente.

# CAPÍTULO 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

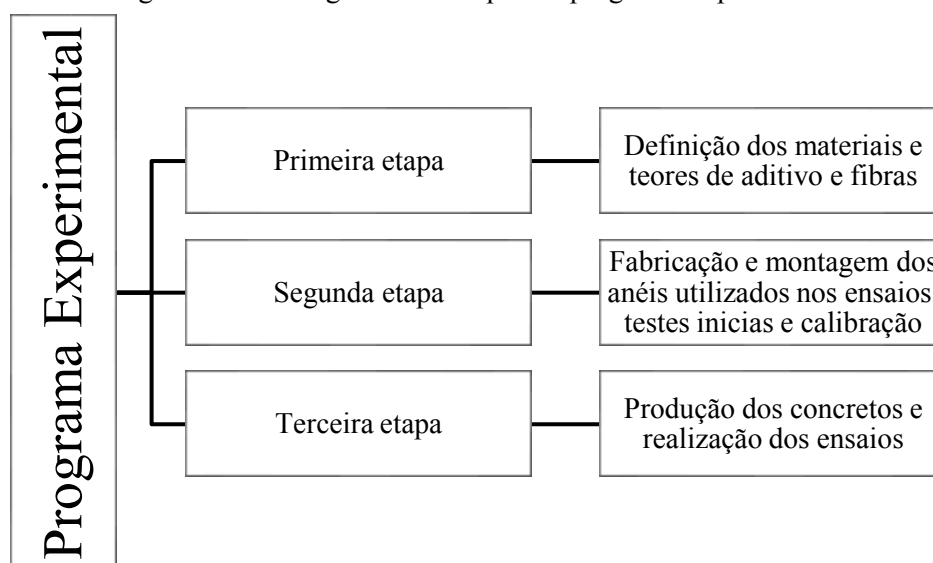
Para realizar a comparação das propriedades e comportamento em relação à fissuração dos concretos sem adição de fibras, com adição de fibras vegetais (sisal e rami) e de polipropileno, foram produzidos concretos de um mesmo traço com diferentes teores de fibras. Os teores de fibras adotados foram de 0,25% e 0,5% em volume. A fibra de polipropileno foi utilizada somente no teor de 0,25%, pois na tentativa de preparação do concreto com adição de 0,5% de fibras de polipropileno, mesmo com a dosagem máxima de aditivo, obteve-se um concreto extremamente seco sem utilização prática, por isso descartado da pesquisa.

Os compósitos foram avaliados no estado fresco quanto à trabalhabilidade e massa específica. Para as avaliações no estado endurecido foram moldados corpos de prova para análise da retração além da determinação da resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, massa específica, índice de vazios, absorção de água por imersão e por capilaridade para os diferentes compósitos produzidos. Foram feitas também comparações, entre os valores das propriedades obtidas no concreto de referência e nos concretos com fibras, verificando também a viabilidade da substituição da fibra de polipropileno pelas fibras vegetais.

Destaca-se que para essa pesquisa, analisa-se principalmente a contribuição das fibras na redução da fissuração do concreto devido a retração nas primeiras idades, fase em que ainda não sofreram danos devido à alcalinidade da matriz.

Na Figura 17 pode ser visualizado de forma resumida o procedimento experimental utilizado nessa pesquisa.

Figura 17 – Fluxograma das etapas do programa experimental



Fonte: Autora.

### 3.1 Materiais utilizados

Para a fabricação dos compósitos além do cimento, água, aditivo e dos agregados miúdos e graúdos foram utilizadas as fibras de sisal, rami e polipropileno. Esta pesquisa dará continuidade aos estudos desenvolvidos com fibras vegetais no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Uberlândia, dessa forma a caracterização das fibras de sisal e rami empregadas já foi realizada por outros autores (SOARES, 2012; SOUSA, 2013; PONCIANO *et al.*, 2015).

#### 3.1.1 Fibra de sisal

A fibra de sisal (Figura 18) foi escolhida por possuir propriedades mecânicas satisfatórias, ser abundante no Brasil e uma das fibras mais estudadas em compósitos cimentícios. As propriedades mecânicas da fibra de sisal utilizada podem ser visualizadas na Tabela 3.



Figura 18 – Fibra de sisal



Fonte: Autora.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da fibra de sisal

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro (μm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (mm/mm)	Resistência à tração (MPa)
1,511	230	12,17	0,04	353,95

Fonte: Sousa (2013); Ponciano *et al.* (2015).

### 3.1.2 Fibra de rami

A fibra de rami (Figura 19), embora pouco estudada em compósitos cimentícios, é uma fibra mais fina, com diâmetro semelhante ao das fibras atualmente aplicadas pelo mercado em concretos destinados a paredes de edificações.

Figura 19 – Fibra de rami



Fonte: Autora.

De acordo com Soares (2012) a fibra de rami é uma das mais longas e finas, apresenta comprimento médio de 150 mm, algumas características da fibra utilizada são citadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades das fibras de rami

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro (μm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (mm/mm)	Resistência à tração (MPa)
1,49	40	14,25	0,03	241,87

Fonte: Adaptado de Soares (2012).

### 3.1.3 Fibra de polipropileno

A fibra de polipropileno é a fibra com maior aplicação no mercado de concreto destinado às paredes de concreto. De acordo com o fabricante, a fibra de polipropileno possui seção circular e é produzida a partir de multifilamentos. São indicadas para o reforço de concreto e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo além de controlar a fissuração por retração. Na Tabela 5 estão contidas algumas propriedades físicas e mecânicas, segundo o fabricante, das fibras de polipropileno utilizada nessa pesquisa.

Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras de polipropileno

Diâmetro (μm)	Comprimento (mm)	Alongamento (%)	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /kg)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (MPa)
18	12	80	0,91	244	300	3000

Fonte: Macaferri (2008).

Ainda de acordo com instruções do fabricante, a fibra é indicada para uso em concreto projetado, pré-fabricados, pavimentos, pisos e revestimentos. A quantidade mínima de fibra recomendada é de 600 g/m<sup>3</sup>.

### 3.1.4 Cimento

Na produção do concreto foi utilizado o cimento de alta resistência inicial (CP V ARI) que possui grande utilização no sistema de parede de concreto, pela necessidade de rápida desforma. Na Tabela 6 são apresentadas as características do cimento ensaiadas em laboratório.

Tabela 6 – Características do cimento CP V ARI ensaiadas em laboratório

Características	Resultados obtidos	Normas utilizadas (ABNT NBR)
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,015	NM 23:2001
Área superficial (m <sup>2</sup> /kg)	540,44	11579:2012

Fonte: Autora.

Na Tabela 7 são relacionadas as características de acordo com o fabricante.

Tabela 7 – Características do cimento CP V ARI de acordo com o fabricante

Propriedade	Valor	
Tempo de pega (min)	Início	127
	Fim	182
Dimensão média (µm)	10,27	
Perda ao fogo	3,6	
Resistência a compressão (MPa)	1 dia	29
	3 dias	40,1
	7 dias	44,3
	28 dias	53,2

Fonte: Fabricante.

### 3.1.5 Agregados

#### 3.1.5.1 Agregado miúdo

Em relação aos agregados miúdos foram utilizados areia fina (20%) e areia média (80%) lavadas, retiradas na região do triângulo mineiro. Na Tabela 8 são relacionadas as características dos agregados miúdos avaliadas e as respectivas normas empregadas para a determinação das mesmas.

Tabela 8 – Caracterização dos agregados miúdos utilizados

Características	Resultados obtidos		Normas utilizadas (ABNT NBR)
	Areia fina	Areia média	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,59	2,67	NM 52:2009
Dimensão máxima característica (mm)	1,18	4,75	NM 248:2003
Módulo de finura	1,46	2,66	NM 248:2003

Fonte: Autora.

### 3.1.5.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi de pedra britada de rocha basalto, zona granulométrica 4,75/12,5. As características avaliadas assim como as respectivas normas de ensaio encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Caracterização do agregado graúdo utilizado

Características	Resultados obtidos	Normas utilizadas (ABNT NBR)
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,91	NM 53:2009
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	NM 248:2003
Módulo de finura	5,77	NM 248:2003
Massa unitária estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,50	NM 45:2006
Massa unitária estado compactado (g/cm <sup>3</sup> )	1,63	NM 45:2006

Fonte: Autora.

### 3.1.6 Água e aditivo

A água utilizada nessa pesquisa na produção dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Uberlândia-MG.

O aditivo utilizado nessa pesquisa foi o MasterGlenium 3400 also Glenium 3400NV da BASF. De acordo com as informações técnicas, esse aditivo é denominado como um aditivo hiperplastificante, com um alto índice de redução de água. Ainda de acordo com a ficha técnica do produto, dentre os benefícios obtidos com sua utilização encontra-se a melhoria da trabalhabilidade. A Tabela 10 contém alguns dados técnicos contidos na ficha técnica do produto.

Tabela 10 – Dados técnicos do aditivo hiperplastificante utilizado

Dados técnicos	
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho escuro
Base química	Éter policarboxílico
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,000-1,200
pH	08 - 10
Consumo (% s.m.c*)	0,2 - 1,0

\*sobre a massa de cimento

Fonte: BASF, [s.d.].

### 3.2 Produção do compósito

Para a fabricação do compósito buscou-se um concreto com consistência mais fluida, semelhante ao utilizado para construção em paredes de concreto. A seguir estão descritas a dosagem adotada na produção do concreto além da forma de moldagem e cura dos corpos de prova utilizados na pesquisa.

#### 3.2.1 Dosagem utilizada no concreto

No concreto utilizado nessa pesquisa buscou-se um concreto semelhante ao utilizado nos sistemas construtivos de paredes de concreto, com uma consistência mais fluida, de forma que com a adição de fibras não ocorresse redução significativa da trabalhabilidade, foi feita a utilização de aditivo até o limite sugerido pelo fabricante (1,0%) de modo a se atingir a trabalhabilidade adequada, quando necessário. A Tabela 11 apresenta a dosagem do concreto utilizado nessa pesquisa.

Tabela 11 – Dosagem do concreto (1 m<sup>3</sup>)

Cimento CP V (kg)	Areia fina (kg)	Areia média (kg)	Brita 0 (kg)	Água (L)	Aditivo
385	200	800	769	231	Variável

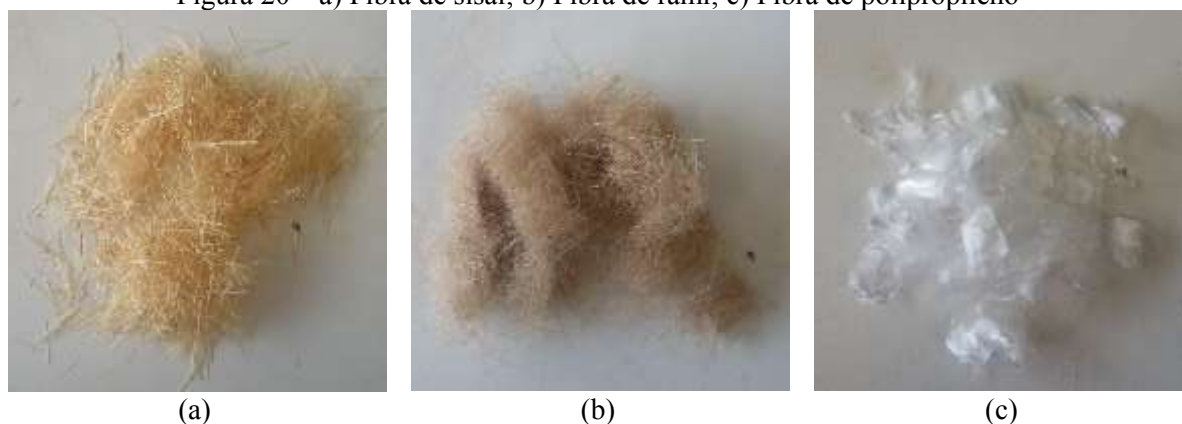
Fonte: Autora.

A ordem e tempo de mistura dos componentes do concreto foram definidos de modo a se obter uma maior dispersão dos materiais. Para a determinação da quantidade de aditivo utilizada, foi feito previamente, um estudo da trabalhabilidade.

#### 3.2.2 Produção do compósito

Primeiramente as fibras de sisal e rami foram cortadas em dimensões aproximadas de 15 mm (Figura 20a e Figura 20b respectivamente), de forma a se atingir um comprimento próximo da fibra de polipropileno (Figura 20c). Antes de iniciar o processo de moldagem do compósito, as fibras vegetais foram secas em estufa e pesadas em quantidades adequadas para cada teor.

Figura 20 – a) Fibra de sisal; b) Fibra de rami; c) Fibra de polipropileno



Fonte: Autora.

As fibras vegetais possuem elevada capacidade de absorção. Savastano Jr. (1992) descreve que na fibra vegetal submersa em água por 15 minutos, ocorre pelo menos 60% da absorção total e após 24 horas atinge cerca de 85% do total. Particularmente para a fibra de sisal, Toledo Filho e Sanjuán (1999) descrevem que após 5 minutos submersas em água a absorção é de 82%.

Para que não ocorresse grande redução da água necessária para a plasticidade da mistura, as fibras vegetais foram submersas por aproximadamente 15 minutos em água, previamente à mistura do concreto. Após esse período foram retiradas e colocadas em peneiras para permitir que a fibra perdesse o excesso de água. As fibras foram adicionadas à mistura na condição saturada, mas com superfície seca, de modo a não alterar a relação água/cimento da pasta. Essa água absorvida pelas fibras somente poderá ser perdida após o endurecimento e posterior secagem dos concretos.

A incorporação da fibra gera uma alteração na consistência do concreto e uma consequente redução na trabalhabilidade, isso ocorre principalmente porque adicionando-se a fibra ao concreto tem-se um aumento da área superficial que demanda água de molhagem (FIGUEIREDO, 2000). Portanto, uma vez que as fibras possuem diâmetro diferentes resultando numa maior ou menor área superficial, os teores de fibras e aditivo foram obtidos a partir da análise prévia da consistência do compósito, pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, buscando que a trabalhabilidade permanecesse em níveis adequados.

Conforme descrito anteriormente para a redução da retração é recomendado o uso de baixos teores de fibras, usualmente menor do que 0,5%. Nesta pesquisa foram utilizados teores de fibras 0,25% e 0,50% em volume de concreto, com exceção da fibra de polipropileno, devido a adição de 0,50% ter resultado em um compósito sem trabalhabilidade e extremamente seco,

não podendo ser aplicado na prática. A relação dos concretos produzidos, os tipos e quantidade de fibras e quantidade de aditivo podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Relação do teor de fibras e de aditivo utilizados na pesquisa

	Teor de fibra	Teor de aditivo*	Nomenclatura adotada
Referência	-	0,4%	Ref
Sisal	0,25%	0,6%	0,25S
	0,50%	1,0%	0,5S
Rami	0,25%	1,0%	0,25R
	0,50%	1,0%	0,5R
Polipropileno	0,25%	0,6%	0,25P

\*sobre a massa de cimento

Fonte: Autora.

Para a produção do concreto foi utilizada betoneira de eixo inclinado com capacidade nominal de 320 litros. Os agregados foram separados previamente e colocados em local coberto onde permaneceram até atingir umidade desprezível. Inicialmente a betoneira foi imprimada com o traço 1:2:3:0,5 (cimento: areia média: brita: água). Os materiais foram adicionados, com a betoneira em movimento, na seguinte ordem para todas as misturas: brita → metade da água → fibra (quando necessário) → areia média e areia fina → cimento → metade da água com aditivo. Os materiais foram misturados por cerca de quatro minutos.

Adotou-se a mistura inicial de brita e metade da água pois foi observado que quando realizada a adição de toda quantidade de fibra, sem realizar a dispersão, a tendência é formar emaranhados, que não são desfeitos durante a mistura do concreto, reduzindo a resistência do mesmo. Por esse motivo a adição das fibras foi realizada manualmente, permitindo a dispersão das mesmas, porém tornando-se um processo demorado.

Após a mistura inicial procedeu-se o ensaio de consistência pelo abatimento do troco de cone para a avaliação da trabalhabilidade (Figura 21a), o ensaio para a determinação da massa específica no estado fresco (Figura 21b), juntamente com a moldagem dos corpos de prova (Figura 21c) e anéis.

Figura 21 – a) Ensaio de abatimento do tronco de cone; b) Ensaio de determinação da massa específica no estado fresco; c) Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autora.

### 3.2.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os compósitos foram moldados em corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Mesmo sendo recomendado pela norma ABNT NBR 5738:2015 que para concretos com abatimento superior a 160 mm a quantidade de camadas seja reduzida na metade, devido à maior quantidade de energia necessária para compactação dos corpos de prova com adição de fibras, o preenchimento do cilindro foi dividido em duas camadas nas quais eram aplicados 12 golpes em cada com uma haste metálica, para todos os concretos estudados. Esses corpos de prova foram preparados para a determinação da resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, massa específica, índice de vazios, absorção de água por imersão e por capilaridade.

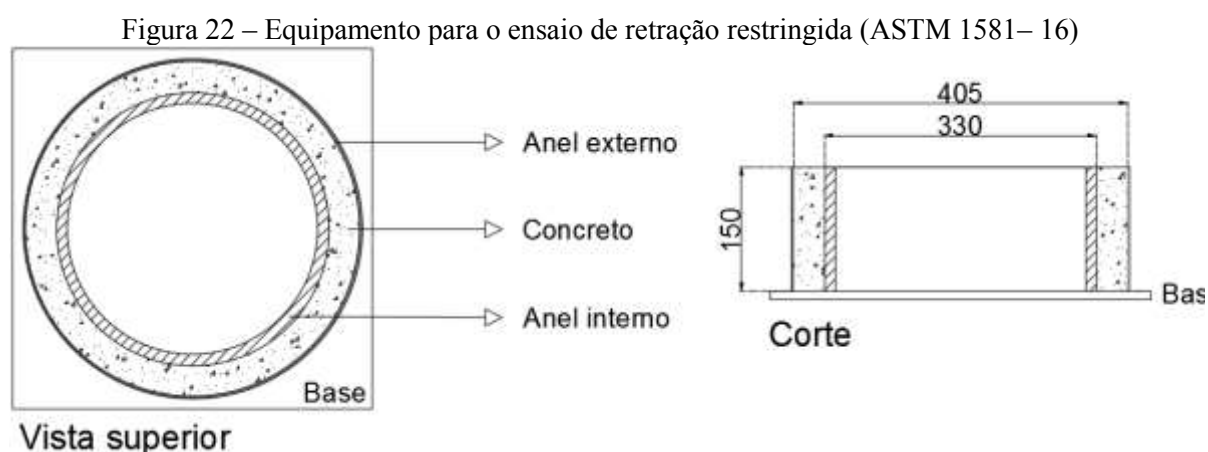
Em seguida à moldagem, os corpos de prova cilíndricos ainda com as formas foram colocados em câmara úmida na qual permaneceram durante um período aproximado de 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e dispostos em um tanque onde permaneceram submersos em água saturada com cal, até a idade de 28 dias. Completado esse período os corpos de prova foram retirados do tanque. Também foram moldados anéis para a avaliação da retração por secagem restringida, o método utilizado para a moldagem e cura está descrito na seção 3.3.1.



### 3.3 Métodos de ensaio

#### 3.3.1 Análise da retração por secagem restringida (ASTM C1581-16)

O ensaio realizado para a avaliação da retração por secagem restringida baseou-se nas recomendações da ASTM C1581/C1581M – 16 *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Stress Characteristics of Mortar and concrete under Restrained Shrinkage*. Com esse ensaio é possível determinar a idade de fissuração e as variações dimensionais no concreto devido à retração por secagem. De forma simplificada o ensaio consiste em moldar o concreto ou argamassa ao redor de um anel de aço instrumentado com extensômetros e fazer a aquisição dos dados, nesse caso da deformação sofrida pelo anel até a data de fissuração do concreto ou até os 28 dias caso não ocorra a fissuração do mesmo. Na Figura 22 é apresentado o esquema do molde recomendado pela ASTM C1581 – 16 com dimensões em milímetros. A espessura do anel recomendada é de 13 mm.



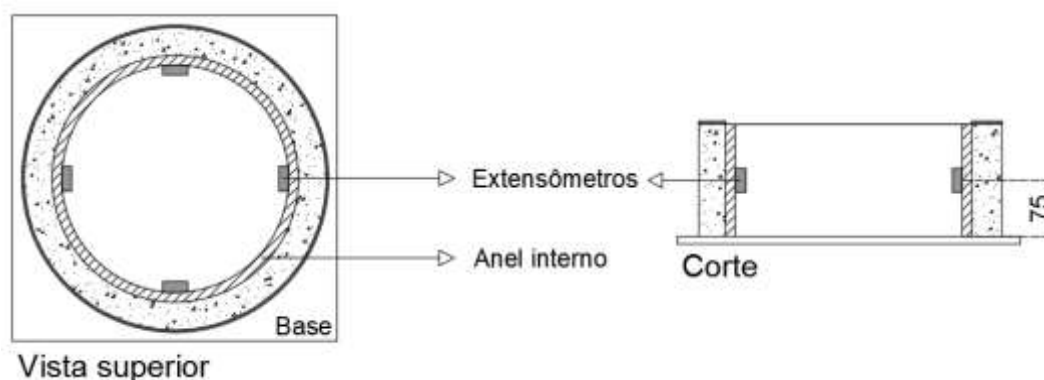
Fonte: Autora.

Os anéis foram preparados e instrumentados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Para a fabricação dos anéis internos e externos utilizados buscou-se seguir as recomendações da norma ASTM C1581-16. Foi mantida uma variação da distância entre o anel interno e externo de no máximo 2,0 mm. A espessura do anel de aço interno foi de 12,7 mm.

A norma recomenda que sejam colados pelo menos dois extensômetros posicionados na metade da altura na face interna do anel de modo a ficarem em posição diametralmente oposta (Figura 23). Neste ensaio foram colados quatro extensômetros elétricos de 120  $\Omega$  em cada anel, seguindo os procedimentos: primeiramente foi realizada uma marcação da posição aproximada de cada extensômetro; seguido por um lixamento com a finalidade de retirar a rugosidade presente no aço para então realizar a limpeza do local; posteriormente foi feita a marcação exata

da posição; colagem do extensômetro; proteção do mesmo e soldagem dos terminais elétricos. A leitura da deformação no anel de aço foi realizada separadamente por cada um dos extensômetros, a ligação empregada foi em configuração de meia ponte com compensador. Foram utilizados compensadores de temperatura, que consistem em chapas de aço com as mesmas propriedades e espessura do anel, as quais não são submetidas à nenhuma força externa. Nessas chapas são colados extensômetros em mesmo número dos utilizados nos anéis, dessa forma as deformações devido às variações de temperatura são anuladas.

Figura 23 – Representação esquemática do posicionamento dos extensômetros



Fonte: Autora.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o QuantumX MX1615 da marca HBM (Figura 24a). Após finalizada a etapa de instrumentação (Figura 24b) os anéis foram fixados em uma base de madeira por meio de barras roscáveis (anel externo) e parafusos (anel interno). Para evitar perda de material, durante o enchimento dos anéis e adensamento, foi realizada a vedação entre a base de madeira e os anéis utilizando silicone.

Figura 24 – a) Equipamento para a aquisição de dados; b) Anel instrumentado



Fonte: Autora.

Após a instrumentação e montagem os anéis foram armazenados em ambiente com temperatura controlada, onde permaneceram no decorrer do ensaio. A ASTM C1581-16 recomenda que o ensaio seja conduzido em sala com temperatura e umidade de  $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $50 \pm 4 \text{ } \%$

respectivamente. Inicialmente tentou-se conduzir o ensaio em câmara climatizada com temperatura e umidade controladas, porém devido à sensibilidade dos extensômetros, o funcionamento dos equipamentos de climatização provocou grandes variações nas leituras, de modo que não era possível distinguir o local de fissuração do concreto, portanto os dados obtidos foram descartados. Posteriormente o ensaio foi realizado em sala climatizada, a temperatura do local de ensaio atendeu as exigências da norma, porém por não se dispor de equipamento necessário para a elevação e constância da umidade, o ensaio foi conduzido a umidade de  $45 \pm 5 \%$ .

O processo de concretagem de cada anel seguiu os procedimentos da norma ASTM C1581-16. Em cada anel foram feitas duas camadas de concreto aproximadamente iguais (Figura 25a), sendo que cada uma recebia 75 golpes com uma haste, além da vibração, com o intuito de consolidar a camada. É sugerido pela ASTM C1581-16 que os anéis sejam moldados em cima de uma mesa vibratória, porém devido às dificuldades para o transporte do anel, os moldes foram adensados com vibrador mecânico de imersão. Após o preenchimento das duas camadas foi feito um acabamento de modo a nivelar a superfície do concreto (Figura 25b).

Figura 25 – a) Preenchimento da primeira camada do anel; b) Moldagem do anel finalizada



(a)



(b)

Fonte: Autora.

Conforme recomendação da ASTM C1581-16 o período de cura úmida ocorre nas primeiras 24 horas após a moldagem dos anéis, nesse período o molde foi coberto por um pano úmido e por um plástico (Figura 26).

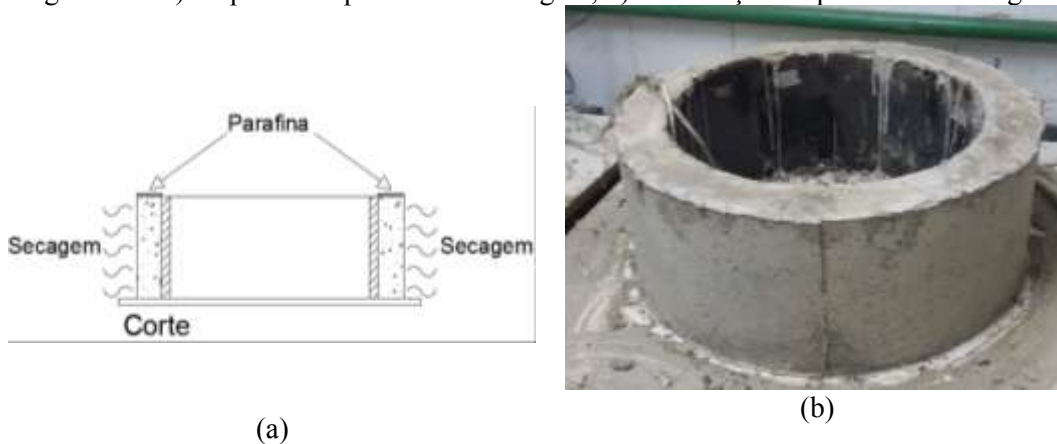
Figura 26 – Processo de cura úmida nas primeiras 24 horas após a moldagem



Fonte: Autora.

Ocorrida as 24 horas necessárias para a cura úmida, foram retirados o plástico e o pano para então ser realizada a retirada do anel externo. Assim como descrito na ASTM C1581-16 após a retirada do anel externo foi feita a limpeza da parte de cima do molde de concreto para proceder a selagem desse local com parafina. Esse procedimento é realizado com a finalidade da secagem ocorrer somente na superfície circunferencial externa conforme esquematizado na Figura 27a. Uma vez finalizado o processo de selagem (Figura 27b) iniciou-se a aquisição dos valores da deformação do anel de aço a cada dez minutos até a data de fissuração do concreto.

Figura 27 – a) Esquema do processo de secagem; b) Finalização do processo de selagem



(a)

(b)

Fonte: Autora.

Durante todo o ensaio os moldes foram inspecionados com a finalidade de verificar a formação de fissuras. Apesar da ASTM C1581-16 recomendar que sejam moldados três exemplares de cada concreto, devido às dificuldades para a realização do ensaio, como a sensibilidade dos extensômetros citada anteriormente, foram considerados apenas dois exemplares (duas idades de fissuração) para cada concreto, todos os resultados ficaram dentro do desvio de dois dias para um mesmo tipo de concreto, conforme citado na ASTM C1581-16.

A idade de fissuração de acordo com a ASTM C1581-16 é a idade a partir da moldagem até a súbita diminuição da deformação, essa diminuição pode ser evidenciada por um ou mais

extensômetros. A diminuição é devido ao alívio de tensões gerado com a fissuração do anel de concreto. Uma vez ocorrido o alívio da tensão, geralmente em intervalo não maior que um dia, a partir de uma análise visual, uma ou mais fissuras, puderam ser encontradas próximas aos extensômetros que apresentaram as maiores variações, em todos os concretos estudados.

### *3.3.2 Determinação das propriedades físicas e mecânicas do compósito*

Os compósitos foram caracterizados quanto a resistência à compressão, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral, massa específica, índice de vazios e absorção (imersão e capilaridade), os métodos adotados são descritos a seguir.

#### *3.3.2.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade*

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2007 e para o módulo de elasticidade foi utilizada como referência a ABNT NBR 8522:2008. Esses ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, moldados e curados conforme descrito anteriormente. Previamente a execução de ambos ensaios foi realizada a regularização dos corpos de prova com enxofre, operação denominada de capeamento (Figura 28a). Após a regularização os corpos de prova foram posicionados na máquina e ensaiados (Figura 28b). Para esses ensaios foi utilizada a máquina universal de ensaios marca EMIC, modelo DL60000.

Figura 28 – a) Corpos de prova preparados para ensaio; b) Ensaio de compressão finalizado



(a)

(b)

Fonte: Autora.

Para a compressão uniaxial foram ensaiados dois corpos de prova para cada tipo de concreto na idade de 7 dias e cinco corpos de prova na idade de 28 dias, e para o módulo de elasticidade foram ensaiados três corpos de prova para cada tipo de concreto apenas aos 28 dias. Os

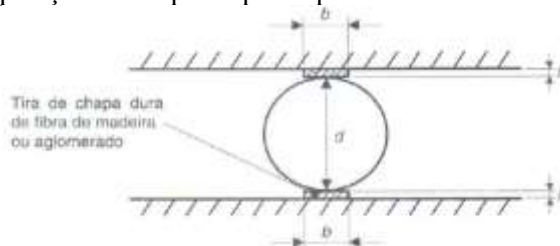
resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência a compressão foram dispostos na seção 4.2.2.

### 3.3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio para verificação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de concreto foi realizado segundo os critérios da ABNT NBR 7222:2011.

O corpo de prova cilíndrico deve ser posicionado na máquina de ensaio, de maneira que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas coincida com o eixo de aplicação de carga. Duas tiras de fibra de madeira foram inseridas entre os pratos da máquina e os corpos de prova em ensaio. Na Figura 29 é ilustrado o procedimento citado.

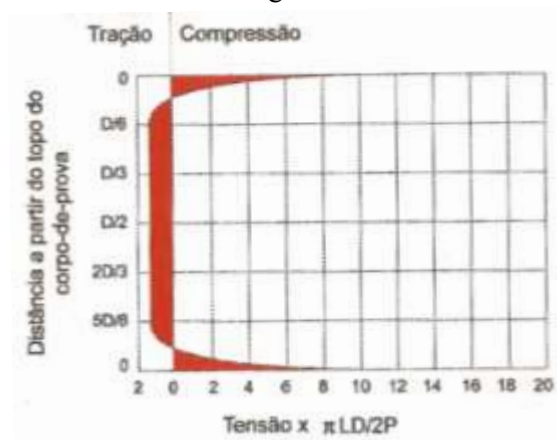
Figura 29 – Disposição do corpo de prova para o ensaio de compressão diametral



Fonte: ABNT NBR 7222:2011.

A tensão de compressão aplicada produz uma tensão de tração transversal, que é uniforme ao longo do diâmetro vertical conforme pode ser visualizado na Figura 30 (METHA; MONTEIRO, 2008).

Figura 30 - Distribuição da tensão de tração ao longo do diâmetro de um corpo de prova com carregamento



Fonte: Metha e Monteiro (2008).

O cálculo da resistência à tração por compressão diametral é realizado a partir da Equação (1.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \quad (1)$$

Em que  $f_{ct,sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos (MPa);  $F$  é a força máxima registrada na máquina de ensaio em Newtons (N);  $d$  é o diâmetro do corpo de prova cilíndrico (mm) e  $l$  é o comprimento do corpo de prova cilíndrico (mm).

Para esse ensaio foram utilizados dois corpos de prova cilíndricos de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro para cada tipo de concreto, moldados e curados conforme descrito anteriormente, assim que atingido os 28 dias de idade do concreto. Para esse ensaio foi utilizada a máquina universal de ensaios marca EMIC, modelo DL60000 e os resultados do ensaio estão descritos na seção 4.2.2.

#### *3.3.2.3 Massa específica e absorção de água por imersão*

O ensaio para a obtenção da massa específica e absorção de água por imersão do concreto no estado endurecido foi realizado de acordo com a ABNT NBR 9778:2005. Ainda de acordo com essa norma, foi calculado o índice de vazios por imersão e fervura.

Para a realização desse ensaio foram utilizadas duas amostras de cada tipo de concreto. Foram ensaiados, aos 28 dias de idade, dois corpos de prova cilíndricos de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, moldados e curados conforme descrito anteriormente.

Primeiramente as amostras permaneceram em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C durante 72 horas, após esse período foram retiradas e pesadas, obtendo-se assim a massa seca. Posteriormente as amostras foram imergidas em água por um período de 72 horas. Completada a etapa anterior, os corpos de prova foram dispostos em autoclave que progressivamente foi levada a ebulição, mantida por um período de 5 horas. Aguardou-se até que a água atingisse a temperatura de 23 °C para então retirar os corpos de prova e registrar a massa em balança hidrostática. Posteriormente os corpos de prova foram secos com um pano úmido e então foi registrada a massa saturada. Foram realizados os cálculos indicados na ABNT NBR 9778:2005 e os resultados foram descritos na seção 4.2.3.

#### *3.3.2.4 Absorção por capilaridade*

O ensaio para a determinação da absorção por capilaridade foi realizado de acordo com a ABNT NBR 9779:2012. Foram ensaiados, aos 70 dias de idade, três corpos de prova cilíndricos de 20



cm de altura e 10 cm de diâmetro para cada tipo de concreto, moldados e curados conforme descrito anteriormente.

Os corpos de prova foram mantidos em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C até a constância de massa (a diferença entre duas pesagens do mesmo corpo de prova entre períodos de duas horas de permanência na estufa não pode exceder 5% do menor valor obtido). Atingida a constância, os corpos de prova foram retirados da estufa e resfriados até a temperatura de  $23 \pm 2$  °C quando foram pesados. Os corpos de prova foram, então, dispostos sobre suportes em um recipiente preenchido com água até a altura de 5 mm da base inferior (Figura 31a). O nível da água foi mantido constante durante todo o ensaio. Em intervalos de tempo determinados pela ABNT NBR 9779:2012, os corpos de prova tiveram sua massa aferida (Figura 31b). A partir do momento que os corpos de prova entram em contato com a água, a pesagem é realizada após 3 h, 6h, 24 h, 48 h, e 72 h. Na última pesagem, que ocorre quando completadas 72 horas a ABNT NBR 9779:2012 recomenda o rompimento das amostras ensaiadas por compressão diametral, de modo a permitir a anotação da distribuição da água no seu interior. Foram realizados os cálculos dispostos na ABNT NBR 9779:2012, os resultados e fotos demonstrando a distribuição da água no interior dos corpos de prova podem ser visualizados na seção 4.2.3.

Figura 31 – a) Disposição dos corpos de prova para a realização do ensaio de absorção por capilaridade; b) Pesagem do corpo de prova



(a)



(b)

Fonte: Autora.



# CAPÍTULO 4

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são abordados os resultados dos ensaios realizados. De forma a facilitar a organização do trabalho os resultados foram subdivididos em resultado no estado fresco, em que foram realizados os ensaios de abatimento e massa específica, e os resultados no estado endurecido. Nos resultados no estado endurecido são primeiramente apresentados os resultados obtidos com o ensaio de retração. Posteriormente são apresentados, os ensaios para determinação das propriedades mecânicas, que são os ensaios de compressão uniaxial aos 7 e 28 dias, o módulo de elasticidade e resistência à tração aos 28 dias, além de ensaios para determinação de algumas propriedades físicas, tais como a massa específica, absorção de água por imersão, índice de vazios e ainda a absorção de água por capilaridade.

### 4.1 Resultados no estado fresco

Conforme descrito anteriormente, no estado fresco foram realizados o ensaio de abatimento de tronco de cone, após quatro minutos de mistura aproximadamente. De acordo com Resende (2003) em concretos com fibra a avaliação direta dos valores obtidos no ensaio de abatimento pode não representar a trabalhabilidade adequadamente dos compósitos. Esse fato é devido ao ensaio estar baseado em condições estáticas nas quais as fibras possuem, em geral, tendência de reduzir o abatimento, criando uma aparente falta de trabalhabilidade, podendo o compósito responder muito bem quando submetido à vibração, logo o ensaio de abatimento fornece apenas uma indicação qualitativa da trabalhabilidade da massa (RESENDE, 2003).

Além do ensaio de abatimento, também foi feita a avaliação da massa específica do concreto no estado fresco, os resultados podem ser visualizados na Tabela 13, nessa tabela foram mencionados novamente os teores de aditivo utilizados de forma a facilitar a comparação entre os resultados dos concretos estudados.

Tabela 13 – Resultados de abatimento e massa específica no estado fresco

Concretos	Propriedades	Abatimento (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de aditivo*
Ref		187	2,36	0,4%
0,25S		170	2,28	0,6%
0,25R		185	2,30	1,0%
0,25P		100	2,33	0,6%
0,5S		123	2,35	1,0%
0,5R		45	2,26	1,0%

\*sobre a massa de cimento

Fonte: Autora.

Pode ser verificado que as fibras possuem comportamentos diferentes quando adicionadas ao concreto, inclusive quando utilizadas nos mesmos teores, um dos fatores que explicam esse comportamento é devido a superfície específica de cada uma. Fazendo-se uma comparação dos concretos 0,5S e 0,5R, em que foi utilizado o mesmo teor de aditivo, o abatimento do concreto 0,5S foi maior quando comparado ao concreto 0,5R, uma vez que o diâmetro da fibra de sisal é quase seis vezes maior que da fibra de rami. O mesmo fenômeno ocorreu para os concretos 0,25S e 0,25P, uma vez que a fibra de sisal possui diâmetro quase treze vezes maior que a fibra de polipropileno.

Na preparação dos compósitos com teor de fibra de 0,25 % tentou-se obter a trabalhabilidade aproximada do concreto de referência com o aumento do consumo de aditivo. Partindo desse pressuposto, foi adicionado ao concreto 0,25R o teor de 1,0% de aditivo, a resposta foi um concreto com um maior abatimento, mas que sofreu uma exsudação intensa. Por esse motivo mesmo sendo menor o abatimento do concreto 0,25P julgou-se necessário a utilização de um menor teor de aditivo, nesse caso de 0,6%. Para os concretos 0,5S e 0,5R foi adicionado 1,0% de aditivo, mas não foi verificada a exsudação com tal intensidade. Outro ponto a ser destacado foi que mesmo o abatimento do concreto 0,5R sendo extremamente baixo, 45 mm o teor de aditivo utilizado foi de 1,0%, conforme o consumo máximo estipulado pelo fabricante.

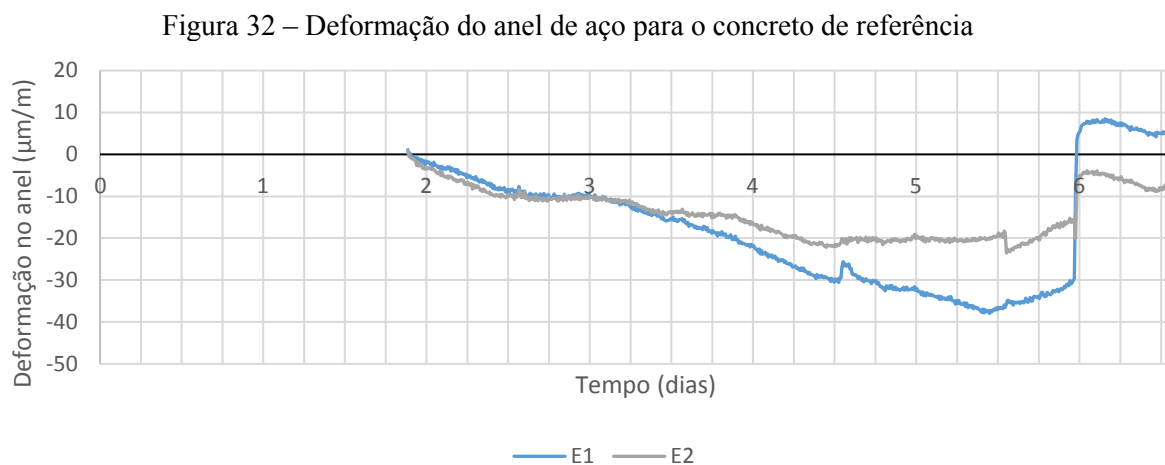
## 4.2 Resultados no estado endurecido

### 4.2.1 Retração por secagem restringida

A seguir são apresentados os resultados obtidos em um dos ensaios para cada tipo de concreto estudado. A fim de facilitar a compreensão dos gráficos, serão apresentadas as deformações de dois extensômetros diametralmente opostos, em  $\mu\text{m/m}$  e a idade do concreto em dias, sendo que cada dia foi dividido em quatro partes, como sugere a norma. As alterações momentâneas

registradas pelos extensômetros devem-se à ruídos causados por interferência no ambiente como o acendimento de lâmpadas, funcionamento de motores entre outros. Por não ser objetivo deste trabalho o estudo do comportamento do concreto quanto às deformações internas causadas pelo calor de hidratação, os dados relativos ao primeiro dia foram descartados.

Na Figura 32 pode ser observado o gráfico obtido em um dos ensaios realizados com o concreto de referência. Ressalta-se para este resultado, que no segundo dia após a moldagem do anel, ocorreu uma falta de energia inesperada, mesmo todo equipamento estando ligado em um nobreak, o ensaio foi interrompido durante oito horas. Portanto o ensaio tem início no final do primeiro dia, logo, para a análise dos resultados, não será considerada a deformação do anel como resultado, uma vez que Shah e Weiss (2006) descrevem que as deformações sofridas pelo anel de aço antes da fissuração são semelhantes independente do volume de fibras adicionado.

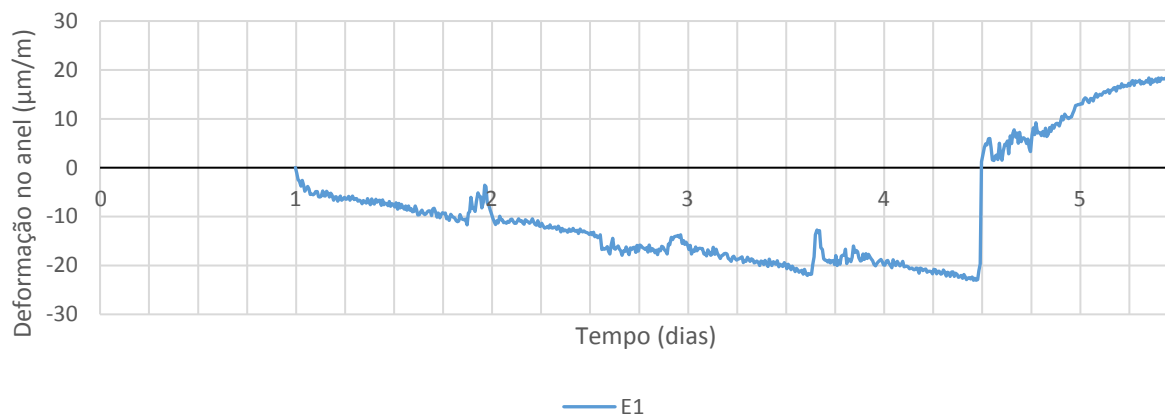


Fonte: Autora.

A fissuração deste concreto ocorreu após 143 horas da moldagem, próximo ao sexto dia de idade do concreto. A mudança repentina na deformação corresponde a idade da fissuração visível na amostra (SHAH; WHEISS, 2006). Pode-se perceber que os extensômetros não reproduzem a fissura da mesma forma, uma vez que dependendo do lugar de fissuração o alívio é maior ou menor, quanto mais próximo à fissura maior a diminuição da deformação. Salienta-se também, que no concreto sem adição de fibras, as fissuras quando se tornavam visíveis, praticamente ocorriam em duas posições diametralmente opostas. Ressalta-se que por falta de equipamentos adequados, como por exemplo luz fluorescente, para ajudar na identificação das fissuras, não se tem como objetivo deste trabalho numerar a quantidade de fissuras existentes no anel, uma vez que alguns concretos apresentavam fissuras tão finas que eram de difícil visualização, mesmo com lupa.

Na Figura 33 estão os resultados obtidos com o concreto 0,25S. Neste ensaio o extensômetro diametralmente oposto não apresentou resultados coerentes, sendo, portanto, descartado.

Figura 33 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,25S

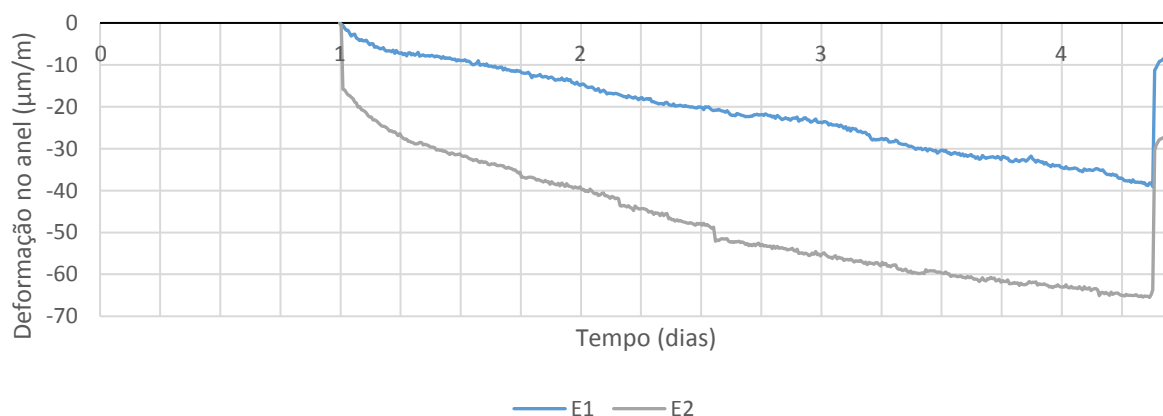


Fonte: Autora

A fissura para este ensaio ocorreu após 107,5 horas após a moldagem do anel, aproximadamente aos 4,5 dias. Pode-se perceber também neste gráfico as possíveis interferências do ambiente como descrito anteriormente, pelos ruídos externos gerados.

Na Figura 34 estão os dados relativos ao ensaio realizado com o concreto 0,25R.

Figura 34 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,25R

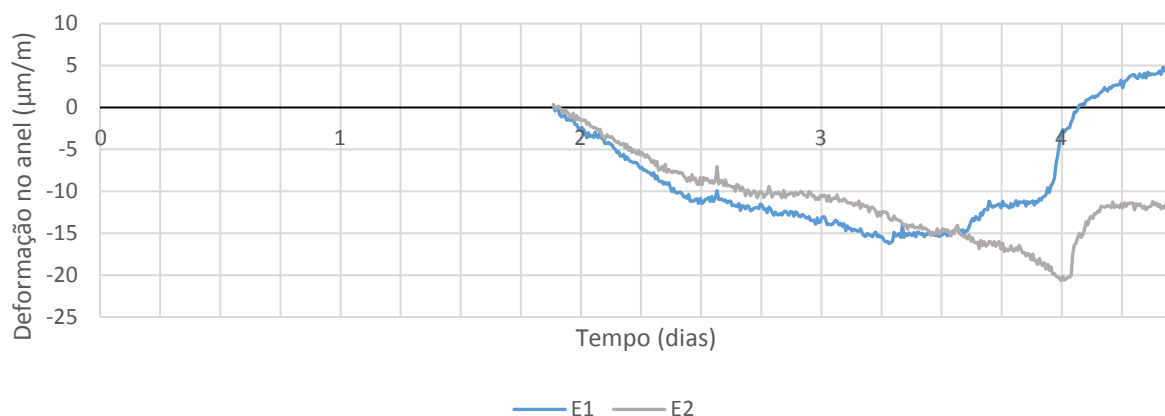


Fonte: Autora.

O concreto 0,25R apresentou a fissuração após 105 horas da moldagem, ou seja, próxima aos 4,5 dias.

Em relação ao concreto 0,25P, na Figura 35 estão os resultados da deformação em função do tempo. Pela moldagem desse anel ter ocorrido no mesmo dia do concreto de referência, a interrupção de energia também causou transtornos na aquisição dos dados nas primeiras horas.

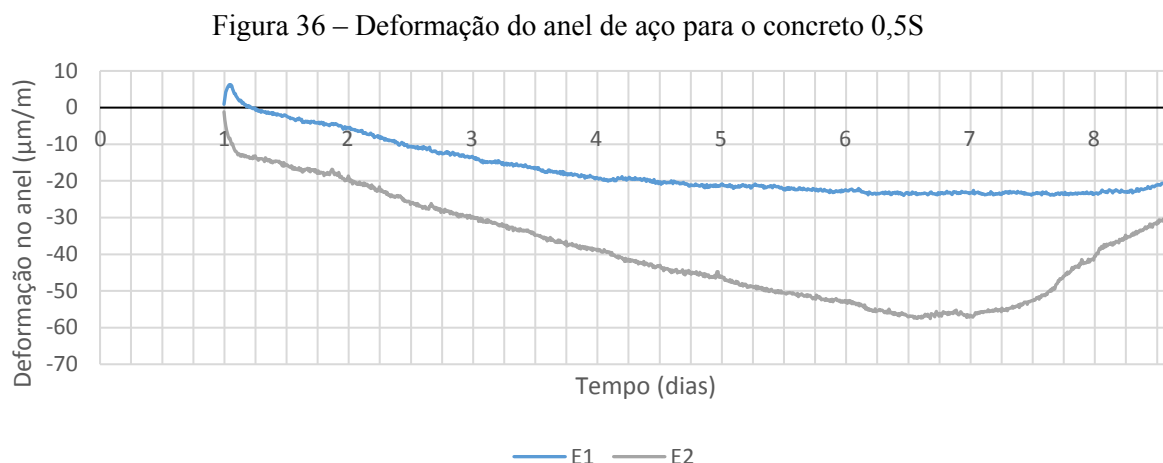
Figura 35 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,25P



Fonte: Autora.

Como pode ser visualizado a fissura para o concreto 0,25P ocorreu após 86,33 horas da moldagem, sendo aproximadamente 3,6 dias. O concreto 0,25P apresentou comportamento diferente dos concretos já apresentados (referência, 0,25S e 0,25R), uma vez que a queda de tensão no anel não ocorreu simultaneamente nos dois extensômetros, ocorrendo primeiramente no extensômetro E1. Destaca-se também que nesse extensômetro a queda não ocorreu de forma instantânea. Shah e Weiss (2006) verificaram esse comportamento para compósitos com frações volumétricas de fibras elevadas. Segundo os autores, esses materiais apresentam primeiramente um alívio na deformação muito menos substancial e, posteriormente, outra diminuição também pouco substancial na deformação do anel no momento da fissuração visível. Ainda de acordo com os mesmos autores nas amostras com volumes elevados de fibras, a deformação não diminui rapidamente, provavelmente devido ao fato de as fibras ajudarem a transferência de tensão através das microfissuras que se desenvolvem devido à restrição. Neste caso, o desenvolvimento semi-estável da fissura na amostra é “preso” pelo reforço da fibra (CHARITON; KIM; WEISS, 2002 apud SHAH; WEISS, 2006).

Foram dispostos na Figura 36 os dados relativos a deformação do anel de aço relativo ao concreto 0,5S.



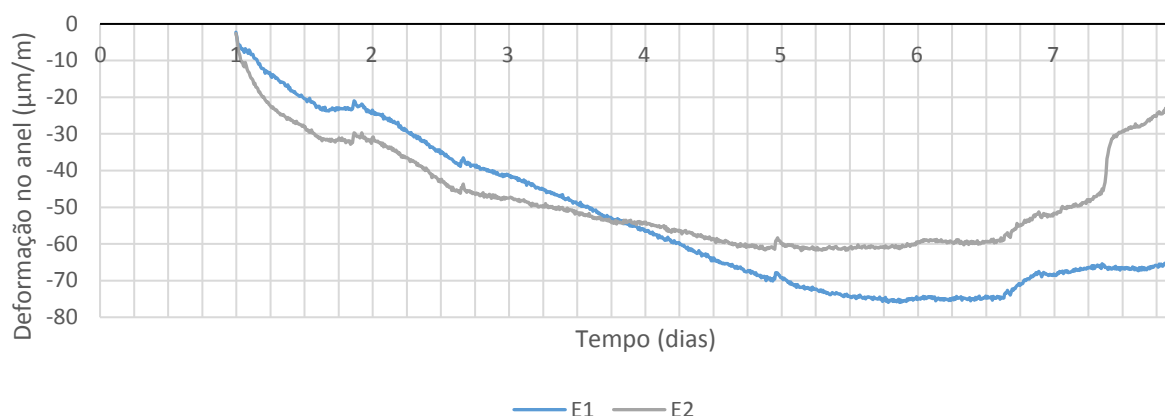
Fonte: Autora.

Observou-se que a fissura nesse anel apresentou comportamento diferente dos demais, provavelmente devido à maior quantidade de fibras “costurando” a fissura. De acordo com Shah e Weiss (2006) em ensaios contendo elevado volume de fibras, a idade da fissura é de difícil determinação, uma vez que as fibras se unem impedindo a propagação da fissura. O salto não ocorreu de forma brusca, mas sim de forma gradual como pode ser observado no extensômetro E2, tomado como referência para a determinação da idade de fissuração. Pôde ser confirmada a ocorrência da fissura uma vez que esta se tornou visível cerca de 24 horas depois. Devido a dificuldades na determinação do momento de fissuração do concreto, autores como Shah e Weiss (2006) utilizaram, como forma de complementar os resultados obtidos no ensaio do anel, medições de emissões acústicas para a indicação de ocorrência de fissuras, principalmente em concretos com elevados teores de fibra.

Na Figura 36 nota-se também que o extensômetro oposto praticamente não sofreu alterações devido à fissura, observou-se nos concretos com 0,5% de fibras que as fissuras não ocorreram de forma diametralmente oposta, após o salto nos extensômetros apenas uma fissura foi encontrada nesses tipos de concreto. Pela diferença no comportamento, considerou-se que o momento de fissuração teve início quando iniciou o alívio da tensão no anel, cerca de 168,33 horas após a moldagem, no sétimo dia aproximadamente.

Na Figura 37 são apresentados os valores de deformação encontrados para o concreto 0,5R.

Figura 37 – Deformação do anel de aço para o concreto 0,5R



Fonte: Autora.

O extensômetro E1 apresentou comportamento semelhante ao extensômetro do concreto 0,25P apresentado na Figura 35, e conforme descrito por Shah e Weiss (2006), podem ser visualizados dois saltos, um mais e um menos substancial. Como descrito anteriormente, considerou-se o instante de fissuração como o início do alívio da tensão exercida pelo concreto no anel de aço, aproximadamente após 157,83 horas após a moldagem, nesse caso 6,6 dias aproximadamente.

Na Tabela 14 é apresentada a média de dois ensaios realizados para cada concreto, com exceção do ensaio realizado para o concreto 0,25R, uma vez que na repetição não foi observada o momento da fissuração na leitura dos extensômetros, provavelmente devido as interferências ocorridas e à sensibilidade dos extensômetros. Devido à pouca diferença entre eles, preferiu-se realizar a média em horas para posteriormente transformar para dias e então apresentar os resultados de acordo com a ASTM C1581-16. A ASTM C1581-16 recomenda que a idade de fissuração, idade medida desde a moldagem do anel até o momento que ocorre uma redução repentina na deformação, seja expressa pelo 0,25 dia mais próximo. Dividindo-se o dia da fissuração em quatro partes o resultado foi um desses quatros valores que a idade obtida mais se aproximou.

Tabela 14 – Valores médios de idade da fissuração ocorrida nos concretos

Concreto	Ref	0,25S	0,25R	0,25P	0,5S	0,5R
Ensaio 1 (horas)	143,00	107,50	105,00	86,33	164,33	157,83
Ensaio 2 (horas)	145,33	78,00	-	99,00	184,00	152,16
Média (horas)	144,17	92,75	105,00	92,67	174,17	155,00
Resultado (dias)	6,01	3,86	4,38	3,86	7,26	6,46
Resultado - ASTM C1581-16 (dias)	6,00	3,75	4,25*	3,75	7,25	6,50

\* Valor obtido em apenas um ensaio

Fonte: Autora.

Os resultados dos ensaios apresentaram variações, em geral, pequenas para um mesmo tipo de concreto, chegando a 29,5 horas de diferença para o concreto 0,25S, valor dentro desvio citado pela ASTM C1581-16, que são 48 horas (dois dias) para uma mesma amostra.

Os concretos com adição de 0,25% de fibras apresentaram um comportamento inferior quando comparado com o concreto de referência. Destaca-se, portanto, que o teor de fibras utilizado comercialmente (geralmente inferior ao 0,25% utilizado nessa pesquisa) pode não estar sendo adequado, se o objetivo for a redução da fissuração do concreto por retração. Na pesquisa realizada por Magalhães (2016) foi utilizado o concreto empregado para construção de residências em paredes de concreto em Uberlândia e região, conforme o autor, a quantidade de fibras adicionada é 0,3 kg/m<sup>3</sup> (cerca de 0,03% em volume).

Outra característica é a semelhança entre os resultados obtidos para a fibra de polipropileno e as fibras vegetais quando em teor de 0,25%. O concreto com adição de 0,5% de fibras demonstrou melhor desempenho quando comparado concreto sem adição de fibras, com destaque para o concreto 0,5S que apresentou a maior idade de fissuração.

Os concretos foram mantidos até cerca de 20 dias após a moldagem nos anéis, na idade de 19 dias foram realizadas as medições das fissuras com fissurômetro, porém não foi possível estabelecer uma relação da dimensão da fissura com o tipo e teor de fibra, uma vez que as dimensões dessas fissuras eram bastante variáveis tanto quando comparadas aos mesmos tipos de concretos, como em seu próprio comprimento. Demonstrando assim que a abertura de fissuras depende da dispersão da fibra na matriz, uma vez que é dispersa randomicamente é difícil uma padronização do comportamento nesse concreto. Para exemplificar esse fato, na Figura 38 são apresentadas as fissuras encontradas no concreto 0,25S (Figura 38a) e do concreto 0,5S (Figura 38b) no 19º dia após a moldagem. Na Figura 38a é possível observar a diminuição da espessura da fissura ao longo de seu comprimento, chegando a ser quase imperceptível próximo à base do anel, dificultando sua medição.



Figura 38 – a) fissura no concreto 0,25S; b) fissura no concreto 0,5R



Fonte: Autora.

Outros estudos já haviam sido realizados analisando a retração por secagem restringida em concretos com ou sem adição de fibras. De acordo Aly *et al.* (2008) a adição de fibra de polipropileno (teor máximo utilizado na pesquisa de 0,5%) no concreto, provoca um pequeno, porém consistente aumento na deformação total causada pela retração. Os autores justificam esse acréscimo na maior permeabilidade do concreto com fibras, tornando-o mais vulnerável à secagem em relação ao concreto sem fibra.

Senisse (2010) também estudou a influência da adição de fibras de polipropileno em concretos na retração por secagem restringida e concluiu que a adição de 450 g/m<sup>3</sup> (aproximadamente 0,05%) não reduziu a tendência à fissuração para concretos com consumo de 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup> de água, porém essa adição de fibras para concretos com consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> demonstrou-se adequada. Logo a tendência à fissuração em concretos com fibra de polipropileno é dependente do proporcionamento dos materiais que constituem o traço do concreto, sendo que a quantidade de fibras adicionada à mistura não é um valor fixo como tem sido empregado pelas empresas que utilizam concreto com adição desse tipo de fibra (SENISSE, 2010). A mesma autora também avaliou a retração livre para os concretos produzidos e concluiu que a adição de fibras não exerceu influência significativa na retração por secagem livre ao longo do tempo.

#### 4.2.2 Propriedades mecânicas

Conforme descrito anteriormente o ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 7 e aos 28 dias e os ensaios para determinação do módulo de elasticidade e da resistência a tração por

compressão diametral foram realizados somente aos 28 dias. Na Tabela 15 estão os resultados médios das propriedades mecânicas avaliadas.

Tabela 15 – Resultados médios das propriedades mecânicas dos concretos estudados

Propriedades Concreto	Compressão – 7 dias (MPa)	Compressão -28 dias (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tração (MPa)
Ref	31,27	36,22	32,77	3,53
0,25S	31,30	32,81	31,03	3,17
0,25R	30,56	33,94	29,00	3,14
0,25P	30,43	36,89	30,40	3,15
0,5S	28,09	34,11	31,60	3,36
0,5R	26,76	27,27	27,33	2,80

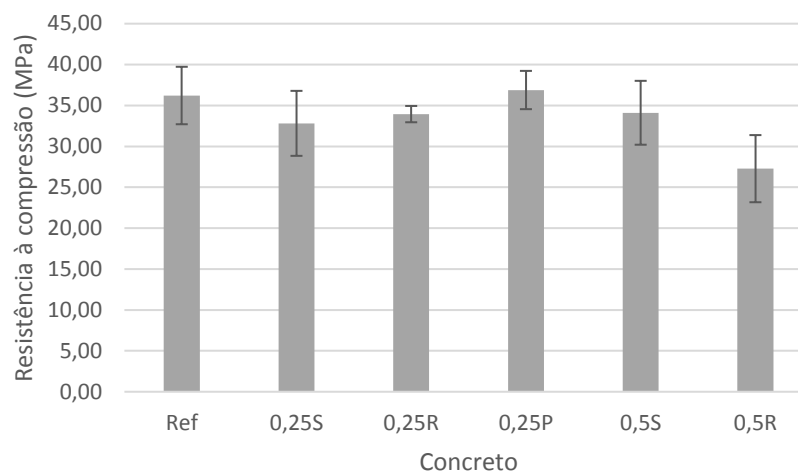
Fonte: Autora.

Como era esperado a diferença entre a resistência à compressão aos 7 e 28 dias foi relativamente pequena devido o tipo de cimento utilizado (CP V ARI). Para facilitar a avaliação e comparação entre os dados obtidos para os tipos e teores de fibras utilizados, os resultados serão divididos em gráficos para cada ensaio realizado, sendo que, para todos os tipos de fibra, o resultado do ensaio realizado com o concreto de referência é sempre tomado como valor inicial (0% de fibra).

### **Resistência à compressão uniaxial**

A Figura 39 representa a influência do teor e do tipo de fibra na resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados com seus respectivos desvios padrão, no gráfico são apresentados os valores médios obtidos nesse ensaio.

Figura 39 – Efeito do tipo e teor de fibra na resistência à compressão uniaxial dos concretos aos 28 dias



Fonte: Autora.

Pode-se observar um aumento pouco significativo na resistência do concreto 0,25P, da ordem de 2% em relação ao de referência. O concreto 0,25R apresentou uma queda da ordem de 6% e o 0,25S de 9% em relação à referência.

A diminuição na resistência pode ser verificada principalmente no concreto 0,5R chegando em cerca de 25% de redução da resistência em relação ao concreto de referência. Esse valor pode ser explicado pelo valor baixo de abatimento apresentado nesse concreto o que provocou o adensamento ineficiente dos corpos de prova, resultando na formação de “ninhos” de fibra de rami, como pode ser visualizado na Figura 40, com destaque para esses aglomerados. Além da formação dos “ninhos” o mau desempenho desse concreto pode ser explicado pela sua baixa trabalhabilidade resultando em corpos de prova com maior número de defeitos.

Figura 40 – Distribuição da fibra de rami no concreto 0,5R com destaque para os “ninhos”



Fonte: Autora.

Contrariamente ao concreto 0,5R, foi registrado para o concreto 0,5S uma redução de apenas cerca de 6% em relação ao concreto de referência. Essa pequena redução pode ser justificada

pela melhor distribuição da fibra na matriz. Na Figura 41 pode ser visualizada a seção transversal de um corpo de prova do concreto 0,5S, não foi observado a presença de aglomerados de fibras. O aumento da resistência do concreto 0,5S em relação ao concreto 0,25S pode ter ocorrido devido a maior quantidade de fibra atravessando as fissuras, fazendo um efeito de “costura” da mesma, aumentando assim a resistência. Pôde ser analisado também que nenhuma das fibras vegetais aos 28 dias apresentavam sinais visíveis de degradação.

Figura 41 – Seção transversal de um corpo de prova do concreto 0,5S



Fonte: Autora.

Já haviam sido avaliados por Al-Tayyib *et al.* (1988) concretos com adição de 0,2 % de fibras de polipropileno e sem adição, foi constatado que a fibra de polipropileno não provocou aumento na resistência à compressão. Já no trabalho de Dantas e Agopyan (1988) para o teor de 0,25% de polipropileno constataram uma diminuição de 4,41% em relação ao concreto de referência.

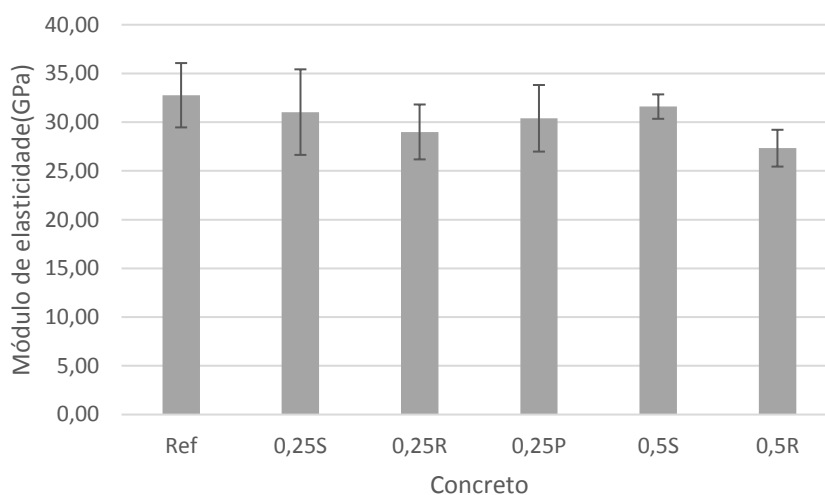
Quando avaliadas as resistências dos concretos com fibras vegetais tem-se, em geral, uma redução na resistência à compressão. Esse comportamento, também foi descrito por Silva e Rodrigues (2007), apud PACHECO-TORGAL, JALALI (2011), ao estudar a resistência à compressão em concreto com adição da fibra de sisal, esse fato pode ser relacionado à maior dificuldade de adensamento e moldagem dos corpos de prova. Grabois (2012) estudou concretos leves auto-adensáveis com adição de 0,5% (em volume) de fibra de sisal com 35 mm de comprimento, nos resultados obtidos no ensaio à compressão foi constatada uma redução na resistência de aproximadamente 5,5% em relação ao concreto de referência. Al-Oraimi e Seibi (1995) estudaram o comportamento mecânico do concreto com adição de fibras naturais com 30 mm de comprimento, nos teores de 0,05%, 0,1% e 0,15% e concluíram que a adição de fibras

naturais provocou a redução da resistência à compressão, sendo que com o teor máximo de fibras a redução em relação ao concreto de referência foi de 21,81%.

### Módulo de elasticidade

Na Figura 42 são apresentados os resultados médios obtidos com o ensaio de módulo de elasticidade, juntamente com os respectivos desvios padrão.

Figura 42 – Efeito do tipo e teor de fibra no módulo de elasticidade dos concretos estudados



Fonte: Autora.

O módulo de elasticidade é definido como a razão entre a tensão e deformação reversível (deformação elástica), quanto menor o módulo de elasticidade, menor será a quantidade de tensão de tração elástica induzida para uma determinada magnitude da retração (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A adição de fibras, em geral, provocou uma redução no módulo de elasticidade, sendo que, mais uma vez destacou-se concreto 0,5R com redução de cerca de 17% quando comparado ao concreto de referência, provavelmente devido às dificuldades na produção e moldagem. Por outro lado, o concreto 0,5S apresentou um decréscimo da ordem de 3%. O concreto 0,25S e o 0,25P apresentaram pequenas reduções, cerca de 5% e 7% respectivamente, já para o concreto 0,25R foi de aproximadamente 11%.

Dantas e Agopyan (1988) encontraram um valor de módulo de elasticidade para o concreto com 0,25% de polipropileno 18,45% superior quando comparado ao de referência. No trabalho citado anteriormente o desempenho superior pode ser devido a maior relação água/cimento (maior que um), em que a ação das fibras em uma matriz de baixa resistência pode ser mais expressiva. Resende (2003) descreveu uma redução de 9,29% quando adicionado 1% de fibra de polipropileno no concreto de referência e adicionando o mesmo teor de fibra sisal, a redução

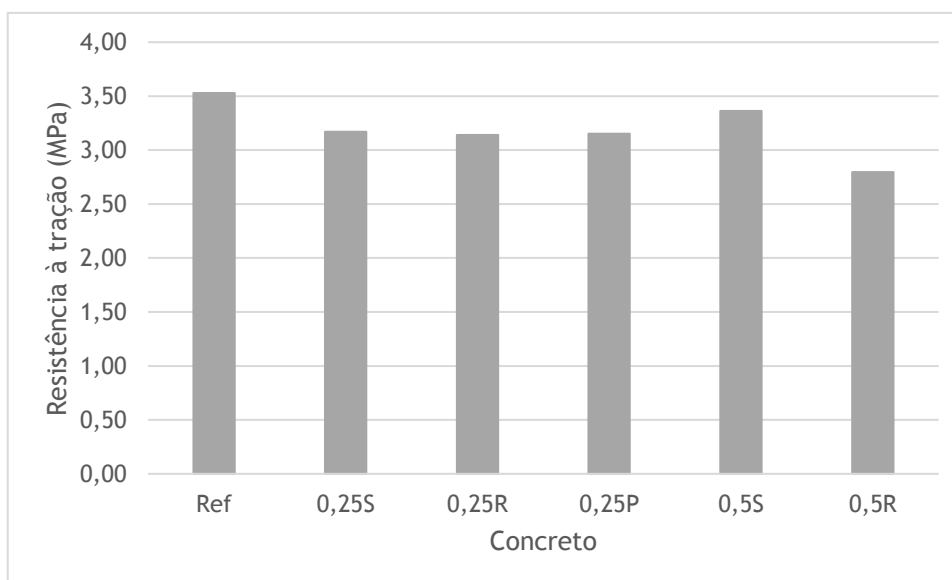
foi de 5,36%. Os concretos com fibras que possuem maior resistência à tração, apresentaram maior módulo de elasticidade e vice-versa. No trabalho de Picanço (2005), pode ser observado o mesmo comportamento para argamassas com 2% de fibras de sisal, curauá e juta de 25 mm de comprimento. Ainda de acordo com o mesmo autor, apesar de apresentar uma redução da resistência à compressão, o acréscimo do teor de fibra, é vantajoso pois se tem o ganho em termos de ductilidade e capacidade de resistência após a fissuração da matriz, quando comparado à matriz sem reforço.

Analizando a Tabela 15 e excluindo os resultados obtidos com o concreto de referência não é possível estabelecer uma relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade, isso deve-se provavelmente às particularidades de cada uma das fibras empregadas e à variabilidade inerente do próprio concreto.

### **Resistência à tração por compressão diametral**

Em relação aos resultados médios de resistência por compressão diametral, na Figura 43 pode ser visualizado o efeito de cada tipo e teor de fibra.

Figura 43 – Efeito do tipo e teor de fibra na resistência à tração dos concretos



Fonte: Autora.

À semelhança do desempenho sob compressão, a adição das fibras vegetais provocou uma redução na resistência à tração do concreto, inclusive no concreto 0,25P. A resistência para os concretos com 0,25% de fibra não apresentou grande diferença quanto ao tipo de fibra utilizado. O melhor desempenho foi apresentado pelo concreto 0,5S com redução de cerca de 5% em

relação ao de referência, enquanto o pior desempenho foi apresentado pelo concreto 0,5R, provavelmente pelos motivos descritos anteriormente, com decréscimo de aproximadamente 21% quando comparado ao concreto sem fibra.

Resende (2003) analisou a resistência à tração na flexão em concretos com adição de 1,0% de fibras de polipropileno com 30 mm de comprimento. De acordo com o autor essa adição não modificou a resistência à tração em relação à matriz (concreto sem fibra) na fissuração, entretanto permitiu que na etapa pós fissuração a matriz continuasse a resistir aos mesmos níveis de tensão para valores de flecha significativos. Ainda de acordo com o mesmo autor ao estudar a resistência a tração na flexão de prismas com adição de 1% de fibra de sisal com 30 mm de comprimento foi constatado uma redução no valor em relação ao concreto de referência, uma das justificativas para essa redução é a menor trabalhabilidade do concreto com adição de fibra de sisal. No trabalho de Dantas e Agopyan (1988) para o teor de 0,25% de polipropileno foi constatado o mesmo valor de resistência a tração na flexão. Na ruptura dos concretos, foi observada maior deformação dos concretos com adição de fibras em relação ao concreto de referência.

#### 4.2.3 Propriedades físicas

##### Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica

Conforme descrito anteriormente foram avaliadas a absorção por imersão, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade. Os ensaios para a determinação da massa específica, absorção por imersão e índice de vazios foram realizados aos 28 dias. Os resultados obtidos são descritos na Tabela 16.

Tabela 16 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos utilizados			
Propriedades Concretos	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Ref	7,22	16,03	2,22
0,25S	7,94	17,61	2,22
0,25R	10,24	21,89	2,14
0,25P	6,46	14,26	2,21
0,5S	9,14	20,05	2,19
0,5R	9,85	21,28	2,16

Fonte: Autora.

Previamente à discussão dos resultados serão apresentadas algumas definições de acordo com a ABNT NBR 9778:2005. A Absorção de água por imersão é o meio pelo qual a água é

conduzida e tende a preencher os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Além disso, é também definido como o aumento de massa de um corpo sólido poroso resultante da penetração de água em seus poros permeáveis, tendo como referência sua massa em estado seco. Índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. A massa específica contida na tabela é a massa específica seca em estufa, definida como a massa específica do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis.

A absorção, porosidade e massa específica são propriedades inter-relacionadas, Savastano Jr. (2000) ao estudar compósitos cimentícios com adição de resíduos fibrosos provenientes da agroindústria sisaleira, concluiu que quanto maior o teor de fibra, menor é a massa específica e maior a absorção de água. Observando a Tabela 16 pode-se notar que a massa específica, em geral, apresentou pequena variação com a adição de fibras, ao contrário da absorção que apresentou variação de mais de 40%.

A tendência ao se adicionar fibra em concretos é o aumento da incorporação de ar durante a mistura, aumentando consequentemente a absorção e o índice de vazios. Nessa pesquisa foi verificado tal comportamento com a adição da fibra de sisal e de rami. Entretanto, a absorção e o índice de vazios no concreto 0,25P apresentou um decréscimo em relação à mistura de referência da ordem de 10%. Esse fato pode ser explicado pelo comportamento hidrofóbico da fibra, contrário ao comportamento da fibra vegetal. Savastano Jr. (1992) descreve que as fibras vegetais apresentam absorção de água superior à 90%, essa alta absorção faz com que um forte fluxo de água seja induzido em direção à fibra. Ainda de acordo com o mesmo autor, esse fluxo de água acarreta em um aumento localizado da relação água/cimento, dando origem à elevada porosidade na zona de transição cuja espessura varia de 50  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . Isso não ocorre para o concreto com polipropileno, de acordo com Savastano (1992) a porosidade na zona de transição para a fibra polipropileno é menor além da fibra quase não apresentar sinais de descolamento, pelo fato de não sofrer variações dimensionais no interior da matriz.

Para os concretos 0,25S e 0,5S o aumento da absorção foi da ordem de 10% e 26%, respectivamente, em relação a absorção do concreto de referência. O aumento da ordem de 42% na absorção para o concreto 0,25R pode ser explicado pela exsudação intensa explicada anteriormente, resultando em um concreto mais poroso principalmente nas proximidades da fibra. Esse fato justifica inclusive a absorção similar do concreto com maior teor de fibra de rami, 0,5R que mesmo sendo um concreto com menor trabalhabilidade, os corpos de prova



apresentaram maior número de defeitos, foi observado um aumento da ordem de 36% da absorção.

Velasco (2002) em seu estudo com concretos de alto desempenho constatou que a adição de 0,25% de fibras de polipropileno não ocasionou mudanças significativas na porosidade e na densidade, um decréscimo de cerca de 2,72% e de 1,38% respectivamente. E a adição de 0,25% de fibra de sisal ocasionou acréscimos de 3,63% para a porosidade e 2,34% para a densidade. A divergência nos resultados encontrados deve-se, dentre vários motivos, ao tipo e quantidade de materiais utilizados além da forma de compactação dos corpos de prova. No trabalho de Velasco (2002) foram utilizados vibradores externos (mesa vibratória) e vibradores internos (vibradores elétricos) além do adensamento de ter sido realizado em três camadas.

### **Absorção por capilaridade**

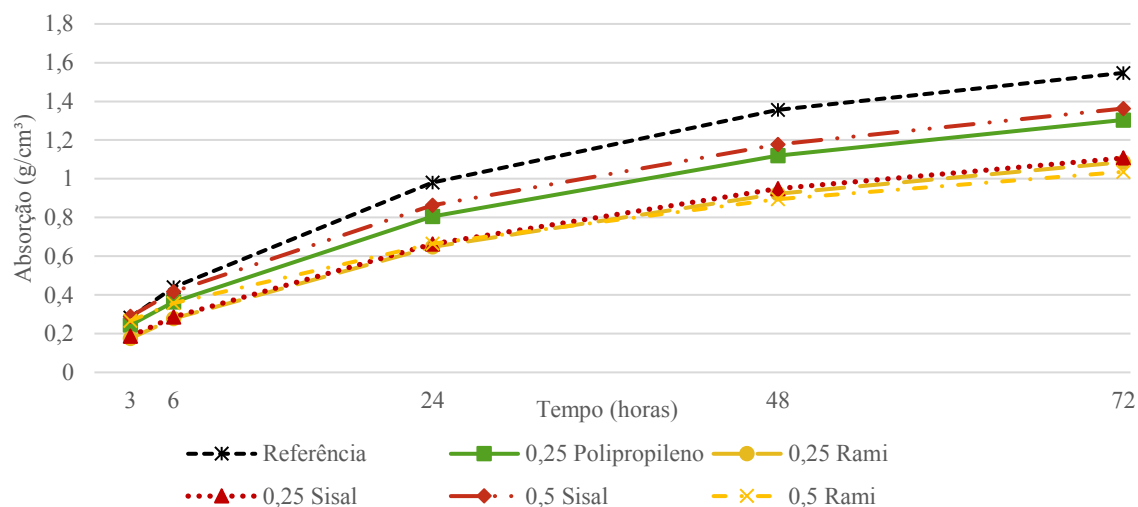
O ensaio para avaliação da absorção por capilaridade foi realizado aos 70 dias, os valores de absorção de água por capilaridade (C) obtidos após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de imersão parcial encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Absorção de água por capilaridade nos concretos estudados					
Absorção Concretos	C 3h (g/cm <sup>2</sup> )	C 6h (g/cm <sup>2</sup> )	C 24h (g/cm <sup>2</sup> )	C 48h (g/cm <sup>2</sup> )	C 72h (g/cm <sup>2</sup> )
Ref	0,28	0,44	0,98	1,36	1,55
0,25S	0,19	0,29	0,66	0,95	1,11
0,25R	0,17	0,28	0,65	0,92	1,09
0,25P	0,24	0,36	0,81	1,12	1,30
0,5S	0,29	0,42	0,86	1,18	1,36
0,5R	0,27	0,36	0,66	0,90	1,04

Fonte: Autora.

Na Figura 44 apresenta-se o gráfico relacionado a absorção de água por capilaridade para cada teor e tipo de fibra pelo tempo, a fim de facilitar a visualização do comportamento de cada um dos concretos estudados.

Figura 44 – Absorção de água por capilaridade nos concretos estudados

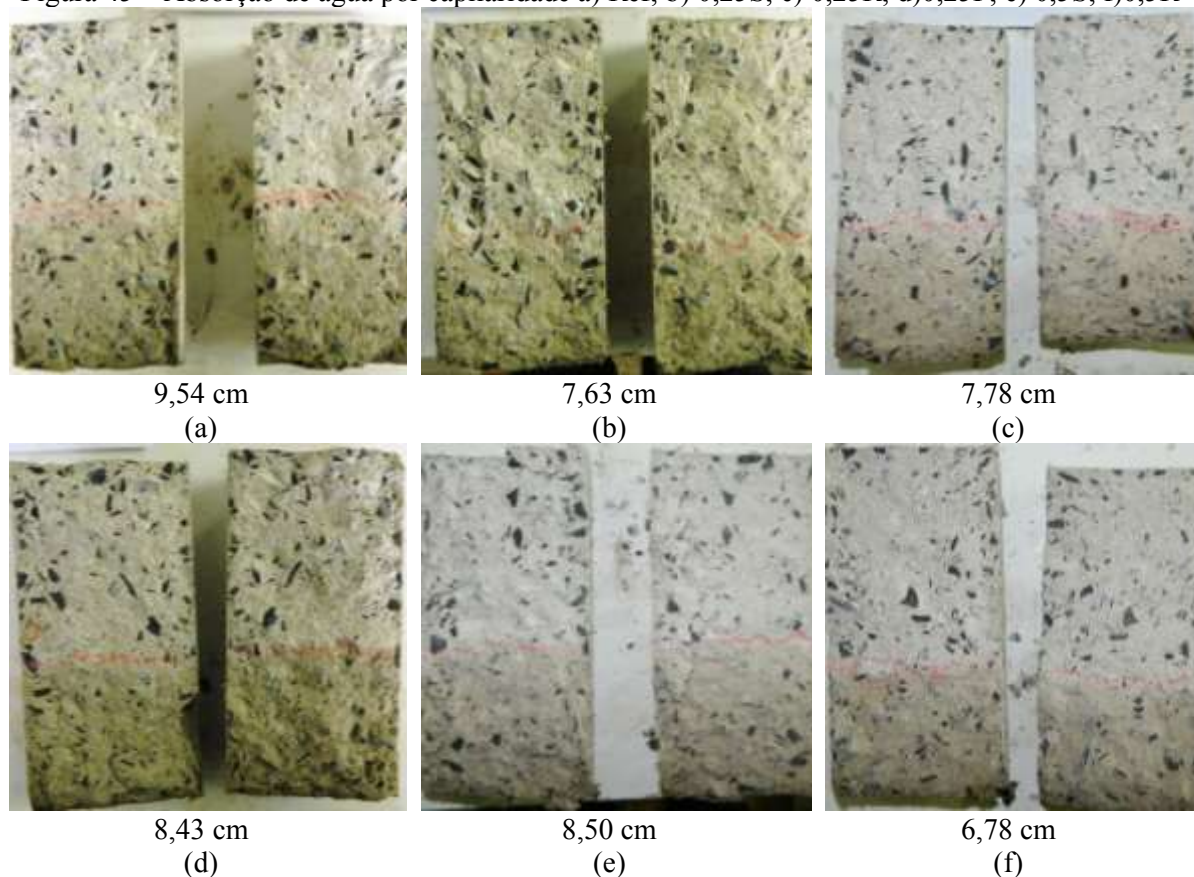


Fonte: Autora.

Contrário do que foi constatado no ensaio de absorção por imersão, o concreto com maior absorção de água por capilaridade foi o concreto de referência e um dos concretos com menor absorção de água por capilaridade foi o 0,25R. Observa-se de acordo com a Figura 44 uma tendência das fibras, principalmente em teores menores, provocarem uma diminuição da absorção capilar. Avaliando a absorção 72 horas após a imersão parcial em água o concreto 0,25S apresentou uma redução de 28,39% e o concreto 0,25R apresentou uma diminuição de 28,68%, ambos em relação ao concreto de referência. Já o 0,25P uma redução de 16,13%. O concreto 0,5S apresentou uma redução de 12,26% e o concreto 0,5R de 32,90% em relação ao concreto de referência.

Após a última pesagem os corpos de prova foram rompidos para a realização a medição da altura da ascensão capilar interna. Na Figura 45 estão apresentadas as seções dos corpos de prova rompidos, assim como a medida de sua respectiva ascensão capilar, foram feitos traços vermelhos nos corpos de prova para facilitar a visualização da transição da parte úmida para a parte seca do concreto.

Figura 45 – Absorção de água por capilaridade a) Ref; b) 0,25S; c) 0,25R; d) 0,25P; e) 0,5S; f) 0,5R



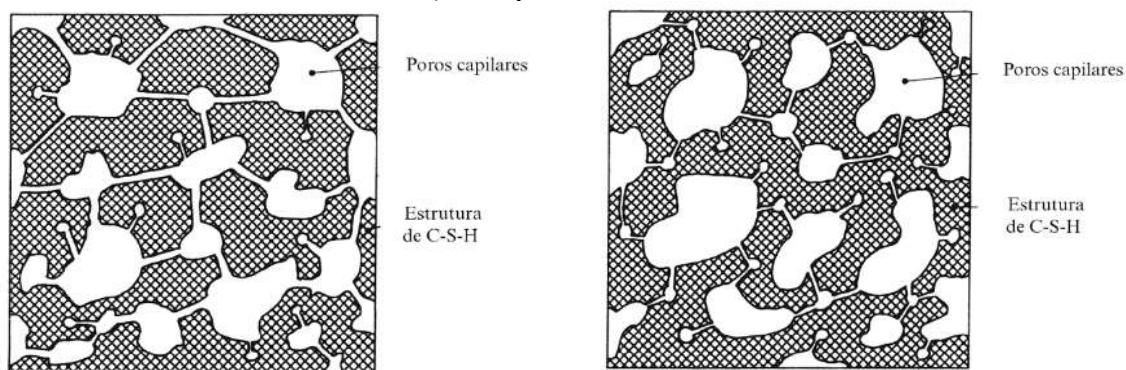
Fonte: Autora.

Comprovando os dados obtidos na Figura 44, o concreto de referência que apresentou maior altura de ascensão capilar, assim como o concreto 0,5R apresentou a menor. Os concretos 0,25R e 0,25S apresentaram a absorção por capilaridade próxima assim como a altura da ascensão capilar.

De acordo com Helene (1993) a absorção capilar é o meio mais comum e intenso de penetração de agentes agressivos no concreto. Ainda de acordo com o mesmo autor a absorção capilar é um dos fatores mais difíceis de serem controlados pelo fato de o concreto ser um material hidrófilo (possui grande afinidade com água). Quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior serão as pressões capilares desenvolvidas e consequentemente maior a profundidade de concreto atingida pela água absorvida (HELENE, 1993). Em contrapartida quanto maior o diâmetro desses poros capilares menor a profundidade, porém maior a quantidade de água absorvida, contudo, um item de maior importância que o diâmetro desses capilares é a interconectividade entre eles (HELENE, 1993). De acordo com Neville e Brooks (2013) a permeabilidade não é simplesmente função da porosidade, é possível que dois corpos de prova porosos possuam porosidades semelhantes, porém permeabilidades diferentes, ou seja, somente a presença de uma abertura conectando os poros capilares resulta em uma grande capilaridade,

enquanto que a porosidade continua a mesma. Na Figura 46a tem-se um material que apresenta alta permeabilidade com poros capilares interconectados e na Figura 46b tem-se um material com a mesma porosidade do anterior porém com poros capilares apenas parcialmente conectados.

Figura 46 – Representação esquemática de materiais com porosidade similar a) alta permeabilidade; b) baixa permeabilidade



Fonte: Neville e Brooks (2013).

A presença das fibras aumentou a porosidade e a absorção total dos compósitos, mas pode também ter reduzido a interconexão entre esses poros, inclusive por redução das microfissuras na matriz, reduzindo-se assim a absorção por capilaridade. Além da redução da interconexão a presença das fibras também pode ter contribuído para o aumento do diâmetro dos poros capilares, o que reduz a absorção por capilaridade.

# CAPÍTULO 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram estudadas as propriedades do concreto com adição de fibras vegetais (rami e sisal) e sintéticas (polipropileno). O intuito foi realizar uma comparação entre as propriedades do concreto com esses dois tipos de fibras para uma possível substituição da fibra de polipropileno pela fibra vegetal em paredes estruturais.

É importante destacar que os resultados demonstrados aqui apresentam apenas uma tendência das propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição de fibras, principalmente em relação às fibras vegetais, que apresentam grandes variações em suas propriedades. Para um estudo mais detalhado faz-se necessário um maior número de repetições além da realização de outros ensaios a fim de complementar os resultados obtidos.

A utilização do ensaio do anel demonstrou que o concreto de referência apresentou um dos melhores resultados, sendo inferior apenas para os concretos com 0,5% de fibras. Entretanto para altos teores de fibras (0,5% neste caso) se tem uma dificuldade na determinação da idade da ocorrência da fissuração, devido ao efeito “costura” gerado pelas fibras que atravessam as fissuras.

Ainda em relação aos resultados obtidos na retração restringida, devem ser realizados mais ensaios a fim de se comprovar que a adição de teores menores que 0,25% fibras implicam na redução da resistência à fissuração do concreto, uma vez que muitas empresas adicionam no concreto teores de fibras inferiores com o intuito de reduzir a retração.

Em geral, os concretos com adição de fibras estudados, apresentaram propriedades mecânicas inferiores ao concreto utilizado como referência, porém não apresentaram grandes variações. A exceção do concreto 0,5R que conforme explicado anteriormente devido à baixa trabalhabilidade e a dispersão deficiente das fibras, apresentou resultados menores aos apresentados por todos os outros concretos estudados.

A absorção por imersão e índice de vazios, apresentaram aumentos com a adição de fibras vegetais, principalmente o concreto 0,25R que apresentou absorção superior a 40% em relação ao concreto de referência. O melhor desempenho nessas propriedades foi obtido com o concreto 0,25P que apresentou uma redução em relação ao concreto de referência, provavelmente devido comportamento hidrofóbico da fibra.

Em relação ao desempenho de cada concreto no ensaio de absorção por capilaridade uma explicação plausível seria a tendência das fibras, principalmente em maiores teores, de reduzir a fissuração e intercomunicação entre os poros presentes no concreto e também aumentar o diâmetro desses poros, reduzindo assim a altura de ascensão capilar. Porém, seria necessário o estudo mais detalhado desses concretos com micrografias e/ou outros ensaios para determinação mais precisa da porosidade.

Assim, apesar de ser necessário a realização de um estudo mais detalhado, pelas proximidades dos resultados obtidos com a adição da fibra vegetal e de polipropileno, principalmente quando comparada com a fibra de sisal, os resultados sugerem que é possível a substituição dessa fibra sintética e o emprego das fibras vegetais. Porém primeiramente deve-se comprovar a eficiência da adição de ambos os tipos de fibras principalmente em relação à diminuição da retração, que tem se mostrado a propriedade mais visada com a adição de polipropileno.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Uma vez que o estudo do concreto já apresenta complexidades devido à grande variabilidade de suas propriedades de acordo com a forma de mistura, materiais utilizados, moldagem dos corpos de prova entre outros, a adição de fibras torna a caracterização do comportamento de concreto ainda mais complicada, sendo necessário, portanto, um estudo mais detalhado para a comprovação dos seus efeitos quando adicionadas às misturas. Para isso sugerem-se como pesquisas futuras:

- estudos relativos a avaliação microestrutural do concreto com adição de fibras, avaliando, dentre outros o efeito da capilaridade;
- possíveis ações para melhorar a distribuição da fibra na matriz, principalmente em relação à fibra de rami;
- adição de outras fibras vegetais que já foram estudadas em compósitos cimentícios como por exemplo a fibra de coco.

# REFERÊNCIAS

ABIKO, A. K.; ORNSTEIN, S. W. Inserção Urbana e Avaliação Pós - Ocupação (APO) da Habitação de Interesse Social. Coletânea Habitare. São Paulo: FAUUSP, vol. 1 2002.

AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1991.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr. H. Compósitos cimentícios reforçados com fibra vegetais e suas aplicações. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas - SP: Editora da Unicamp, 2010. p. 121-144.

AKERS, S. A. S.; PARTL, M. Hygral and thermal expansion/shrinkage properties of asbestos-free fibre cement. Cement and Concrete Composites, v. 12, n. 1, p. 19-27, 1990.

AL-ORAIMI, S. K.; SEIBI, A. C. Mechanical characterisation and impact behaviour of concrete reinforced with natural fibres. Composite Structures, v. 32, p. 165-171, 1995.

AL-TAYYIB, A. J.; AL-ZAHRANI, M. M.; RASHEEDUZZAFAR; AL-SULAIMANI, G. J. Effect of polypropylene fiber reinforcement on the properties of fresh and hardened concrete in the Arabian Gulf Environment. Cement and Concrete Research, v. 18, p. 561-570, 1988.

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, 2008.

AITCIN. P. -C. Concreto de alto desempenho. Tradução de Geraldo G. Serra. 1ª edição, São Paulo, PINI, 2000.

AITCIN, P. -C.; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. Integrated view of shrinkage deformation. Concrete International, p.35-41, setembro, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1581 / C1581M-16, Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

\_\_\_\_\_. ASTM C157/C157M – 08 (Reapproved 2014), Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-cement Mortar and Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 16055: Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações - Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

BASF. Ficha técnica de produto. Glenium 3400NV Aditivo hiperplastificante. São Paulo, [s.d.].

BASTOS, P. K. X. Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BAYASI, Z.; MCINTYRE, M. Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete. *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 4, p. 337-344, 2002.

BENATTI Jr., Romeu. Rami: Planta Têxtil e Forrageira. 1ª edição. São Paulo: Nobel, 1988.

BENTUR A.; MINDESS S. Fibre reinforced cementitious composites. 2ª edição. Grã-Bretanha: Taylor & Francis, 2007.

BERKE, N. S.; DALLAIRE, M. P. Effect of low addition rates of polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete. *Special Publication*, v. 142, p. 37-66, 1994.

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 and Concrete Composites*. v.30, p 929-937, 2008.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL – CEF. Minha Casa Minha Vida permitiu 1,2 milhão de novos empregos em cinco anos. 2014. Disponível em: <<http://www20.caixa.gov.br/Paginas/Noticias/Noticia/Default.aspx?newsID=1585>>. Acesso em: 28 de outubro 2015.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL – CEF. Números – Acompanhe o maior programa habitacional brasileiro. 2015. Disponível em: < <http://mcmv.caixa.gov.br/numeros/>> Acesso em: 01 de fevereiro 2016.



CALDAS e SILVA, A.; JOHN, W. M. Compósitos reforçados com fibras de celulose (CRFC): aspectos relativos à durabilidade. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CALLISTER Jr., W.D.; RETHWISCH, D.G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares, revisão técnica de José Roberto Moraes d'Almeida(CALLISTER JR., 2013), 8ª edição, Rio de Janeiro, LTC, 2013

CAMPOS, L. C. de. Análise da durabilidade do concreto com ar incorporado para uso em paredes estruturais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

CHARITON T.; KIM B.; WEISS J. Using passive acoustic energy to quantify cracking in volumetrically restrained cementitious systems. American Society of Civil Engineers - Engineering Mechanics Division, 15th ASCE EMD Conference, New York, 2002.

COLETÂNEA de ativos – Paredes de concreto 2007 - 2008. [S.I.]: Comunidade da Construção, 2008.

COLETÂNEA de ativos – Paredes de concreto 2011 - 2013. [S.I.]: Comunidade da Construção, 2013.

Comunidade da Construção. Paredes de concreto: Controle – Concreto. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.comunidadeconstrucao.com.br/sistemas-construtivos/2/controle/qualidade/27/controle.html>> Acesso em: 01 de novembro 2015.

CORSINI, R. Paredes normatizadas: Norma inédita para paredes de concreto moldadas in loco entra em vigor e promete impulsionar uso da tecnologia em edificações. Técnica, Edição 183, São Paulo, dezembro, 2011.

COUTTS, R. S. P. “Sticks and stones...!!” Forest products newsletter, CSIRO division of chemical and wood technology, v. 2, n.1, 1986.

CINTRA, A. M. Estudo do desempenho térmico de concreto com ar incorporado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

DANTAS; F. A. S.; AGOPYAN; V. Análise da fissuração devida à retração. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

DIAS, J. F. Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. Tese (Doutorado em engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. J. A New Model for Hydrated Portland Cement and its Practical Implications. Engineering Journal, Ottawa, 1970.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FJP - Fundação João Pinheiro. Nota Técnica Déficit Habitacional no Brasil Anos 2011 e 2012. Centro de Estatística e Informações – CEI, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/deficit-habitacional/360-nota-tecnica-deficit-habitacional-no-brasil-anos-2011-e-2012/file>> Acesso em: 11 de setembro 2015.

FOLLIARD, K. J.; SIMPSON, B. T. Low-volume polymeric fiber-reinforced concrete. In: Banthia N, Bentur A, Mufti A, editors. Fibre reinforced concrete: present and future. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, p. 134-48, 1998.

FREIRE, E. C.; MEDEIROS, J. da C.; ANDRADE, F. P. Cultura do rami no agreste nordestino. Circular técnica nº 22, Embrapa, Setembro, 1996.

GRABOIS, T. M. Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos leves autoadensáveis reforçados com fibras de sisal e aço. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GRAM, H. E. Durability of natural fibres in concrete. Stockholm, CBI, 1983.

GRAM, H. E. Durability of natural fibres in concrete. In: SWAMY, R. N. Natural fibre reinforced cement and concrete. Blackie Academic & Professional, 1988.

HELENE, P. R. do L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOSSAIN, A. PEASE, B. WEISS, J. Quantifying early-age stress development and cracking in low w/c concrete using the restrained ring test with acoustic emission. Submitted to the Transportation Research Board for possible presentation and publication. TRB Annual Meeting CD-ROM. 2003

IZQUIERDO, I. S. Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE, Technical Committee Report on Autogenous Shrinkage of Concrete, Autogenous Shrinkage of Concrete, Tazawa, E., ed., E & FN Spon, London, pp. 3–62, 1998.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LEITE, J. A. G.; MAROJA, E.; ROSÁRIO, K.; SOUZA, P. S. L.; ORNELA, P. Análise da Influência da Substituição de Agregado Graúdo por Resíduos Cerâmicos de Telha e Tijolo em Concretos Produzidos com Seixo rolado. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, (Anais). IBRACON, Outubro, 2010.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. 1ª edição. São Paulo, Blucher, 2006.

LORDSLEEM Jr., A. C. O processo de produção das paredes maciças. In: Seminário

Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios Vedações Verticais – Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1998.

MACAFERRI. FibroMac 12. Fibras para reforço do concreto. Características técnicas. 2008.

MAGALHÃES, R. M. de. Análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

MEDINA, J. C. Plantas fibrosas da flora mundial. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 1959.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª Edição, São Paulo: IBRACON, 2008.

MISURELLI, H.; MASSUDA, C. Tecnologia: Paredes de concreto. Técnica. Edição 147, São Paulo, Julho, 2009. Disponível em: < <http://technepini.com.br/engenharia-civil/147/artigo285766-1.aspx>> Acesso em: 03 de novembro 2015.

MOKAREM, D. W.; WEYERS, R. E.; LANE, D. S. Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 5, p. 918-925, 2005.

MOTTA, L. A. C. Melhoria do desempenho de fibras de coco e sisal para reforço de matrizes cimentícias através de tratamento termomecânico e impregnação de resinas. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MOTTA, L. A. C.; AGOPYAN, V. Caracterização de fibras curtas empregadas na construção civil. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J., Tecnologia do concreto, 2ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOVAES, W. E o Brasil continua a defender o amianto. Estadão, São Paulo, 10, Mai 2013. Disponível em <<http://opinioao.estadao.com.br/noticias/geral,e-o-brasil-continua-a-defender-o-amianto-imp-1030412>> Acesso em: 07 de fevereiro 2015.

NUNES, N. L. Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. Retração do concreto de cimento Portland. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, C. B.; GUSMÃO, A. B.; ALEGRO, R. C. Crônica da cultura do rami em Urutaí: lembranças de trabalhadores, 1960-1980. Confins, nº 6, 2009. Disponível em: < <http://confins.revues.org/5973?lang=pt#illustrations> >. Acesso em: 18 de agosto 2015.

OLIVEIRA, L. A. de. Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para

emprego em fachadas de edifícios. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 2, p. 575-581, 2011.

PEÑA, M. R. G. Estudo da Fissuração Associada à Retração em Argamassas para Reparo em Estruturas de Concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PICANÇO, M. S. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

PONCIANO, C. A.; VIEIRA, J. G.; MOTTA, L. A. C.; OLIVEIRA, W. J. Estudo do uso da terra diatomácea residual como pozolana para incremento da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de sisal. In: IV Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil (ENARC), São Paulo, agosto, 2015.

RAOUFI K.; WEISS J. The role of fiber reinforcement in mitigating shrinkage cracks in concrete, In: Woodhead Publishing Series in Textiles Fibrous and Composite - Materials for Civil Engineering Applications, editado por R. Figueiro, Woodhead Publishing, 2011.

RESENDE, F. M. Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de alta resistência normal e de alto desempenho. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SACHT, H. M. Painéis de vedação de concreto moldados *in loco*: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SALES, A. T. C. Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SAVASTANO Jr., H. Fibras vegetais para construção civil: a fibra de coco. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.

SAVASTANO Jr., H. Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: Caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SAVASTANO Jr., H. Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

SAVASTANO Jr., H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 21. p. 45-57, 1999.

SAVASTANO Jr., H.; DANTAS, F. A. S.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados cm fibras:

correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas. Publicação IPT 2158 - boletim 67, IPT/Pini, São Paulo, 1994.

SAVASTANO Jr., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Microstructure and mechanical properties of waste fibre-cement composites. *Cement and Concrete Composites*. v. 27. p. 583-592, 2005.

SENISSE, J. A. de 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SENISSE, J. A. de L. Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SHAH, H. R.; WEISS, J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test. *Materials and structures*, v. 39, n. 9, p. 887-899, 2006.

SILVA, F. A. Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA J.; RODRIGUES, D. Compressive strength of low resistance concrete manufactured with sisal fiber. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador, Brasil, 2007

SILVA, L. Z. R. S. A percepção do usuário de habitação unifamiliar em relação ao sistema construtivo industrializado – Avaliação do grau de satisfação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SJÖSTRÖM, C. Service life of the building. In: *Applications of the performance concept in building. Proceedings...* CIB. Tel Aviv, v. 2, p. 6-1; 6-11, 1996.

SOARES, I. M. Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SOROUSHAN, P.; MIRZA, F.; ALHOZAIMY, A. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v. 92, n. 5, p. 553-560, 1995.

SOUSA, L. K. Produção e caracterização mecânica de compósitos de resina poliuretana à base de óleo de mamona e fibras de rami, sisal e bucha vegetal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

STEELE, B. Fibres in cement and concrete. *Composites*. v. 2, n. 2. 1971.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP). Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

TOLEDO FILHO, R. D. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

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

TOLEDO FILHO, R. D.; SANJUAN, M. A. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 1597-1604, 1999.

The sisal rug store. All about sisal.[s.d.] Disponível em <<http://www.sisalrugs.co.uk/page/sisal.cfm>>. Acesso em: 17 de agosto 2015.

VELASCO, R. V. Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.