

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**PLACAS CIMENTÍCIAS  
REFORÇADAS COM TECIDOS ESTRUTURAIS DE SISAL**

**ADILSON BRITO DE ARRUDA FILHO**

Salvador  
2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**PLACAS CIMENTÍCIAS**  
**REFORÇADAS COM TECIDOS ESTRUTURAIS DE SISAL**

**ADILSON BRITO DE ARRUDA FILHO**

Dissertação apresentada ao  
Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana  
como requisito parcial à obtenção do título  
de MESTRE EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL URBANA.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Salvador

2015

---

A778 Arruda Filho, Adilson Brito de.  
Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal/  
Adilson Brito de Arruda Filho. – Salvador, 2015.  
109 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho  
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.  
Escola Politécnica, 2015.

1. Sisal (fibra). 2. Compósitos. 3. Cimento – placas  
(engenharia). I. Carvalho, Ricardo Fernandes. II. Lima, Paulo  
Roberto Lopes. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 620.135

---

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Adilson e Célia, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todos os momentos de minha vida.

ADILSON BRITO DE ARRUDA FILHO

PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM TECIDOS  
ESTRUTURAIS DE SISAL.

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Salvador, 20 de novembro de 2015

Banca Examinadora:

Profº. Drº Ricardo Fernandes Carvalho   
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Profº Drº Paulo Roberto Lopes Lima   
Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

Profº Drº Cléber Marcos Ribeiro Dias   
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Profº Drº Romildo Dias Toledo Filho   
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

## AGRADECIMENTOS

A Deus e Jesus, que sempre iluminaram meus caminhos, permitindo que superasse todos os obstáculos e conseguisse realizar este trabalho.

Aos professores Dr. Ricardo Fernandes Carvalho e Dr. Paulo Roberto Lopes Lima, meus orientadores, por toda atenção, dedicação e compreensão, principalmente pelo apoio e orientação nos momentos difíceis, sem os quais não teria conseguido realizar este trabalho.

Aos professores do MEAU, em especial ao professor Dr. Daniel Vêras Ribeiro, pela confiança e apoio em diversos momentos.

A Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira (APAEB) pelo fornecimento das fibras e tecidos de sisal.

Ao Núcleo de Pesquisa e Extensão em Habitação Popular – Thaba, da Universidade do Estado da Bahia – UNEB, em especial aos coordenadores engenheiro Rubens Barros e arquiteta Lícia Andrade, e também ao engenheiro Eduardo Costa, que sempre me incentivaram a progredir nos estudos, e proporcionaram as condições necessárias para que eu iniciasse esta jornada.

Ao laboratório de construção e estruturas S. P. Timoshenko, em especial à Maia pela ajuda e colaboração na realização de diversos ensaios.

Aos colegas Alessandra, Aydil, Bruno, Carmen, Catharine, Daniel, Elenice, Francisco Gabriel, João, Luciano, Moisés, Silas e Vanessa da UFBA, além de Alex, Mirna, Rafael e Brendhy da UEFS, que estiveram presentes ajudando e colaborando nas diversas fases desta pesquisa.

Aos amigos e familiares que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo principal desenvolver placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal. Dentre outras fibras naturais, o sisal foi escolhido, pois apresenta melhores características para o emprego na indústria da construção civil, e também pelo sistema produtivo existente, desde o cultivo ao beneficiamento, possibilitando assim o uso industrial de sua fibra. No ano de 2014 a produção brasileira foi de 95,4 mil toneladas, com a Bahia produzindo aproximadamente 95% deste total. Já existem estudos com a utilização de fibras curtas, de mechas alinhadas de fibras longas, na produção de compósitos cimentícios com bons resultados mecânicos. Neste intuito buscamos introduzir a utilização de tecidos estruturais de sisal na conformação dos compósitos com matrizes cimentícias, pois com a inserção dos tecidos conseguimos um melhor alinhamento e direcionamento das fibras, desta forma elevamos o desempenho mecânico dos compósitos na direção e sentido dos esforços solicitantes. Foram produzidas placas com distintos tipos de tecidos, diversas camadas de reforço, e diferentes tipos de disposição dos tecidos. Com os resultados dos ensaios de tração e flexão realizados nos compósitos verificou-se o aumento da tenacidade e o ganho de resistência pós-fissuração, igual ou superior ao encontrado na literatura com o uso de fibras curtas e mechas de fibras longas de sisal. Obteve-se também menor espessura e menor espaçamento entre as fissuras, com mais uniformidade no padrão das mesmas. Verificou-se também que tanto a quantidade de camadas de reforço, bem como a sua disposição na conformação das placas, tem influência direta no desempenho mecânico dos compósitos. Assim as placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal, mostram potencial para serem utilizadas como elementos estruturais, semiestruturais ou de vedação.

Palavras-Chave: Compósitos; Matriz Cimentícia; Tecidos; Fibra de Sisal.

CEMENT PLATES  
REINFORCED WITH STRUCTURAL SISAL TEXTILES MATERIAL.

**ABSTRACT**

This research has as a main objective the development of cement plates reinforced with structural sisal textiles material. Among other natural fibers, the sisal one was chosen because it offers the best features for employment in the civil construction industry, and also because of its existing production system, from cultivation to processing, thus allowing the industrial use of their fiber. In 2014 the Brazilian production was approximately 95 thousand tons, with the state of Bahia producing approximately 95% of this total. There already are studies for the using of short fibers and long fibers of aligned strands, in the production of cement composites, which has returned agreeable mechanical results. To this very end, we seek to introduce the use of structural sisal textiles in the modeling of composites cimentitious matrixes, because the insertion of it got a better alignment and direction of the fibers, increasing this way the mechanical performance of composites in the direction and way of internal forces. The plates were produced with different types of textiles, several reinforcing layers, and different types of textiles disposals. The results for tensile tests performed on the composite and flexural strength show us an increasing of tenacity and the post-cracking resistance gain is equal or higher than that one found in the literature, using short fibers and long strands of fibers of sisal. It was also found a smaller thickness and a smaller spacing between the cracks with more uniformity in the pattern thereof. We also found that both the amount of reinforcement layers and the arrangement of the plates' modeling have a direct influence on the mechanical performance of composites. Thus, the cement plates reinforced with structural sisal textiles show us a really potential for being used as structural, semi-structural or as seal element.

Keywords: Composites; Cimentitious matrixes; Textiles; Sisal fiber.

## SUMÁRIO

	Pág.
<b>BANCA EXAMINADORA.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>viii</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos.....	4
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 Compósitos reforçados com tecidos .....	7
2.2 Tecidos de sisal .....	8
2.2.1 <i>Tratamento das fibras de sisal</i> .....	12
2.3 Matrizes cimentícias .....	13
2.4 Deterioração de fibras vegetais em ambiente alcalino .....	14
2.5 Controle de pH em matrizes cimentícias .....	15
2.6 Moldagem de compósitos cimentícios .....	16
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>18</b>
3.1 Esquema sintético da metodologia .....	19
3.2 Materiais.....	20
3.2.1 <i>Reforço</i> .....	20
3.2.2 <i>Comportamento mecânico das fibras, dos feixes e dos tecidos</i> ....	21
3.2.3 <i>Matriz</i> .....	27
3.3 Método.....	32
3.3.1 <i>Moldagem das placas cimentícias reforçadas com o tecido estruturais de sisal</i> .....	33
3.4 Avaliação do comportamento mecânico dos compósitos:.....	38

3.4.1	<i>Ensaio de tração direta nos compósitos</i> .....	38
3.4.2	<i>Ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos</i> .....	39
3.5	Estudo preliminar .....	41
3.6	Definição do reforço: Tipo de tecido, quantidade de camadas e disposição das camadas .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
4.1	Ensaio de tração nas fibras .....	48
4.2	Ensaio de tração nos feixes.....	51
4.3	Ensaio de tração nos tecidos.....	53
4.4	Ensaio de tração direta nos compósitos .....	56
4.5	Ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos .....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>87</b>

**ÍNDICE DE TABELAS**

	Pág.
Tabela 1. Caracterização do cimento.....	27
Tabela 2. Características da sílica ativa.....	28
Tabela 3. Caracterização da cinza volante .....	28
Tabela 4. Absorção por imersão. ....	31
Tabela 5. Resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, à flexão corpos de prova prismáticos, compressão de corpos de prova prismáticos. ....	32
Tabela 6. Tipo de tecido e quantidade de camadas nas placas preliminares. ...	41
Tabela 7. Comportamento das placas quando submetidas à flexão. ....	45
Tabela 8. Tipo de tecido e quantidade de camadas nos compósitos. ....	47
Tabela 9. Ensaio de tração nas fibras. Área calculada através da massa. ....	49
Tabela 10. Ensaio de tração nas fibras. Diâmetro medido no microscópio.....	50
Tabela 11. Resultados do ensaio de tração nos feixes de sisal. ....	52
Tabela 12. Resultados do ensaio de tração nos tecidos de sisal. ....	53
Tabela 13. Resultados do ensaio de tração direta nos compósitos.....	60
Tabela 14. Número e espaçamentos das fissuras no ensaio de tração. ....	62
Tabela 15. Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos. ....	70
Tabela 16. Número de fissuras e espaçamento médio. Ensaio de flexão.....	75
Tabela 17. Índices de Tenacidade. ....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Arranjos de tecidos urdidos, JOHN e THOMAS (2008).....	10
Figura 2. Tipos de arranjos de tecidos urdidos, JOHN e THOMAS (2008). .....	11
Figura 3. Organograma do desenvolvimento da pesquisa.....	19
Figura 4. Tecido com espaçamento de 15 mm no urdume. Fio 700.....	20
Figura 5. Tecido com espaçamento de 5 mm nas duas direções. Fio 700 .....	20
Figura 6. Tecido com espaçamento de 5 mm no urdume e 1 mm na trama. Feixe de fibras. ....	21
Figura 7. Máquina de ensaio universal – Shimadzu.....	22
Figura 8. Determinação diâmetro da fibra através de microscópio.....	23
Figura 9. Esquema do corpo de prova com fibra de sisal, Caldas (2014).....	23
Figura 10. Esquema do corpo de prova com feixe de fibra de sisal, Caldas (2014).....	24
Figura 11. Corpo de prova com feixe de fibra de sisal. ....	24
Figura 12. Tecidos de sisal cortados para serem levados à estufa .....	25
Figura 13. Corpo de prova com tecido de sisal, Caldas (2014). ....	26
Figura 14. Corpo de prova com tecido de sisal. ....	26
Figura 15. Ensaio de tração no tecido de sisal. ....	27
Figura 16. Granulometria da cinza volante, Roque (2015).....	29
Figura 17. Mini slump, Roque (2015). ....	30
Figura 18. Consistência da matriz cimentícia, Roque (2015).....	30
Figura 19. Absorção por capilaridade, Roque (2015).....	31
Figura 20. Forma metálica com desmoldante aplicado. ....	34

Figura 21. Acrescentando lentamente água e areia à argamassa. ....	34
Figura 22. Primeira camada de argamassa com 2 mm de espessura.....	35
Figura 23. Aplicação da primeira camada de tecido – compactação com rolo de náilon.....	35
Figura 24. Aplicação da segunda camada de argamassa – distribuição com uma espátula. ....	36
Figura 25. Placa de acrílico sobre placa recém moldada.....	36
Figura 26. Placa em tanque de cura. ....	37
Figura 27. Arranjo do corte das placas. ....	37
Figura 28. Corte das placas.....	37
Figura 29. Representação do aparato metálico.....	38
Figura 30. Preparação dos corpos de prova.....	38
Figura 31. Esquema do ensaio de tração. ....	39
Figura 32. Ensaio de flexão em 4 pontos.....	40
Figura 33. Placas pintadas de branco.....	40
Figura 34. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa Fx-U5/T1-3C.....	43
Figura 35. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa F-U5/T5-1C.....	44
Figura 36. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa Fx-U5/T1-4C.....	44
Figura 37. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa Fx-U5/T1-5C.....	44

Figura 38. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nas fibras de sisal. Área calculada através da massa. ....	48
Figura 39. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nas fibras de sisal. Diâmetro medido através de microscópio. ....	50
Figura 40. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nos feixes de sisal. ....	51
Figura 41. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nos tecidos de sisal. ....	53
Figura 42. Fases do comportamento do tecido de feixes de sisal submetido à tração. ....	55
Figura 43. Fibras de sisal entrelaçadas com fios de algodão submetidas à tração. ....	56
Figura 44. Detalhe das rupturas e da força de atrito lateral entre as fibras. ....	56
Figura 45. Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração nos compósitos. ....	58
Figura 46. Curvas Típicas de “Tensão x Deformação Específica” do ensaio de tração nos compósitos. Placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C, Fx5C e Fx2C*. ....	59
Figura 47. Fissuras nos corpos-de-prova durante o ensaio de tração, Placas Fx1C, Fx2C e Fx3C. ....	63
Figura 48. Fissuras nos corpos-de-prova durante o ensaio de tração, Placas Fx4C, Fx5C e Fx2C* ....	64
Figura 49. Detalhe da propagação da fissura na placa Fx3C. ....	65
Figura 50. Detalhe da propagação da fissura na placa F. ....	65
Figura 51. Detalhe do descolamento do adesivo epóxi na placa Fx5C. ....	66

Figura 52. Detalhe do deslocamento da matriz na placa Fx4C. ....	66
Figura 53. Curva tensão x deslocamento. Ensaio de flexão nos compósitos. ..	68
Figura 54. Curvas típicas “Tensão x Deslocamento” do ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos. Placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C, Fx5C e Fx2C* . ....	69
Figura 55. Evolução do desempenho na tensão crítica dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos. ....	71
Figura 56. Evolução do desempenho na resistência máxima à flexão dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos. ....	72
Figura 57. Redução do deslocamento na tensão máxima dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos. ....	72
Figura 58. Evolução da rigidez dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos. ....	73
Figura 59. Comparação entre as placas Fx4C e Fx2C* – ensaio de flexão em quatro pontos. ....	74
Figura 60. Fissuras nas placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C, Fx5C e Fx2C* . Ensaio de flexão em quatro pontos. ....	76
Figura 61. Evolução das fissuras nas placas Fx1C, Fx2C e Fx3C. ....	77
Figura 62. Evolução das fissuras nas placas Fx4C, Fx5C e Fx2C* . ....	78
Figura 63. Lateral das placas, com detalhe para as camadas de tecido para reforço. ....	79
Figura 64. Fissuras na parte superior das placas. ....	80
Figura 65. Detalhe da propagação das fissuras na placa Fx4C. ....	81
Figura 66. Detalhe da propagação das fissuras na placa Fx2C* . ....	81

Figura 67. Definição dos pontos para o cálculo dos índices de tenacidade proposto pela ASTM C1018 (1992), Lima (2004).....	82
Figura 68. Comparativo dos Índices de Tenacidade. ....	84

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

APAEB – Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região

Sisaleira

ASTM – American Society for Testing Materials

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

EPS – Poliestireno Expandido

LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear

PP – Polipropileno

PPGECEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

PVA – Poliacetato de Vinila

THABA – Núcleo de Pesquisa e Extensão em Habitação Popular

UEFS – Universidade Estadual de Feira de Santana

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UNEB – Universidade do Estado da Bahia

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea evolui a passos largos e impingem toda uma nova e moderna demanda tecnológica por materiais que tenham propriedades, ou um específico compêndio delas, que não podem ser encontradas em sua íntegra em materiais comuns, como ligas metálicas, cerâmicas ou materiais poliméricos convencionais. Por vezes, se faz necessária a união de dois ou mais materiais que, uma vez associados de forma e metodologia adequadas, poderão nos munir da gama de propriedades que queremos em nosso trabalho. Surgem, neste íterim, os materiais compósitos (CALLISTER, 2000).

Reforço de matrizes cimentícias com fibras naturais tem merecido muito estudo, pois as fibras naturais são um tipo de reforço barato e disponível no formato a ser utilizado, necessitando apenas de um processamento com baixo grau de industrialização (SILVA, 2009).

Os principais motivos de se reforçar matrizes frágeis com fibras naturais são o aumento da resistência à tração, flexão e o aumento da tenacidade, além de prevenir ou retardar o aparecimento de fissuras. A adição de fibras vegetais em matrizes cimentícias para produção de compósitos duráveis é um grande desafio, mas que, se concretizado, pode criar um material de construção ecológico, resistente e durável com grande capacidade de renovação, embasada em recursos naturais renováveis (FERREIRA, 2012).

A retomada dos estudos da utilização de fibras naturais vegetais na Bahia para produção de compósitos ocorreu na década de 1980 no CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento) por meio do grupo de pesquisadores do THABA (então: Programa de Tecnologias de Habitação; hoje Núcleo de Pesquisa e Extensão em Habitação Popular, da Universidade do Estado da Bahia – UNEB) que, após estudo das fibras disponíveis, concentrou seus trabalhos nas fibras de sisal e coco (CERCHIARO, 2010).

De acordo com Lima (2004), os resultados destes estudos resultaram no desenvolvimento de telhas e pias artesanais, porém não possuíam a qualidade necessária para substituir o cimento amianto. A partir da experiência do

THABA/CEPED, vários outros centros iniciaram seus estudos sobre o aproveitamento dos materiais vegetais na construção civil, como bambu (GHAVAMI, 1989), fibras de sisal e coco (TOLEDO FILHO *et al.* 1990), e fibras e resíduos vegetais (AGOPYAN, 1991; SAVASTANO *et al.* 1997).

Dentre as fibras naturais mais utilizadas tais como a fibra de coco, licuri, piaçava, bananeira, curauá, entre outras, a fibra de sisal é a que apresenta melhores características para o emprego na indústria da construção civil, não somente por suas características físicas e mecânicas que se sobressaem diante das outras fibras, mas também pelo sistema produtivo existente desde o cultivo ao beneficiamento, com maior possibilidade de um uso industrial de sua fibra, o que não ocorre com as demais, que possuem apenas produção limitada apenas para confecção de peças de artesanato e não teria como suprir uma produção industrial.

De acordo com a Conab - Companhia Nacional de Abastecimento, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial da fibra de sisal, em 2009 alcançou cerca de 50% da produção mundial. No ano de 2011 a produção brasileira foi de 111 mil toneladas, com a Bahia produzindo 95,8% deste total, a Paraíba (3,5%), o Ceará (0,4%) e o Rio Grande do Norte (0,3%). A produção de sisal em 2014 foi de 95,4 mil toneladas, este volume é 27,9% superior em relação ao ano de 2013 que foi de 74,6 mil toneladas.

A cultura do sisal, do plantio ao beneficiamento, necessita de um grande volume de mão-de-obra, abrangendo mais de 50 municípios no estado da Bahia, na região do semiárido, e mais de uma dezena de municípios nos estados da Paraíba, Ceará e do Rio Grande do Norte.

O uso de fibras de sisal para reforçar componentes para construção civil pode aumentar a demanda pelas fibras e, conseqüentemente, agregará valor às mesmas. Esse aumento do consumo aliado ao valor agregado ao sisal proporcionará ao produtor melhores condições para manter-se na região semiárida, evitando o êxodo rural e a conseqüente desertificação da região (LIMA, 2004).

O comportamento estrutural de placas cimentícias reforçadas com fibras naturais carece ainda de mais estudos, para que possam ser desenvolvidos de

elementos com o desempenho mecânico adequado e possam ser utilizados como elementos de vedação, elementos estruturais ou semiestruturais, tais como, telhas com grandes dimensões (1,00 m, 1,20 m, 1,40 m, etc... de comprimento, com 0,60 m, 0,80 m, etc... de largura) que possam ser assentadas com apoios distantes, formas em substituição aos blocos e ao Poliestireno Expandido – EPS, na confecção de lajes pré-moldadas, painéis e montantes para utilização na construção de paredes e divisórias, rufos, calhas, painéis e estrutura para forro, entre outros.

Já existem estudos com a utilização de fibras curtas, de mechas alinhadas de fibras longas, na produção de compósitos cimentícios com bons resultados mecânicos. Neste intuito buscamos introduzir a utilização de tecidos estruturais de sisal na conformação dos compósitos com matrizes cimentícias, pois com a inserção dos tecidos conseguimos um melhor alinhamento e direcionamento das fibras, desta forma elevamos o desempenho mecânico dos compósitos na direção e sentido dos esforços solicitantes.

Com a utilização dos tecidos pretendemos conseguir um aumento da tenacidade e o ganho de resistência pós-fissuração maior do que se tem atingido com o uso de fibras curtas e mechas de fibras longas. Buscamos também melhorar a múltipla fissuração, com um menor espaçamento entre as fissuras, menor dimensões das fissuras abertas, e mais uniformidade no padrão das fissuras.

Atingir uma durabilidade adequada é fundamental para garantir o sucesso da utilização de fibras vegetais na produção de compósitos na construção civil. O grande entrave destes materiais é a sua fragilização ao longo do tempo, devido ao ataque alcalino do cimento às fibras vegetais, o que reduz, também, a aderência na interface fibra – matriz, diminuindo, portanto, a resistência aos esforços solicitantes.

As principais formas de aumento na durabilidade dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais são a impermeabilização da matriz, o tratamento de proteção superficial da fibra, a redução da alcalinidade e do teor de hidróxido de cálcio livre da matriz. Bons resultados também são conseguidos para a proteção das fibras de sisal nos compósitos a base de

cimento com a utilização de materiais pozolânicos, pois a adição de pozolanas em substituição ao cimento, como a metacaulim, por exemplo, aumenta a resistência à compressão, a resistência química, reduz o teor de hidróxido de cálcio livre, reduz o pH e a concentração de íon hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) na água de poro, além de reduzir a permeabilidade da matriz (LIMA, 2004).

Este trabalho estuda novas formas de uso para as fibras de sisal procurando incorporá-las às matrizes cimentícias no arranjo em tecido, buscando solucionar problemas no processo de moldagem, compatibilização entre o tecido de sisal e argamassa, espaçamento da malha e a quantidade adequada de camadas de tecido para o reforço da placa.

O desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com tecido de sisal além de ter uma grande importância para o desenvolvimento tecnológico, tem também importante papel no desenvolvimento socioeconômico. Por causa do baixo custo de produção e beneficiamento, e da disponibilidade do material, o emprego de compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal poderá reduzir o custo das habitações, tornando-se uma alternativa adequada para utilização em programas de habitação popular (LIMA, 2004). Esta pesquisa também possui grande importância ecológica, uma vez que visa à utilização de materiais naturais e biodegradáveis, como forma de substituição para o amianto, fibras poliméricas, entre outros.

### **1.1 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é desenvolver um compósito sisal-argamassa a partir de tecidos estruturais que, submetido a diversos ensaios físicos e mecânicos, possa mostrar-se satisfatoriamente resistente aos esforços de tração e flexão.

Para isto foi utilizada uma matriz cimentícia que não agredisse as fibras de sisal, matriz esta já desenvolvida ROQUE (2015). Utilizou-se três tipos de tecido de sisal adequados aos processos de moldagem e à argamassa auto adensável, as moldagens ocorreram em formas metálicas. Por fim verificou-se o comportamento mecânico das placas moldadas com a matriz cimentícia e reforçada com tecidos estruturais de sisal.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Materiais compósitos são resultantes da combinação de dois ou mais materiais, com diferentes propriedades físicas e químicas com a finalidade de criar um novo material adequado às diversas situações de uso. Os compósitos reforçados com fibras possuem propriedades que são uma combinação entre as propriedades da matriz e as das fibras de reforço. A interface entre a matriz e a fibra deve ser suficientemente resistente para que haja uma grande transferência de tensões e deformações entre os dois materiais (CARVALHO, 2005).

Um exemplo de material compósito encontrado na natureza é a madeira, que é um compósito fibroso constituído de uma matriz de lignina e pectina reforçada com fibras de celulose. Desde a antiguidade, o ser humano utiliza o conceito de materiais compósitos ao combinar, por exemplo, palha e barro. Novos estudos com materiais modernos e/ou tradicionais permitiram outras possibilidades de desenvolvimento para os materiais compósitos. Como por exemplo, compósitos com matrizes metálicas ou poliméricas reforçados com fibras de vidro, carbono ou de aço. Cada vez mais os compósitos assumem novas aplicações nos mais diversos campos da engenharia, principalmente na indústria naval e de aviação (LIMA, 2004).

Os compósitos com matrizes cimentícias são os mais utilizados na engenharia civil, na forma de concreto com fibras, de argamassa armada (ferrocimento) e de cimento amianto (fibrocimento). Somente uma pequena porcentagem do concreto produzido no mundo é reforçada com fibras. O fibrocimento ainda é produzido principalmente com fibras de asbesto, mesmo existindo diversas outras fibras para reforço. Essas limitações ocorrem, pois os estudos dos fenômenos envolvendo o reforço de matrizes cimentícias com fibras, só se intensificaram nos últimos quarenta anos. Ao adicionar fibras naturais à matriz cimentícia, busca-se reduzir a fissuração, pois as fissuras são interligadas pelas fibras, aumentar a tenacidade e a resistência à tração e ao impacto. O modo como ocorre a modificação das propriedades vai depender do

tipo de matriz, das propriedades das fibras e da interface fibra matriz (LIMA, 2004).

A fibra do sisal possui alta resistência à tração, e quando utilizada como reforço em compósitos com matrizes cimentícias, busca proporcionar um aumento de resistência à flexão, à tração e um aumento da tenacidade, além de ser leve e de possuir um baixo custo de produção.

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem das propriedades das fibras, da matriz e também das interfaces entre fibra e matriz, sendo fatores que influenciam esse comportamento a proporção entre os materiais, a geometria e comportamento das fibras, além do comprimento e arranjo destas. As fibras podem ter uma direção preferencial ou uma distribuição aleatória dependendo se são usados tecidos ou mantas, respectivamente. A resistência e a rigidez do compósito dependem, primeiramente, da quantidade, da disposição e do tipo de reforço. Ao utilizar maior quantidade de reforço com melhor aderência à matriz, espera-se que o compósito obtenha melhor desempenho (CERCHIARO, 2010).

Entre fibras e matrizes a interface é a região na qual estes materiais transferem as tensões e as deformações uns para os outros, possibilitando a contribuição de ambos para a resistência dos compósitos. As interações entre fibras e matriz ocorrem por uma série de fenômenos físicos e químicos entre as superfícies dos materiais (CARVALHO, 2005).

Com a adição de fibras, a fissuração da matriz frágil é reduzida, uma vez que as fissuras são interligadas pelas mesmas e, como resultado, há um aumento na tenacidade e na resistência à tração e ao impacto. A influência da fibra sobre o comportamento a tração vai depender de vários parâmetros, como tipo, comprimento e diâmetro da mesma, bem como o seu teor incorporado e forma de distribuição na matriz. O objetivo principal da introdução das fibras é garantir a manutenção de resistência mesmo após a fissuração da matriz, permitindo uma maior deformação do compósito antes da ruptura, e propiciando maiores resistência ao impacto e tenacidade (LIMA, 2004).

## 2.1 Compósitos reforçados com tecidos

Butler *et al.* (2010) afirmam que o concreto reforçado com fibras têxteis, não tem sua utilização restrita às estruturas novas, mas há sua aplicação também no reforço ou mesmo reparo de estruturas pré-existentes, construídas inicialmente em concreto armado. Eles apresentam dois estudos de caso: um deles refere-se à utilização do compósito em uma cobertura com geometria de concha hiperbólica-parabólica, em que um reforço é conseguido de maneira mais simples, aplicando-se três níveis de camadas de tecido na parte superior da concha, com uma espessura total perto de 15 mm; e um telhado em forma de barril, cujo arranjo fibroso é mais complicado, vez que é necessária a colocação nas partes superior e inferior para a sua adequação estrutural. Verificou-se com estes estudos que aplicação do concreto reforçado com fibras têxteis é simples e pode ser adaptada para formas geométricas complexas.

Peled *et al.* (2006) estudaram os efeitos dos métodos de fabricação nas ligações da interface dos compósitos cimentícios reforçados com tecidos. Para isto utilizaram tecidos tramados de poliacetato de vinila – PVA, tecidos tricotados de polipropileno – PP, e tecidos de fibras de vidro coladas. Os métodos para moldagem foram o de pultrusão, fundição e moldagem a vácuo. Em todos os processos foi colocada uma única camada de tecido entre duas camadas de matriz. Desta forma, verificaram que para cada tipo de tecido deve ser escolhido o método adequado para sua moldagem. Para o tecido tricotado o método mais eficaz foi o de pultrusão, para os tecidos compostos por feixes de fios o processo de pultrusão e o de fundição tem comportamento similares. A moldagem a vácuo proporciona uma matriz mais densa e rígida, melhora a ligação da interface entre a matriz e o tecido, porém impregnação entre os fios é reduzida, desta forma as vantagens são limitadas na utilização deste sistema.

Mumenya *et al.* (2010) analisaram os padrões de fissuração formados em compósitos cimentícios reforçados com fibras têxteis submetidos a ensaios de tração direta. As amostras produzidas possuíam seis camadas de tecido polipropileno como reforço. As amostras foram curadas por 28 dias e depois expostas ao intemperismo por diferentes períodos. Depois foram submetidas ao ensaio de tração direta. Desta forma observou-se que os padrões de

fissuras variaram principalmente com a idade, níveis de esforços e tipo de intemperismo. Observou-se uma tendência de aumento da espessura e do espaçamento entre fissuras devido ao envelhecimento.

Nagahama *et al.* (2015) propuseram um modelo numérico que combinasse o método de elementos finitos, teoria clássica dos laminados e mecânica das fraturas para modelar o comportamento à flexão de compósitos laminados. Este método serve para monitorar as tensões em cada camada e verificar as rupturas decorrentes de tração, de compressão ou de cisalhamento. Para validar o método numérico, realizou-se ensaios de flexão nas placas cimentícias reforçadas com 2 e com 3 camadas de fibra longas de sisal, com volume de reforço de 3% e de 6%. O modelo mostrou uma boa concordância com os resultados experimentais, especialmente para compósitos reforçados com fibras de sisal longas e um teor de fibras de 6%. Análise numérica indica que o processo de fissuração dos compósitos, durante o ensaio de flexão, é influenciado pela compressão, pela tração e tensões de cisalhamento que se desenvolvem na secção transversal. A identificação das tensões em cada camada e a aplicação apropriada de critérios de ruptura é fundamental para prever o comportamento à flexão dos compósitos reforçados com fibras de sisal. O método numérico sugerido pode ser empregado para definir uma nova configuração de camadas de sisal em compósitos e assim permitir o desenvolvimento de materiais de construção adequados para uma variedade de aplicações.

## **2.2 Tecidos de sisal**

O sisal é uma planta de cor verde originária do México, com folhas estreitas e compridas, medindo entre 10 cm e 15 cm de largura por 120 cm a 160 cm de comprimento no momento da colheita e, no final de sua folha, se encontra um espinho escuro, afiado e duro.

O cultivo do sisal é bastante simples e com um curto espaço de tempo entre cortes, produzindo em média 200 folhas por corte. Aproximadamente 80% do volume de cada folha é composto por água e apenas 4% de seu volume é composto por fibras.

O processamento de sisal é composto pelas seguintes etapas: corte, desfibramento, lavagem/secagem e batimento. O seu corte é feito rente ao tronco com uma faca ou foice e não se retira todas as folhas da planta, cerca dez folhas ainda permanecem no tronco a fim de favorecer o crescimento de novas folhas. Depois de cortadas são transportadas em ganchos de madeira até o local do desfibramento. A extração das fibras a partir das folhas do sisal é feita por uma máquina rudimentar a "Paraibana", essa máquina possui um rotor que em movimento aciona um mecanismo que causa o esmagamento das mesmas. A fibra é lavada no final do dia em tanques com água, onde fica imersa durante a noite. Pela manhã, as fibras são estendidas em varais de arame farpado, para secarem ao sol.

A preparação das fibras para a comercialização é inicializada realizando uma pré-qualificação visual das fibras em função das impurezas presentes. O batimento ocorre em máquinas dotadas de um tambor rotativo que, ao bater na fibra, faz com que o parênquima, que são tecidos vegetais responsáveis por diversas funções nas plantas como armazenar água, proteínas, óleos e também realizar a fotossíntese, se desprenda. Tais máquinas são conhecidas como batedeiras. A fibra, então, é classificada e enfardada para ser comercializada.

Existem diversas formas para a utilização das fibras têxteis de sisal, como cordas, tapetes e produtos artesanais. Outras utilizações destas fibras são como matéria prima para papéis especiais e na indústria automobilística como parte do estofamento.

As fibras naturais vegetais são compostas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, que, combinadas, são frequentemente descritas como composto natural no qual cada componente desempenha uma função. Possuem, também, quantidades menores de açúcares livres, proteínas, extrativos e produtos inorgânicos.

As fibras vegetais possuem composição química que varia de espécie para espécie e, também, em diferentes partes de uma mesma folha. Fatores como localização geográfica, clima, idade e tipo do solo também alteram a composição química das fibras.

O sisal possui um teor de celulose elevado, característica relacionada ao desempenho mecânico. O desempenho mecânico, o baixo custo, a baixa densidade e as vantagens no processamento, são fatores que impulsionam a pesquisa e o uso das fibras naturais em substituição às fibras sintéticas. Além de serem oriundas de recursos renováveis e biodegradáveis.

As fibras de sisal utilizadas nos compósitos se apresentam nas formas de:

- Não tecido, também conhecidos como mantas, que são arranjos de fibras têxteis longas dispostas aleatoriamente num plano e mantidas unidas por compactação ou por pequenas quantidades de adesivo;
- Mechas, que são arranjos de fibras têxteis orientadas em uma direção (este tipo de arranjo deve ser utilizado quando são conhecidas as direções dos esforços aos quais a peça está submetida);
- Arranjos em tecidos, que são arranjos de fios unidos por forças de contato e pelo intertravamento obtido nos diversos métodos de confecção: tricotados - que são confeccionados pelo entrelaçamento dos fios; trançados - formados pelo cruzamento de fios em duas ou três direções; urdidos (tramados), - formados pela intercalação de fios em duas direções (figura 1) (CARVALHO, 2005).

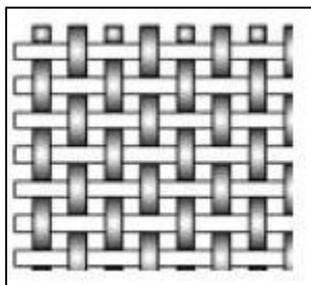


Figura 1. Arranjos de tecidos urdidos, JOHN e THOMAS (2008).

São quatro os tipos principais de tecidos tramados; sendo os mais utilizados os do tipo simples e do tipo sarja. O tipo simples é obtido pelo cruzamento alternado de fios perpendiculares e o tipo sarja é obtido pelo cruzamento alternado de dois ou mais fios. Na figura 2, são mostradas algumas tramas encontradas em tecidos urdidos.

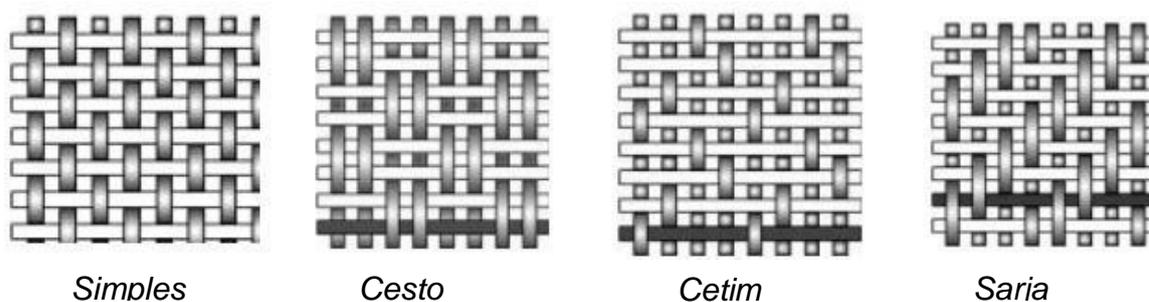


Figura 2. Tipos de arranjos de tecidos urdidos, JOHN e THOMAS (2008).

Existem, ainda, os tecidos unidirecionais que apresentam poucas fibras na direção perpendicular, com o objetivo de manter as fibras da direção principal unidas e alinhadas.

Para o desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com tecido de sisal utilizou-se os tecidos urdidos, também chamados de tramados, que são formados pela intercalação de fios em duas direções, pois estes apresentam características necessárias para alcançar maior resistência à tração, flexão e aumento da tenacidade, nas duas direções. Estes tecidos podem ser confeccionados com feixes de fibras de sisal, geralmente com 10 fibras por feixe, para que o tecido tenha uma espessura média de 1 mm, e também por fios, que são cordões de fibras de sisal enroladas e torcidas umas nas outras. Estes fios são apresentados por um número, por exemplo, “fio de sisal 700”, este número significa o comprimento do cordão em metros que é possível confeccionar com 1 kg de fibra de sisal, no caso do “fio 700” temos 700 m de fio confeccionado com 1 kg de fibra de sisal.

O arranjo influencia significativamente o comportamento do elemento estrutural composto, sendo que os arranjos dependem bastante do comprimento. As fibras longas permitem tanto arranjos aleatórios como orientados. Os arranjos aleatórios são conseguidos com mantas enquanto os

arranjos orientados são obtidos com tecidos, mechas ou fios. As fibras de sisal são naturalmente longas e o uso destas para a fabricação de cordas facilita a obtenção de arranjos orientados (CARVALHO, 2005).

Segundo Cerchiaro (2010) a orientação das fibras nos compósitos os tornam anisotrópicos, e o máximo desempenho é alcançado quando o material é solicitado na direção da orientação das fibras. Na direção perpendicular ao alinhamento das fibras, o reforço praticamente não existe, desta forma, o material falha a tensões muito baixas. Assim, fica claro que não apenas a composição fibrilar, mas também a orientação das fibras é fundamental para o desempenho mecânico dos compósitos.

Conforme Cerchiaro (2010), as principais vantagens das fibras naturais vegetais são que as mesmas, por serem materiais renováveis, podem ter sua disponibilidade considerada ilimitada; são materiais biodegradáveis; são atóxicas; são menos abrasivas que as fibras artificiais, o que gera um menor desgaste dos equipamentos utilizados em seu processamento; possuem baixa densidade e alta deformabilidade, além do baixo custo ao serem comparadas com materiais similares para o mesmo tipo de aplicação; as fibras naturais ainda podem ser uma nova fonte de renda para a população rural, favorecendo a fixação do homem no campo.

### *2.2.1 Tratamento das fibras de sisal*

As fibras são tratadas para melhorar a aderência na interface fibra-matriz, ou ainda para alterar as características das fibras. Alguns dos resultados encontrados têm sido o aumento da rugosidade e da superfície exposta das fibras, a remoção da lignina externa das fibras, ou o aumento da cristalinidade dos polímeros naturais das fibras.

Li *et al.* (2000) argumentam que o tratamento das fibras aumenta a adesão na interface fibra-matriz, e reduz a absorção de água. Foram utilizados os seguintes métodos: introdução de agentes acoplantes como os silanos; grafitação com peróxidos; tratamentos com álcalis ou permanganatos para aumentar a superfície exposta e a rugosidade superficial da fibra; e tratamentos térmicos.

Rong *et al.* (2001) dizem que as fibras de sisal podem ser quimicamente modificadas por tratamentos físicos e químicos. Os processos químicos ativam a superfície, introduzindo compostos reativos para obter fibras com maior extensibilidade ao remover parcialmente a lignina e a hemicelulose. O tratamento térmico das fibras aumenta a cristalinidade da celulose, que pode resultar em fibras mais rígidas.

AGARWAL *et al.* (2006) concluem que na maioria das aplicações de engenharia, as propriedades transversais de compósitos unidirecionais são consideradas insatisfatórias. Esta limitação resulta da utilização de compósitos unidirecionais e é superada pela formação de laminados a partir das camadas superpostas unidirecionais.

Tratamentos com silicato de sódio, sulfito de sódio, tanino e óleos vegetais também foram realizados nas fibras de sisal, Gram (1983) e Canovas *et al.* (1990). Estes tratamentos ocasionaram apenas uma desaceleração do processo de mineralização da fibra, trazendo poucos ganhos em relação à durabilidade da fibra na matriz cimentícia. Canovas *et al.* (1990 e 1992) estudou a selagem dos poros da matriz, com produtos como tanino e cera, onde constataram uma redução na absorção de água e da porosidade da matriz, com uma tendência de aumento na durabilidade das fibras.

### **2.3 Matrizes cimentícias**

As matrizes cimentícias são formadas por cimento Portland, agregados e água, podendo ou não ser empregados aditivos a esta matriz. A matriz cimentícia é um material de construção simples e barato e não necessita de equipamentos sofisticados para a sua produção, podendo ser moldada em diversas formas, e apresenta boas propriedades de resistência e vida útil (AZIZ, 1981).

Utilizamos uma matriz cimentícia desenvolvida por pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECEA da Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS, matriz esta que já apresenta um bom comportamento quando associada a fibras de sisal para produção de compósitos.

Um grande entrave da utilização das fibras de sisal como reforço de matrizes cimentícias é a durabilidade dos compósitos. Alguns produtos perdem a resistência e a rigidez com o tempo. Problemas de durabilidade estão relacionados com a deterioração e enfraquecimento da fibra, que ocorrem principalmente devido a alguns fatores como ataque alcalino à fibra, mineralização da fibra causado pela migração de produtos de hidratação do cimento para seu interior, e a variação volumétrica da fibra pela absorção e perda de água. Alguns tratamentos possíveis para aumentar a durabilidade dos compósitos seriam a impermeabilização da matriz, a proteção superficial da fibra, ou a redução da alcalinidade e do teor de hidróxido de cálcio livre da matriz.

#### **2.4 Deterioração de fibras vegetais em ambiente alcalino**

O grande entrave dos materiais compósitos com matrizes cimentícias reforçadas com fibras de sisal é a sua fragilização ao longo do tempo, devido ao ataque alcalino do cimento às fibras vegetais, o que reduz, também, a aderência na interface fibra – matriz, diminuindo, assim, a resistência aos esforços solicitantes e, conseqüentemente, sua durabilidade.

O ataque alcalino é um dos principais responsáveis pelo enfraquecimento das fibras de celulose no concreto em clima tropical. Gram (1983) relata os principais processos de decomposição:

- Efeito de “peeling-off”, onde o fim da cadeia molecular da celulose é desprendido e os grupos terminais são continuamente liberados;
- Hidrólise alcalina, que causa a divisão da cadeia molecular e reduz o grau de polimerização da celulose. Os dois processos ocorrem de forma combinada e causam danos às fibras vegetais, entretanto, a quebra da cadeia polimérica, que causa a decomposição da hemicelulose, só acontece em alta escala, para temperaturas maiores que 75°C.

Os produtos resultantes da hidratação do cimento são essenciais no processo de envelhecimento de compósitos cimento-fibra de celulose. Uma forma de controlar esse processo é a redução do teor de hidróxido de cálcio da

matriz, pois existe uma tendência do hidróxido de cálcio se dissolver na água do poro e precipitar dentro do lúmen das fibras e em sua superfície porosa. Além disto, ocorre também a carbonatação do hidróxido de cálcio, que produz carbonato de cálcio acelerando o processo e petrificando as fibras. As fibras petrificadas tendem a ser mais frágeis e sua fratura ocorre antes do seu arrancamento da matriz, impedindo a absorção de energia, associada com o arrancamento da fibra, causando o enfraquecimento do compósito.

## **2.5 Controle de pH em matrizes cimentícias**

Para LIMA (2004), as formas possíveis para aumentar a durabilidade dos compósitos seriam a impermeabilização da matriz, a proteção superficial da fibra, a redução da alcalinidade e do teor de hidróxido de cálcio livre da matriz. Também a utilização de materiais pozolânicos tem tido um bom resultado na proteção das fibras de sisal no compósito a base de cimento. Isso porque a adição de pozolanas em substituição ao cimento, como a metacaolinita, por exemplo, aumenta a resistência à compressão, a resistência química, reduz o teor de hidróxido de cálcio livre, reduz o pH e a concentração de íon hidroxila,  $\text{OH}^-$ , na água de poro, além de reduzir a permeabilidade da matriz. Berhane (1994) observou que ao substituir 40% do cimento por materiais pozolânicos naturais, as placas com fibras de sisal não mostraram sinal de degradação após dois anos de exposição.

Os materiais pozolânicos podem ser: naturais, como as cinzas vulcânicas, terras diatomáceas e argilas calcinadas; subprodutos industriais como a sílica de fumo ou microssílica, a cinza da casca de arroz e a cinza volante; e também outros materiais como a sílica amorfa, a metacaolinita, além da pozolana resultante da moagem do resíduo da fabricação de blocos cerâmicos.

A principal diferença entre as reações de hidratação do cimento Portland e as reações pozolânicas, é que nas reações do cimento ocorre a produção de hidróxido de cálcio já nas pozolanas, sua fixação. Nos estudos realizados por LIMA (2004) observou-se que a substituição de 30% e de 40% do teor de cimento por metacaolinita resulta em uma matriz de cimento livre de hidróxido de cálcio.

## 2.6 Moldagem de compósitos cimentícios

JONES (1975) divide os materiais compósitos em três categorias:

- Compósitos com fibras, onde as fibras estão dispersas ou alinhadas dentro de uma matriz;
- Compósitos laminados, que são fabricados com camadas de diferentes materiais;
- Compósitos particulados, que são fabricados com partículas de um material (fibras curtas, por exemplo) inserido dentro de uma matriz, que são os compósitos mais produzidos atualmente.

A produção de compósitos cimentícios para a utilização na construção civil é descrita desde o século XVIII. O austríaco Ludwing Hatschek produziu placas de cimento e asbesto (amianto) em máquina de prensar papel modificada (GALE, 1994). O desenvolvimento desse processo do cimento amianto, o principal produto laminado utilizado na construção civil, sob a forma de telhas, painéis e divisórias.

LIMA (2004) verificou que a utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios obteve resistências à tração e à flexão superiores às da matriz, maior tenacidade e deformação de ruptura. Os compósitos cimentícios reforçados com fibra de sisal obtiveram resistência a tração (15,3 MPa) semelhante ao cimento amianto (17,6 MPa), com isso nota-se uma grande possibilidade para a substituição do amianto na fabricação de algumas peças.

AGARWAL *et al.* (2006) defendem que uma das mais importantes vantagens de compósitos fibrosos é o fato de se poder controlar, de forma eficaz, suas propriedades e anisotropia, ou seja, pode-se obter facilmente valores desejáveis de propriedades alterando o material e suas variáveis de fabricação.

Concretos e argamassas são materiais frágeis, isto é, que deformam pouco até sua ruptura, principalmente quando submetidos à esforços de tração. Para solucionar esta deficiência adicionaram-se fibras, barras e cabos de aço, a estes materiais, melhorando sua resistência a tração. Assim surgiram o concreto armado, concreto protendido, e diversos materiais compósitos. As

características das fibras como comprimento e diâmetro, teor de fibra incorporado e a forma como esta disposta na matriz irão determinar o comportamento a tração do compósito.

A introdução das fibras mantém a resistência mesmo após a fissuração da matriz, aumentando a deformação do compósito antes da ruptura, tornando a resistência ao impacto e a tenacidade maiores que os da matriz.

As principais aplicações dos compósitos cimentícios reforçados com fibras são: concretos e argamassas reforçados com fibras curtas, que incorporam pequenas quantidades de fibras, até 3% em volume, distribuídos aleatoriamente na matriz; e elementos construtivos manufaturados que incorporam grande volume de fibras longas e alinhadas.

Os compósitos fabricados com fibras longas e alinhadas, acrescentam resistência a tração da matriz, e um ganho de resistência em seu comportamento pós-fissuração. O uso das fibras longas redistribui as tensões ao longo do comprimento do compósito, permitindo que novas fissuras sejam formadas. O comportamento pós-fissuração do compósito é regido pela fibra, caracterizado pelo ganho de resistência ou endurecimento.

### **3 METODOLOGIA**

Os materiais primários utilizados neste trabalho foram o sisal e os constituintes da argamassa (cimento, areia, água, aditivos e adições). Foram realizados diversos ensaios nos materiais primários para melhor caracterizá-los física e mecanicamente. Depois eles foram processados para a elaboração de tecidos, misturas de argamassa e moldagem de compósitos.

Esta pesquisa foi realizada com o apoio da Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira – APAEB, da Universidade Federal da Bahia – UFBA, da Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

### 3.1 Esquema sintético da metodologia

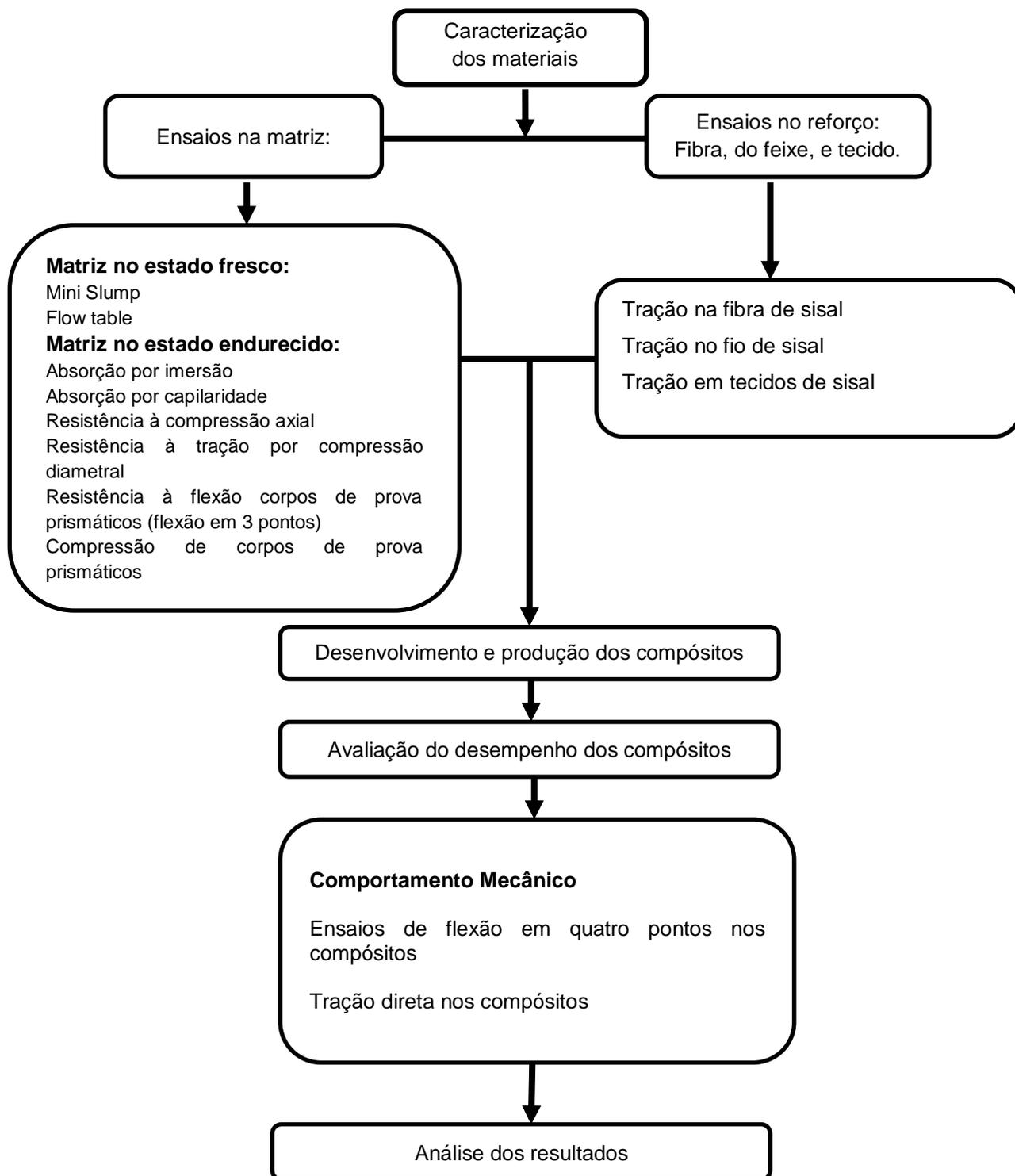


Figura 3. Organograma do desenvolvimento da pesquisa.  
Fonte: O autor.

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Reforço.

Neste trabalho foi utilizada a fibra de sisal proveniente da Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira – APAEB, situada na cidade de Valente – Bahia. Foram confeccionados três tipos de tecidos de sisal sendo dois deles em fio comercial 700, esta numeração indica que com 1 kg de sisal foi produzido 700 m de fio, e o terceiro foi confeccionado não com fios, mas com feixes contendo 10 fibras em cada feixe.

O primeiro tecido produzido com fio possuía um espaçamento de 5 mm tanto no urdume quanto na trama o que permitiu a mesma quantidade de reforço nas duas direções (figura 4). O segundo tipo possuía um espaçamento de 15 mm no urdume, já na trama os fios ficavam encostados uns nos outros, o que permitia uma maior quantidade de reforço na direção longitudinal (figura 5). O terceiro tecido foi desenvolvido por Cerchiaro (2010), foi produzido com feixes contendo 10 fibras de sisal que foram dispostos na trama, no urdume foram utilizados fios de algodão apenas para manter os feixes fixados, neste tecido o espaçamento do urdume foi de 5 mm e na trama de 1 mm (figura 6).



Figura 5. Tecido com espaçamento de 5 mm nas duas direções. Fio 700  
Fonte: O autor.



Figura 4. Tecido com espaçamento de 15 mm no urdume. Fio 700.  
Fonte: O autor.



Figura 6. Tecido com espaçamento de 5 mm no urdume e 1 mm na trama. Feixe de fibras.  
Fonte: O autor.

Os tecidos utilizados estavam secos à temperatura ambiente, e foram previamente lavados em água morna a uma temperatura de 50° C por 15 minutos, para retirar algumas enzimas das fibras de sisal que poderiam reagir com o cimento e retardar a pega da matriz cimentícia.

Os arranjos das fibras em forma de tecido foram desenvolvidos no intuito de obter um espaçamento de malha adequado que não dificultasse ou impedisse a impregnação pela matriz, que obtivesse maior quantidade de fios para reforço aumentando a resistência dos compósitos.

### 3.2.2 *Comportamento mecânico das fibras, dos feixes e dos tecidos*

Os ensaios de tração direta nas fibras, nos feixes e nos tecidos foram realizados em uma máquina de ensaio universal estática servo-elétrica modelo Autograph AGS-X Séries, fabricante Shimadzu, com capacidade de carga de 100 kN, acoplada a um microcomputador com processador Intel – I5, com o software específico Trapesium X, como pode ser visto na figura 7.

#### 3.2.2.1 Ensaio de tração nas fibras

Utilizou-se neste ensaio como referência a Norma ASTM D3822-07, pois a mesma está relacionada às fibras têxteis. Para este ensaio foram selecionadas aleatoriamente vinte fibras retiradas dos feixes que compunham os tecidos. A velocidade do deslocamento da ponte da máquina universal de ensaios foi de 2 mm/min.

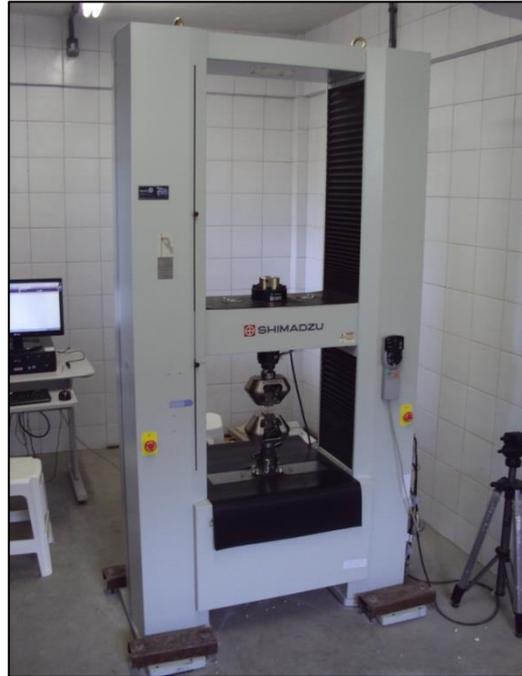


Figura 7. Máquina de ensaio universal – Shimadzu.  
Fonte: O autor.

As fibras foram cortadas com o comprimento de 60 mm, sendo o comprimento base para a realização do ensaio 30 mm, pesadas individualmente em balança de precisão em gramas, com quatro casas decimais, colocadas para secar em estufa a 80° C por 24 h para remover a umidade. Após serem retiradas da estufa foram novamente pesadas na mesma balança, para que com a massa seca pudesse ser calculada a área transversal de cada fibra de acordo com a equação (1).

$$A_m = \frac{m}{\rho_r \cdot L} \quad (1)$$

Onde:

$A_m$  = área da seção transversal;

$m$  = massa seca da fibra;

$\rho_r$  = densidade real e

$L$  = comprimento da fibra.

A área calculada desta forma utiliza apenas a seção preenchida com sólidos descartando os vazios. A densidade do sisal de 1,591 g/cm<sup>3</sup>, extraída dos trabalhos de CARVALHO (2005), foi utilizada para o cálculo da área da fibra.

Utilizou-se também um microscópio ótico com uma câmera acoplada a um microcomputador, a fim de medir o diâmetro equivalente de cada uma das fibras, as mesmas utilizadas nos ensaio. Foram realizadas três medições em cada fibra e calculado o diâmetro médio para determinar a área de cada fibra. Na figura 8 observa-se o microscópio acoplado ao computador, com software específico para captura das imagens geradas no microscópio.



Figura 8. Determinação diâmetro da fibra através de microscópio.  
Fonte: O autor.

Depois de pesadas, cada fibra foi fixada em um suporte de papel vasado de acordo com a figura 9, além do adesivo cada extremidade do molde foi envolvida com fira crepe para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na garra. Deve-se ter um cuidado especial nos métodos de fixação dos corpos-de-prova, pois as garras que fixam as fibras não devem provocar concentração de tensões, mas, ao mesmo tempo, não devem deixar o material deslocar.

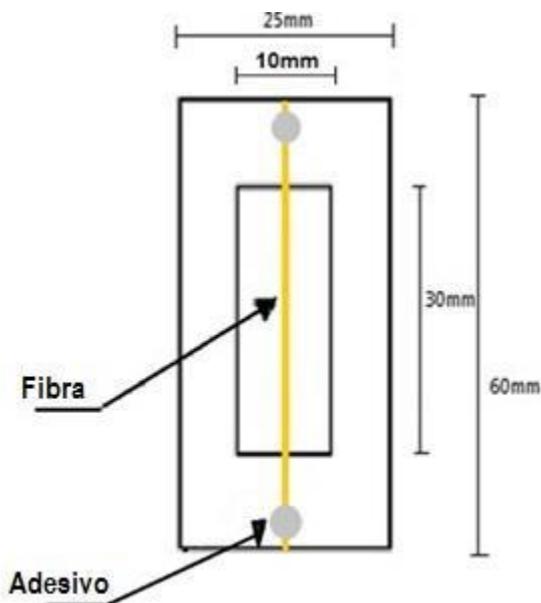


Figura 9. Esquema do corpo de prova com fibra de sisal, Caldas (2014).

### 3.2.2.2 Ensaio de tração nos feixes

Utilizou-se neste ensaio como referência a Norma ASTM D2256-10. Para este ensaio foram selecionados aleatoriamente vinte feixes de fibras retirados dos tecidos. A velocidade do deslocamento da ponte da máquina universal de ensaios foi de 2 mm/min.

Os feixes foram cortados com o comprimento de 300 mm, sendo o comprimento base para a realização do ensaio 250 mm, pesados individualmente em balança de precisão em gramas, com quatro casas decimais, colocados para secar em estufa a 80° C por 24 h para remover a umidade. Após serem retirados da estufa foram novamente pesados, para que com a massa seca pudesse ser calculada a área transversal de cada feixe de acordo com a mesma equação utilizada para calcular as áreas das fibras (equação 1).

Depois de pesados foram fixados em cada extremidade dos feixes lixa nº 100 com adesivo de cura rápida, para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na garra de acordo com a figura 10. Na figura 11 observe-se uma fotografia do corpo de prova. Deve-se ter um cuidado especial nos métodos de fixação dos corpos-de-prova, pois as garras que fixam os feixes não devem provocar concentração de tensões, mas, ao mesmo tempo, não devem deixar o material deslocar.

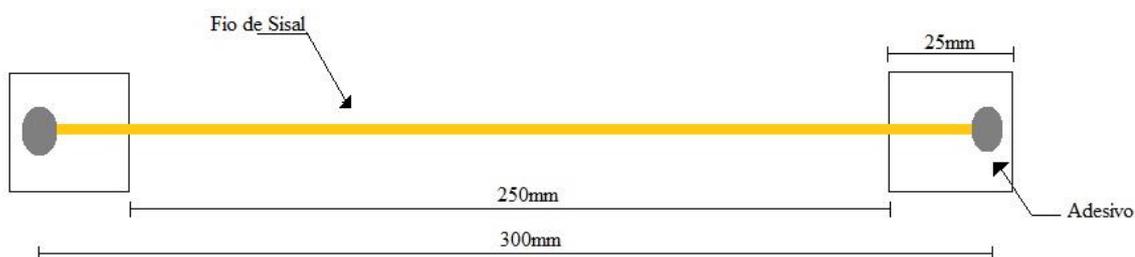


Figura 10. Esquema do corpo de prova com feixe de fibra de sisal, Caldas (2014).



Figura 11. Corpo de prova com feixe de fibra de sisal.  
Fonte: O autor.

### 3.2.2.3 Ensaio de tração nos tecidos

Utilizou-se neste ensaio como referência a norma ASTM D5035. Para este ensaio foram selecionadas aleatoriamente vinte amostras de tecido. A velocidade do deslocamento da ponte da máquina universal de ensaios foi de 2 mm/min.

Os tecidos foram cortados com o comprimento de 120 mm, sendo o comprimento base para a realização do ensaio 75 mm, com uma largura de 40 mm, pesados individualmente em balança de precisão em gramas, com quatro casas decimais, colocados para secar em estufa a 80° C por 24 h para remover a umidade. Após serem retirados da estufa foram novamente pesados assim obteve-se a massa seca. Também se pesou os fios de algodão presentes no urdume do tecido, pois este se encontra posicionado perpendicularmente aos feixes de sisal e não fazem parte da secção transversal do tecido. Assim retira-se a massa do algodão da massa seca do tecido, para desta forma calcular a área transversal de cada tecido de acordo com a mesma equação utilizada para calcular as áreas das fibras (equação 1). Na figura 12 pode-se observar os tecidos cortados e arrumados para serem levados à estufa.



Figura 12. Tecidos de sisal cortados para serem levados à estufa  
Fonte: O autor.

Depois de pesados foram fixados em cada extremidade dos tecidos um pedaço de fita adesiva de polietileno na cor prata, com trama de tecido e adesivo à base de resina e borracha, para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na garra de acordo com a figura 13.

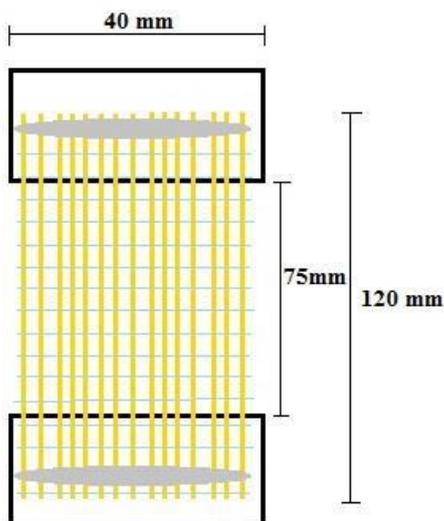


Figura 13. Corpo de prova com tecido de sisal, Caldas (2014).

Na figura 14 vemos uma fotografia do corpo de prova. Deve-se ter um cuidado especial nos métodos de fixação dos corpos-de-prova, pois as garras que fixam os tecidos não devem provocar concentração de tensões, mas, ao mesmo tempo, não devem deixar o material deslocar. A figura 15 mostra a realização do ensaio de tração no tecido de sisal.



Figura 14. Corpo de prova com tecido de sisal.  
Fonte: O autor.



Figura 15. Ensaio de tração no tecido de sisal.  
Fonte: O autor.

### 3.2.3 Matriz

A matriz utilizada nesta pesquisa para a confecção dos compósitos foi uma matriz cimentícia desenvolvida pelo pesquisador Alex Borges Roque, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECEA), da Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, que apresenta as propriedades adequadas para a utilização em conjunto com o tecido de sisal.

O traço utilizado nesta matriz foi:

1 : 0,2 : 0,8 : 2 : 0,7 (cimento : sílica : cinza volante : areia : água)

Foi utilizado também o superplastificante Vedacit Adiment Premium (teor de 0,8%) e o agente modificador de viscosidade (teor 0,07%).

As características dos componentes da matriz estão descritas a seguir:

#### 3.2.3.1 Cimento Portland

Foi utilizado nesta pesquisa o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). Sua caracterização está apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do cimento

Características e Propriedades		Unidade	Valores experimentais
Resistência à Compressão	1 dia de idade	MPa	16,7
	3 dias de idade	MPa	25,0
	7 dias de idade	MPa	38,4
	Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	3,04
Finura		%	0,7 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Precisão da balança: 0,01g  
Fonte: Roque (2015).

Os valores encontrados estão de acordo com os valores especificados pela NBR 5733 (ABNT, 1991)

### 3.2.3.2 Agregados

Foi utilizada nesta pesquisa areia quartzosa com dimensão máxima característica igual a 1,2 mm, comumente empregada em construções na cidade de Feira de Santana.

### 3.2.3.3 Sílica Ativa

A caracterização da sílica ativa utilizada nesta pesquisa foi realizada através de fluorescência de raios X, e está apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Características da sílica ativa

Teor mínimo de sílica amorfa: 85%									
Massa específica: 2,11g/cm <sup>3</sup>									
Parâmetro	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MnO
Resultados da amostra (%)	95,3	0,04	0,49	1,33	0,22	0,35	0,17	0,17	0,18

Fonte: Roque (2015).

### 3.2.3.4 Cinza Volante

A caracterização da cinza volante utilizada nesta pesquisa foi realizada através de fluorescência de raios X. A caracterização e a granulometria estão apresentadas na tabela 3 e na figura 16. Esta cinza volante foi adquirida na empresa POZOFLY.

Tabela 3. Caracterização da cinza volante

Massa específica: 1,98g/cm <sup>3</sup>									
Parâmetro	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Outros
Resultados da amostra (%)	53,33	33,23	4,96	3,44	2,06	1,38	1,26	0,1	0,24

Fonte: Roque (2015).

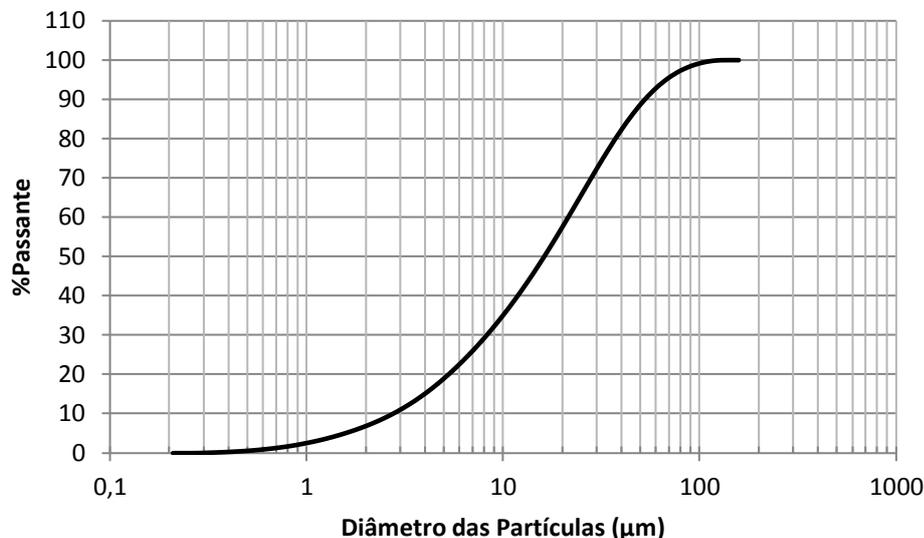


Figura 16. Granulometria da cinza volante, Roque (2015).

#### 3.2.3.5 Superplastificante e Agente Modificador de Viscosidade

A matriz autoadensável foi obtida empregando-se um dispersante à base de policarboxilatos (superplastificante Adiment Premium - Vedacit®). Este superplastificante apresenta massa específica igual 1,09 g/cm<sup>3</sup> e proporção de 70% água e 30% sólidos, de acordo com os dados do fabricante. Com o objetivo de reduzir a exsudação, evitar a segregação e manter a coesividade da argamassa, foi utilizado um agente modificador de viscosidade (Rheomac UW 410), fabricado pela empresa BASF. É um produto com base química de polímeros de celulose, com alto peso molecular e apresenta-se em forma de pó com cor branca.

#### 3.2.3.6 Propriedades da matriz no estado fresco

- **Mini Slump**

O espalhamento obtido no mini slump foi de 160 mm. Como pode ser visto na figura 17.

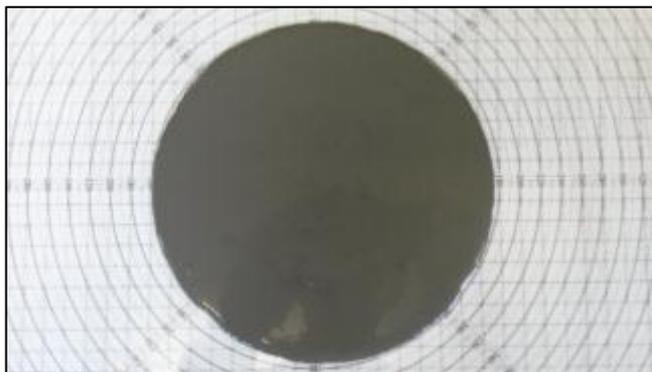


Figura 17. Mini slump, Roque (2015).

- **Flow table**

A consistência obtida na flow table foi de 400 mm. Como pode ser visto na figura 18.



Figura 18. Consistência da matriz cimentícia, Roque (2015).

### 3.2.3.7 Propriedades no estado endurecido

- **Absorção por imersão**

Os valores correspondentes aos resultados do ensaio de absorção por imersão foram obtidos de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) e estão descritos na tabela 4.

Tabela 4. Absorção por imersão.

Amostra	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Espec. Amostra Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Espec. Amostra Sat. (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Espec. Real (g/cm <sup>3</sup> )
01	4,08	7,87	1,93	2,01	2,09
02	4,17	8,04	1,93	2,01	2,10
03	4,11	7,94	1,93	2,01	2,10

Fonte: Roque (2015).

- **Absorção por capilaridade**

Os valores correspondentes aos resultados do ensaio de absorção por capilaridade foram obtidos de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 1995), e estão descritos na figura 19.

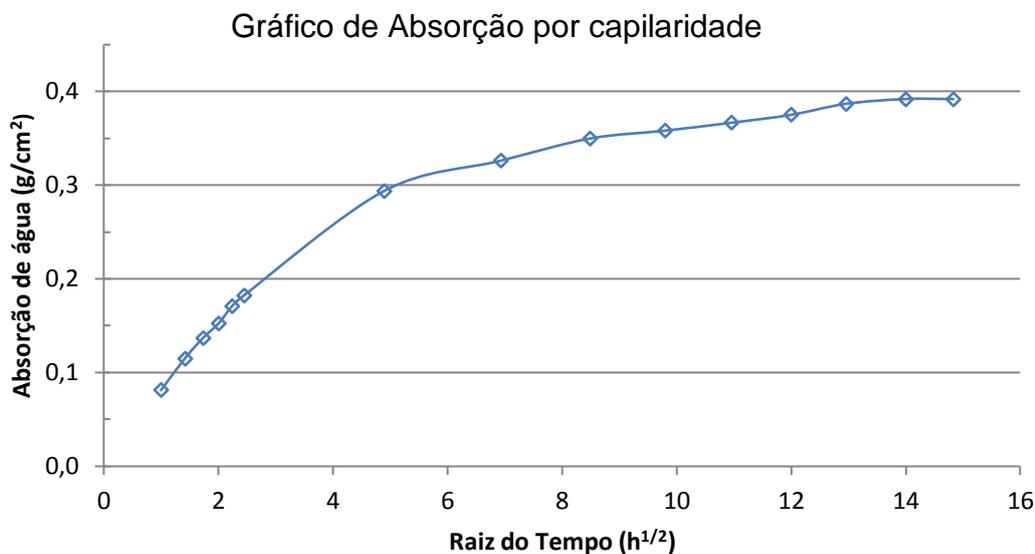


Figura 19. Absorção por capilaridade, Roque (2015).

Na tabela 5 estão apresentadas as resistências: à compressão axial, valores foram obtidos de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996); à tração por compressão diametral, valores foram obtidos de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 1994); à flexão corpos de prova prismáticos (flexão em 3 pontos),

valores foram obtidos de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 1994b); à compressão de corpos de prova prismáticos, valores foram obtidos de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996).

Tabela 5. Resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, à flexão corpos de prova prismáticos, compressão de corpos de prova prismáticos.

<b>Parâmetros</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
Resistência à compressão axial (MPa)	47,78	1,52	3,17
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3,53	0,20	5,73
Resistência à flexão corpos de prova prismáticos (flexão em 3 pontos) (MPa)	7,73	0,28	3,57
Resistência à compressão de corpos de prova prismáticos (MPa)	58,17	0,36	0,63

Fonte: Roque (2015).

### 3.3 Método

O desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com tecido de sisal foi realizado de forma experimental, nos laboratórios existentes na Escola Politécnica, como o CETA, o SP Timoshenko e o LEDMA, da Universidade Federal da Bahia, e também o Laboratório de Estrutura e o Laboratório Compósitos do Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana.

### *3.3.1 Moldagem das placas cimentícias reforçadas com o tecido estruturais de sisal.*

Os compósitos foram moldados em formas metálicas quadradas com 40 cm de lado. As etapas principais para a conformação dos compósitos cimentícios reforçados com tecido de sisal foram: preparação da argamassa, impregnação do tecido, moldagem e cura.

A preparação da argamassa deve garantir a homogeneidade e deve ser realizada em argamassadeira adequada, para que não haja segregação (SANTOS, 2013). A impregnação deve possibilitar o envolvimento das fibras pela argamassa. A moldagem foi realizada de forma a obter os melhores resultados de desempenho dos compósitos.

Inicialmente os tecidos foram lavados, imersos em um caldeirão metálico com água à temperatura ambiente sendo aquecida a uma taxa de 2°C por minuto até atingirem 50°C, tendo o cuidado de sempre estar movimentando o tecido no caldeirão para evitar que alguma parte do mesmo ficasse em contato constante com as paredes e/ou com o fundo do caldeirão, que tinham a temperatura mais elevada que a água e assim acabasse fragilizando algumas partes do tecido. Após atingir esta temperatura, foi mantido em temperatura constante por vinte minutos, tempo suficiente para remover as enzimas presentes no sisal que reagiriam com a matriz cimentícia retardando a pega e a cura da mesma.

Foram pesadas individualmente todas as massas dos componentes da matriz cimentícia: Cimento CP-V ARI, Microsílica, Cinza Volante, Areia, VMA, Superplastificante e a água, em balança de precisão em gramas, com quatro casas decimais.

Nesta mesma balança foram pesadas também todas as massas dos tecidos para cada placa.

Antes de iniciar a preparação da argamassa foi aplicado desmoldante nas formas para facilitar a remoção das placas após a secagem inicial, figura 20.



Figura 20. Forma metálica com desmoldante aplicado.  
Fonte: O autor.

A preparação da argamassa deve garantir a homogeneidade e deve ser realizada em argamassadeira adequada, para que não haja segregação (SANTOS, 2013).

Após a pesagem, misturou-se o cimento, a cinza volante e a microsilica em um saco plástico fechado até que a mistura ficasse homogênea, então a mistura destes componentes foi levada para a argamassadeira de 20 litros. O superplastificante foi misturado à água antes desta ser lançada na argamassadeira.

O processo foi todo cronometrado. Após ligar a argamassadeira na velocidade 1 (125 rpm) acrescentou-se a água juntamente com o superplastificante em uma vasão aproximada de 1 l/min, depois foi adicionado a areia lentamente, figura 21. A argamassadeira continuou a funcionar até completar quatro minutos, quando foi interrompida por um minuto para que manualmente fossem removidos os grumos, deixando a argamassa mais homogênea, acrescentando logo depois o VMA. Depois ligou-se novamente a argamassadeira por mais cinco minutos na velocidade 2 (220 rpm). No total foram dez minutos desde o início do processo com a adição da água até o desligamento da armassadeira.



Figura 21. Acrescentando lentamente água e areia à argamassa.  
Fonte: O autor.

Logo após a preparação da argamassa iniciou-se a moldagem aplicando uma camada de 2 mm de argamassa na forma metálica, figura 22.



Figura 22. Primeira camada de argamassa com 2 mm de espessura.  
Fonte: O autor.

Após a primeira camada de argamassa foi colocado a primeira camada do tecido confeccionado com de feixes de fibras de sisal. Para obter uma melhora impregnação das fibras foi utilizado um rolo de náilon para comprimir as fibras sobre a matriz, figura 23. A impregnação deve possibilitar o melhor envolvimento possível das fibras pela argamassa.



Figura 23. Aplicação da primeira camada de tecido – compactação com rolo de náilon.  
Fonte: O autor.

Após a primeira camada do tecido colocamos a segunda camada de argamassa e com o auxílio de uma espátula efetuamos a distribuição uniforme da matriz sobre o tecido, não somente espalhando, mas também comprimindo a matriz na direção do tecido para obter uma melhor impregnação das fibras, figura 24.



Figura 24. Aplicação da segunda camada de argamassa – distribuição com uma espátula.  
Fonte: O autor.

E assim sucessivamente foram adicionadas as outras camadas de tecido de sisal e de argamassa. Após a última camada de argamassa as formas foram levadas à mesa vibratória onde foram expostas a vibração por quinze segundos, a fim de melhorar o adensamento da matriz, reduzindo o volume de vazios e melhorando a impregnação das camadas de tecido de sisal. Por fim foram colocadas tampas de acrílico em cada forma para melhorar o acabamento superficial da placa e principalmente para evitar a perda de umidade durante a secagem inicial, figura 25.



Figura 25. Placa de acrílico sobre placa recém moldada.  
Fonte: O autor.

Depois de 48h as placas foram removidas das formas metálicas e levadas para a cura, sendo depositadas em tanques com água a temperatura ambiente, figura 26. Só foram retiradas aos 28 dias para a realização dos ensaios.



Figura 26. Placa em tanque de cura.  
Fonte: O autor.

Foram confeccionadas placas prismáticas quadradas, com 40 cm de lado cada uma com 1,0 cm de espessura. Cada placa forneceu 3 corpos de prova com lados de 40 cm por 10 cm para o ensaio de flexão em 4 pontos e 4 corpos de prova com lados de 20 cm por 5 cm para o ensaio de tração direta. Na figura 27 está exposta a configuração para o corte das placas.

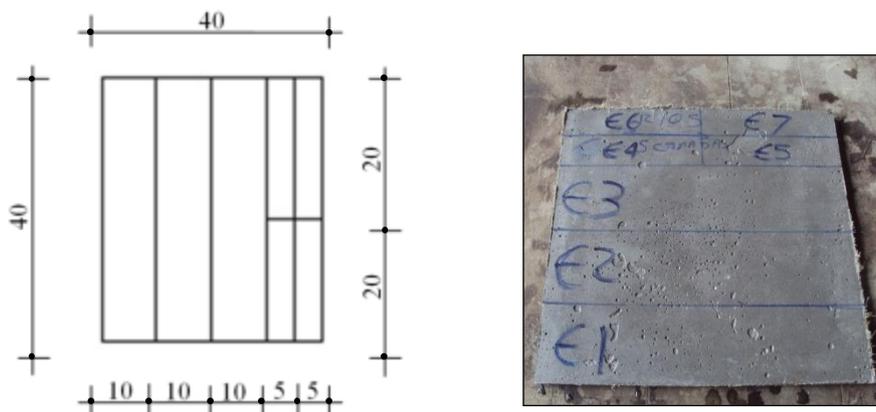


Figura 27. Arranjo do corte das placas.  
Fonte: O autor.

Na figura 28 pode-se ver o momento do corte da placa e as placas depois de cortadas.



Figura 28. Corte das placas.  
Fonte: O autor.

### 3.4 Avaliação do comportamento mecânico dos compósitos:

As placas foram submetidas aos ensaios de flexão em quatro pontos e ensaios de tração direta, após 28 dias de cura.

#### 3.4.1 Ensaio de tração direta nos compósitos

Foram realizados ensaios de tração direta nas placas cimentícias reforçadas com tecido de sisal, os corpos de prova tinham 20 cm de comprimento por 5 cm de largura, a espessura era a mesma das placas. Foi desenvolvido um aparato metálico composto por barras chatas de aço com 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 3 mm de espessura, com um furo de 10 mm em uma das extremidades de acordo com a figura 29.

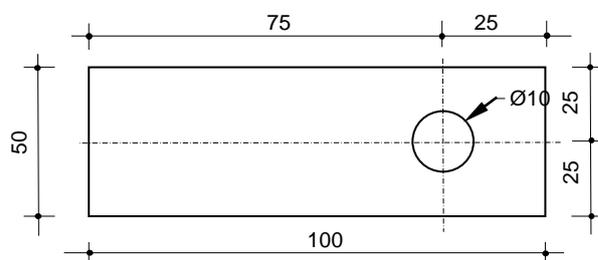


Figura 29. Representação do aparato metálico.

Fonte: O autor.

Em cada lado dos corpos de prova foram fixadas duas placas metálicas com adesivo epóxi, o furo das duas placas metálicas ficaram alinhados para que as placas fossem unidas através de um parafuso com uma terceira placa, esta por sua vez fixada à garra da máquina de ensaio universal. A preparação do corpo de prova para o ensaio pode ser vista na figura 30.

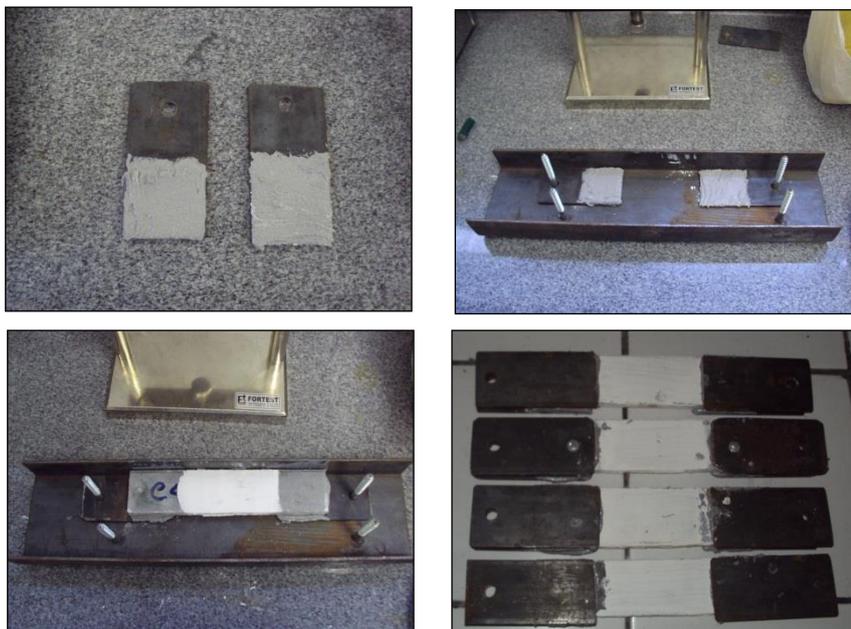


Figura 30. Preparação dos corpos de prova.

Fonte: O autor.

O motivo de se utilizar este aparato é primeiramente não causar avarias à matriz cimentícia, pois a mesma sofreria danos se fixada diretamente na garra da prensa, e também manter o alinhamento do corpo de prova durante o ensaio, evitando assim que ocorram esforços causados pelo desalinhamento. Este procedimento não alterará quaisquer nuances do ensaio, tampouco comprometerá a precisão de seus resultados, visando apenas à adequação do aparelho à fragilidade do compósito.

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal estática servo-elétrica modelo Autograph AGS-X Séries, fabricante Shimadzu, com capacidade de carga de 100 kN, acoplada a um microcomputador com processador Intel – I5, com o software específico Trapesium X, a velocidade de deslocamento da ponte da máquina de ensaio universal foi 0,5 mm/min. As placas foram pintadas com tinta em pó branca, para que não houvesse formação de película, e assim facilitar a visualização do surgimento das fissuras, processo esse que foi acompanhado fotograficamente por uma câmera com resolução de 5 megapixel, acoplada ao computador, capturando imagens a cada 30 s. O esquema para a realização do ensaio pode ser visto na figura 31.



Figura 31. Esquema do ensaio de tração.  
Fonte: O autor.

#### 3.4.2 Ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos.

Ensaio de flexão em 4 pontos foram realizados, de acordo com as normas americanas ASTM C 947 (ASTM, 1999) e ASTM C 459 (ASTM, 1997) em corpos de prova prismático-retangulares (placas com 40cm de

comprimento, 10cm de largura e 1cm de altura) a fim de se analisar o comportamento do compósito reforçado com fibras de sisal, quando submetido à flexão, bem como analisar o comportamento das fissuras.

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal estática servo-elétrica modelo Autograph AGS-X Séries, fabricante Shimadzu, com capacidade de carga de 100 kN, acoplada a um microcomputador com processador Intel – I5, com o software específico Trapesium X, mesmo equipamento utilizado para o ensaio de tração das fibras de sisal, a velocidade de deslocamento da ponte da máquina de ensaio universal foi 0,5 mm/min. Para melhor precisão foi utilizado um LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear), acoplado ao aparato de flexão, que permitiu medir a flecha na posição central do vão. A distancia entre os pontos de aplicação de carga foi 100 mm, e entre os apoios foi 300 mm.

As placas foram pintadas com tinta em pó branca, figura 32, para que não houvesse formação de película, e assim facilitar a visualização do processo de surgimento das fissuras, processo esse que foi acompanhado fotograficamente por uma câmera com resolução de 5 megapixel, acoplada ao computador, capturando imagens a cada 30 s. Um espelho foi posto de forma inclinada abaixo da placa para permitir o acompanhamento das fissuras que surgiram no lado inferior das placas. Figura 33.

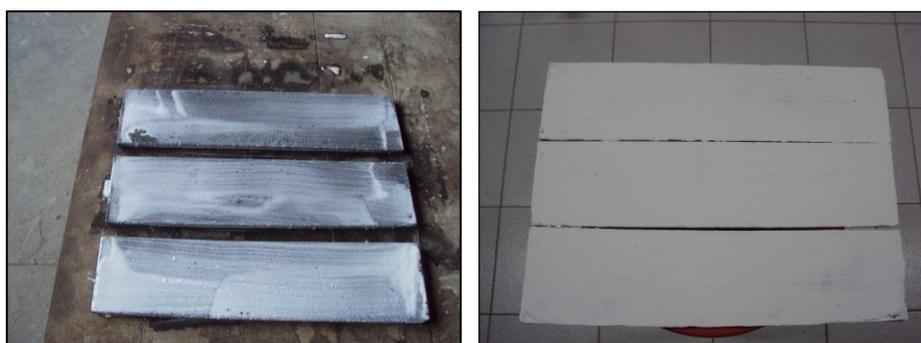


Figura 33. Placas pintadas de branco.

Fonte: O autor.



Figura 32. Ensaio de flexão em 4 pontos.

Fonte: O autor.

### 3.5 Estudo preliminar.

Na fase inicial deste trabalho foram produzidos 5 tipos diferentes de compósitos todos com a mesma matriz, alterando apenas o tipo do tecido e a quantidade de camadas de tecido. As placas foram denominadas de acordo com o tipo de tecido e a quantidade de camadas de reforço: “F” para tecido confeccionado com Fio 700, “Fx” para tecido confeccionado com feixe de fibras; “U5” para urdume com espaçamento de 5 mm, “U15” para urdume com espaçamento de 15 mm; “T0” para trama com espaçamento de 0 mm, “T1” para trama com espaçamento de 1 mm, “T5” para trama com espaçamento de 5 mm; “nC” para quantidade de camadas de reforço. Como podemos ver na tabela 6:

Tabela 6. Tipo de tecido e quantidade de camadas nas placas preliminares.

Designação	Tipo de tecido			Gramatura (g/mm <sup>2</sup> )	Nº de Camadas de Tecido	Volume de Reforço
	Fio 700 ou Feixe de fibras	Espaçamento				
		Urdume	Trama			
F-U5/T5-1C	Fio 700	5mm	5mm	0,058	1	5,88%
F-U15/T0-1C	Fio 700	15mm	0	0,120	1	12,62%
Fx-U5/T1-3C	Feixe de Fibras	5mm	1mm	0,022	3	6,22%
Fx-U5/T1-4C	Feixe de Fibras	5mm	1mm	0,022	4	10,63%
Fx-U5/T5-5C	Feixe de Fibras	5mm	1mm	0,022	5	9,95%

Fonte: O autor.

Neste estudo foram confeccionadas seis placas prismáticas quadradas, sendo uma apenas com a matriz sem reforço, e cinco de compósitos com 40 cm de lado cada uma com 1,0 cm de espessura, com 1, 1, 3, 4 e 5 camadas de tecido de sisal, respectivamente. Cada placa forneceu 3 corpos de prova de com lados de 40 cm por 10 cm para o ensaio de flexão em 4 pontos e 4 corpos de prova com lados de 20 cm por 5 cm para o ensaio de tração direta:

- A primeira placa foi moldada sem reforço para que seus resultados fossem utilizados como referência, nos ensaios de flexão em 4 pontos e de tração direta nos compósitos.
- A segunda placa - F-U5/T5-1C - foi moldada com uma camada de tecido de sisal confeccionado com fio 700, com malha de 5 mm nas duas direções, esta malha foi posicionada a 2 mm da face inferior da placa, a fim de obter melhores desempenhos quando submetidas aos ensaios de flexão em quatro pontos. A massa do tecido de sisal utilizado na confecção desta placa foi de 92,28 g.
- A terceira placa - F-U15/T0-1C - foi moldada com uma camada de tecido de sisal confeccionado com fio 700, sendo que este tecido possuía espaçamento no urdume de 15 mm, na trama os fios ficavam completamente encostados uns aos outros. A trama do tecido, por possuir maior quantidade fios, foi posicionada na direção longitudinal em relação ao corte para os corpos de prova. Este tecido foi posicionado a 2 mm da face inferior da placa, a fim de obter melhores desempenhos quando submetidas aos ensaios de flexão em quatro pontos. A massa do tecido de sisal utilizado na confecção desta placa foi de 191,57g.
- A quarta placa - Fx-U5/T1-3C - foi moldada com três camadas de camada de tecido de sisal confeccionado com feixes de dez fibras de sisal na trama e fios de algodão no urdume, sendo que este tecido possuía um espaçamento no urdume de 5 mm, e na trama aproximadamente de 1 mm. As camadas do tecido foram igualmente espaçadas, a fim de obter melhores desempenhos quando submetidas aos ensaios de flexão em quatro pontos e de tração direta. A massa do tecido de sisal utilizado na confecção desta placa foi de 108,87g.
- A quinta - Fx-U5/T1-4C - e a sexta - Fx-U5/T1-5C - placas foram moldadas de forma semelhante à quarta com o mesmo tecido, só diferenciando o número de camadas de tecido, na quinta

colocou-se quatro camadas e na sexta cinco camadas. A massa do tecido de sisal utilizado na confecção da quinta e sexta placas foram respectivamente de 139,41g e 171,98g. Vale ressaltar que apesar de possuir uma massa menor de tecido a placa F-U5/T1-4C obteve maior volume de reforço que a placa F-U5/T1-5C. Isto ocorreu, pois a espessura da placa F-U5/T1-4C foi de 8,63 mm, enquanto na placa F-U5/T1-5C foi de 11,37 mm.

Depois de moldadas, as placas foram colocadas em tanques para a cura até o vigésimo oitavo dia.

Após a cura foi realizado o ensaio de flexão em 4 pontos, onde foram obtidas as curvas de tensão (MPa) em função do deslocamento (mm), onde observa-se que, mesmo após o aparecimento das primeiras fissuras, as placas cimentícias reforçadas com tecido de sisal continuaram a suportar uma carga cada vez maior. A figura 34 apresenta o gráfico Tensão x Deslocamento da placa Fx-U5/T1-3C (corpos de prova CP 01, CP 02 e CP 03), que foi moldada com três camadas de tecido de sisal confeccionado com feixes de dez fibras de sisal na trama e fios de algodão no urdume, com espaçamento de 5 mm no urdume e 1mm na trama.

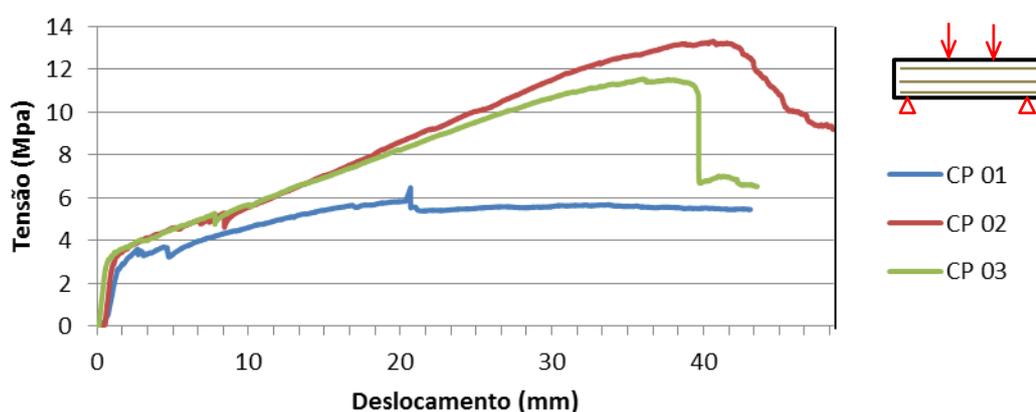


Figura 34. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa Fx-U5/T1-3C. Fonte: O autor.

Com este tecido de reforço a placa F-U5/T1-3C conseguiu suportar uma tensão de 13,30 MPa no ensaio de flexão, que esta próximo aos obtidos por outros pesquisadores que utilizam o sisal para reforçar matrizes cimentícias.

Nos gráficos das figuras 35, 36 e 37, pode-se visualizar o comportamento à flexão das demais placas produzidas: F-U5/T5-1C, Fx-U5/T1-4C e Fx-U5/T1-5C.

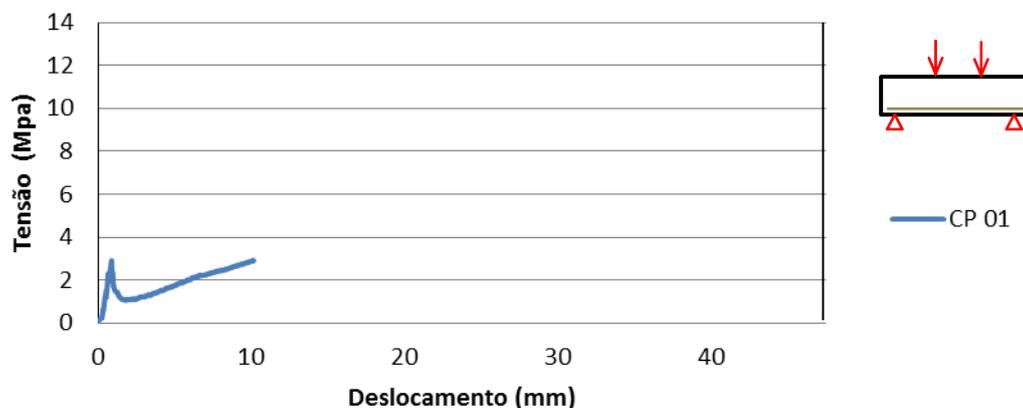


Figura 35. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa F-U5/T5-1C.  
Fonte: O autor.

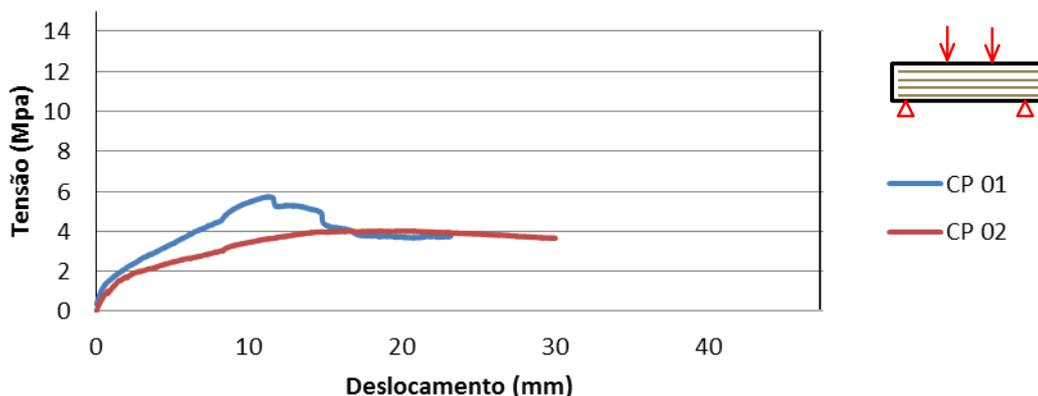


Figura 36. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa Fx-U5/T1-4C  
Fonte: O autor.

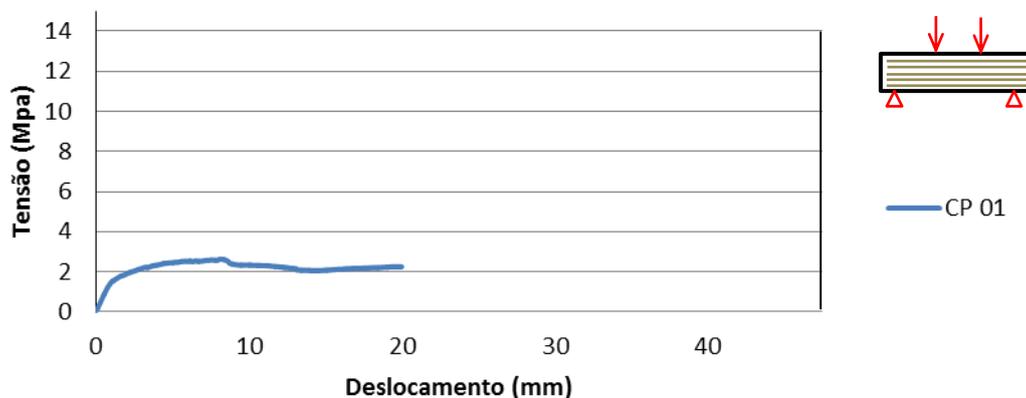


Figura 37. Efeito do tipo de reforço sobre o comportamento à flexão. Placa Fx-U5/T1-5C  
Fonte: O autor.

Os ensaios de flexão em quatro pontos realizados nas placas F-U5/T5-1C, F-U15/T0-1C, Fx-U5/T1-4C e Fx-U5/T1-5C, não obtiveram os resultados significativos como na placa Fx-U5/T1-3C, pois houve uma deficiência no processo de moldagem, que acarretou uma deficiência na cura da primeira camada de matriz na parte inferior das placas, onde praticamente não existia matriz após a cura. Desta forma as placas deformavam muito sem fissurar e sem atingir os valores de resistências adequados.

Na tabela 7 podemos observar o resumo do comportamento das placas quando submetidas à flexão. Nela estão expostas a Tensão Crítica que é a tensão na qual surge a primeira fissura detectada pela máquina de ensaio universal, que nem sempre é visível mesmo com a utilização da câmera fotográfica com resolução de 5 megapixel, além da tensão máxima, da deformação na tensão crítica, e da deformação na tensão máxima.

Tabela 7. Comportamento das placas quando submetidas à flexão.

<b>Placa</b>	<b>Tensão Crítica (MPa)</b>	<b>Tensão Máx (MPa)</b>	<b>Def. Específica na Tensão Crítica (mm/mm)</b>	<b>Def. Específica (mm/mm)</b>
F-U5/T5-1C / CP 01	0,156	2,925	0,068	10,143
Fx-U5/T1-3C / CP 01	3,609	6,476	2,687	20,680
Fx-U5/T1-3C / CP 02	3,233	13,308	1,246	40,652
Fx-U5/T1-3C / CP 03	3,198	11,541	0,995	36,174
Fx-U5/T1-4C / CP 01	1,796	5,734	1,242	11,215
Fx-U5/T1-4C / CP 02	1,333	4,027	1,244	19,824
Fx-U5/T1-5C / CP 01	1,609	2,639	1,245	8,158

Fonte: O autor.

Com as informações apresentadas na tabela 7, observa-se que o tipo do tecido de reforço influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. A tensão crítica foi de 0,156 MPa na placa F-U5/T5-1C / CP 01, confeccionada com tecido de

fio 700, para 3,609 MPa na placa Fx-U5/T1-3C / CP 01, confeccionada com tecido de feixes de fibras. A tensão máxima foi de 2,925 MPa na placa F-U5/T5-1C / CP 01, confeccionada com tecido de fio 700, para 13,308 MPa na placa Fx-U5/T1-3C / CP 02, confeccionada com tecido de feixes de fibras.

### **3.6 Definição do reforço: Tipo de tecido, quantidade de camadas e disposição das camadas.**

Com base no comportamento mecânico apresentado pelas placas nos estudos preliminares, percebe-se que para a matriz cimentícia e o método de moldagem utilizado, o tecido que obteve melhores resultados foi o confeccionado com feixes de fibras de sisal. Com este tecido conseguiu-se uma melhor impregnação pela matriz, maior tenacidade e resistência à flexão, maior número de fissuras, fissuras estas que mantinham um espaçamento de forma mais uniforme que as fissuras das placas moldadas com os outros dois tipos de tecidos.

Desta forma decidimos aprofundar os estudos, melhorando o processo de conformação dos compósitos, utilizando apenas o tecido confeccionado com feixes de fibras de sisal, modificando o número de camadas de reforço e também a forma de sua disposição. A moldagem foi realizada de forma a obter os melhores resultados de desempenho dos compósitos.

Como todas as placas foram moldadas com o mesmo tipo de tecido confeccionado com feixe de fibras de sisal, com espaçamento no urdume de 5 mm, e na trama de 1 mm, utilizamos a denominação “Fx” para designá-lo. Já para quantidade de camadas de reforço usamos “nC”. O “ \* ” indica que cada camada de reforço era composta por duas camadas de tecido sobrepostas. As quantidades de camadas de reforço estão listadas na tabela 8.

Tabela 8. Tipo de tecido e quantidade de camadas nos compósitos.

<b>Designação</b>	<b>Massa Específica (g/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº de Camadas de Reforço</b>	<b>Volume de Reforço</b>
Fx1C	0,0251	1	2,91%
Fx2C	0,0221	2	4,11%
Fx3C	0,0207	3	5,48%
Fx4C	0,0242	4	9,30%
Fx5C	0,0237	5	10,46%
Fx2C*	0,0266	2	10,74%

Fonte: O autor.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Ensaio de tração nas fibras

Foram submetidas ao ensaio de tração direta vinte fibras retiradas aleatoriamente dos feixes que compunham o tecido.

A rigidez foi calculada com valores obtidos da curva “Tensão X Deformação Específica”. Os valores utilizados para o cálculo da rigidez estavam situados a 20% e 80% da tensão máxima, no trecho linear da curva onde a fibra ainda apresentava um comportamento elástico. A deformação específica foi calculada com o deslocamento da garra. Na figura 38 observa-se a variabilidade das curvas obtidas nos ensaios de tração, onde o comportamento da fibra de sisal manifesta-se primeiramente com deformação elástica, alcançando um aumento da tensão e da deformação até o ponto de ruptura, comportamento este característico de fibras vegetais (Caldas, 2014).

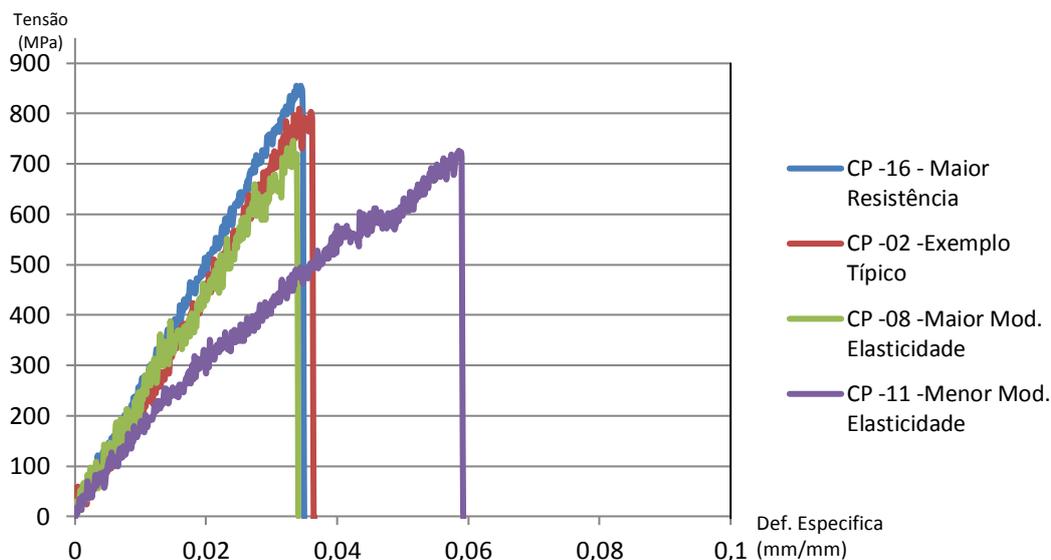


Figura 38. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nas fibras de sisal. Área calculada através da massa.  
Fonte: O autor.

Os resultados médios, desvios padrões e coeficientes de variação, das variáveis: área, deformação específica, rigidez e resistência à tração, são exibidos na Tabela 9.

Tabela 9. Ensaio de tração nas fibras. Área calculada através da massa.

N= 20	Área (mm <sup>2</sup> )	Deformação		
		Específica na Ruptura (mm/mm)	Resistência à Tração (MPa)	Rigidez (GPa)
Média	10,48 x 10 <sup>-3</sup>	0,03751	722,11	18,99
Desvio Padrão	3,75 x 10 <sup>-3</sup>	0,00605	89,49	3,50
Coef. Variação (%)	35,84	16,13141	12,39	18,43

Fonte: O autor.

As fibras ensaiadas apresentaram um desempenho variado tanto nos parâmetros analisados quanto na geometria das curvas “Tensão X Deformação”. Desvios semelhantes das propriedades das fibras quando submetidas à tensão axial podem ser encontrados nos trabalhos de Carvalho (2005), Cerchiaro (2010) e Caldas (2014), onde se supõe a hipótese da heterogeneidade química e física, além das variações de sessão ao longo das fibras naturais, sendo que a parte da folha que se encontra mais próxima ao caule apresenta uma secção maior, mais antiga e com paredes celulares mais robustas. Ainda deve-se observar que as durante o cultivo cada planta pode ser submetida a diferentes variações climáticas, como a quantidade de chuva, variações de temperatura, de umidade, exposição ao sol, além de no desfibramento as fibras sofrerem pré-estiramentos diferentes que modificam seu desempenho, tudo isto resultará nestas variações vistas nas fibras naturais. A resistência à tração média encontrada foi de 722,11MPa, valores superiores aos encontrados por Cerchiaro (2010) de 301 MPa e Caldas. (2014) 606,4 MPa, e o coeficiente de variação de 12,39%, considerado baixo por se tratar de fibras naturais.

Também foram analisados para estas mesmas fibras as curvas “Tensão X Deformação Específica”, com a área calculada pelo diâmetro medido através de um microscópio ótico ao invés de ser calculada pela massa. Os resultados são apresentados na figura 39, e na tabela 10.

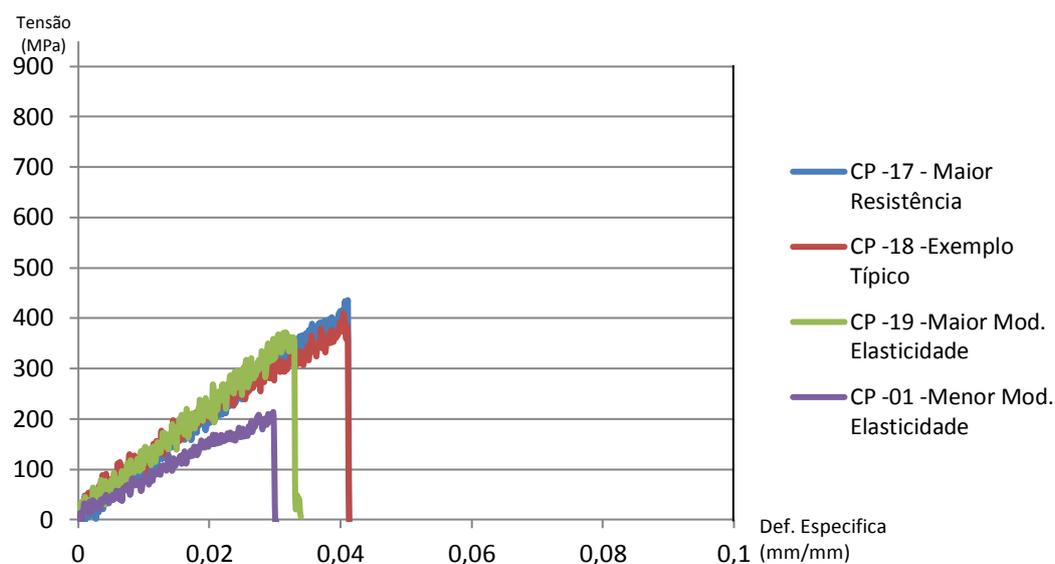


Figura 39. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nas fibras de sisal. Diâmetro medido através de microscópio.  
Fonte: O autor.

Tabela 10. Ensaio de tração nas fibras. Diâmetro medido no microscópio.

N= 20	Área (mm <sup>2</sup> )	Deformação Específica (mm/mm)	Resistência (MPa)	Rigidez (GPa)
Média	24,13 x 10 <sup>-3</sup>	0,03751	302,53	7,72
Desvio Padrão	11,99 x 10 <sup>-3</sup>	0,00605	79,01	1,77
Coef. Variação (%)	49,68	16,13141	26,12	22,95

Fonte: O autor.

Observa-se neste caso uma grande redução nos valores de resistência máxima à tração, pois quando calculamos a área através da massa é utilizada apenas a área de sólidos presentes na fibra, porém quando medimos o diâmetro pelo microscópio, este indicará não somente os sólidos presentes mas também os vazios. Outro detalhe também é que os corpos de prova com maior área calculada pela massa, nem sempre terão os maiores diâmetros vistos pelo microscópio, desta forma a maior resistência à tração quando utilizado o método da massa foi alcançada pelo corpo de prova 16, enquanto no método do microscópio foi o corpo de prova 17. Isto também vale para os cálculos da rigidez.

Vale ressaltar que também existe outra maneira para determinar a área da seção transversal da fibra de sisal através da massa, que ao invés de utilizar-se a massa específica medida por picnometria a gás hélio, utiliza-se a massa específica aparente que varia entre  $0,90 \text{ g/cm}^3$  a  $0,95 \text{ g/cm}^3$ . Desta forma os resultados dos ensaios de tração ficariam mais próximos aos obtidos quando se utiliza o diâmetro equivalente medido no microscópio.

## 4.2 Ensaio de tração nos feixes

Foram submetidos ao ensaio de tração direta vinte feixes de fibras retirados aleatoriamente do tecido de sisal.

A rigidez foi calculada com valores obtidos da curva “Tensão X Deformação Específica”. Os valores utilizados para o cálculo da rigidez estavam situados a 20% e 80% da tensão de primeira ruptura, no trecho linear da curva onde a fibra ainda apresentava um comportamento elástico. Na figura 40 observa-se a variabilidade das curvas obtidas nos ensaios de tração, onde o comportamento do feixe de sisal pode ser dividido em duas fases: na primeira ocorre uma acomodação das fibras que compõem o feixe com um ganho crescente de rigidez até a primeira ruptura, após a primeira ruptura inicia-se a segunda fase onde ocorre a ruptura das outras fibras sequencialmente.

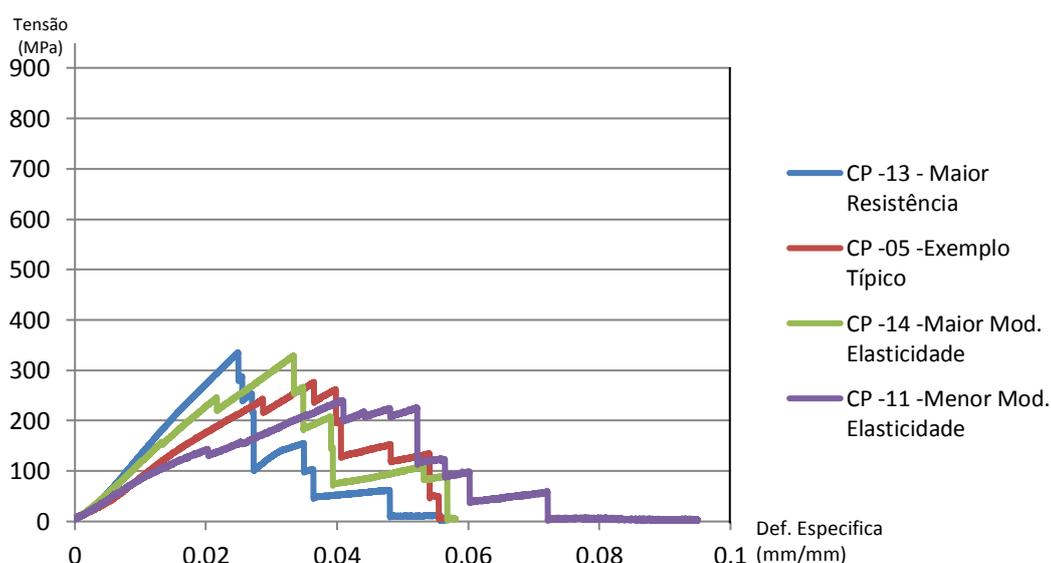


Figura 40. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nos feixes de sisal.

Fonte: O autor.

É interessante observar que na maioria dos feixes analisados ocorreu um aumento da resistência mesmo após a primeira fissura, com um decréscimo posterior à medida que mais fibras foram se rompendo (Caldas, 2014). Assim como no ensaio das fibras a área dos feixes foi obtida pela massa específica.

Os resultados médios, desvios padrões e coeficiente de variação, das variáveis: área, força máxima, rigidez e resistência à tração, são exibidos na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados do ensaio de tração nos feixes de sisal.

<b>N= 20</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformação Específica (mm/mm)</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Rigidez (GPa)</b>
Média	169,87 x 10 <sup>-3</sup>	0,05978	276,50	9,35
Desvio Padrão	46,96 x 10 <sup>-3</sup>	0,00727	37,45	1,42
Coef. Variação (%)	27,64	12,15931	13,54	15,22

Fonte: O autor.

A resistência média obtida no ensaio de tração de 276,50 MPa foi inferior a obtida por Caldas (2014) que obteve valor médio de 361,8 MPa. Para os resultados de rigidez os valores também foram inferiores aos obtidos por Caldas (2014) que obteve valores médios de 13,1 GPa, a diferença dos resultados pode ser atribuída às torções aplicadas na confecção dos fios utilizados por Caldas (2014), já que os feixes utilizados neste trabalho eram simples sem torção.

Comparando os feixes com as fibras, observa-se que estes apresentam uma redução dos valores médios do desempenho mecânico, que pode ser explicado pelo fato dos feixes serem formados por múltiplas fibras, assim quando ocorre a ruptura de cada fibra a área da secção transversal do feixe diminui e não é considerada esta nova área no cálculo das tensões. Os valores dos desvios padrão e dos coeficientes de variação também foram reduzidos, pois como cada feixe é formado por aproximadamente 10 fibras, este número maior de fibras acaba proporcionando uma compensação estatística.

### 4.3 Ensaio de tração nos tecidos

Foram submetidos ao ensaio de tração direta vinte amostras do tecido confeccionado com feixes de sisal retiradas aleatoriamente. Estes ensaios tiveram como finalidade comparar os valores com os das fibras e dos feixes que o compõem. Na Figura 41 apresentam-se as curvas de “Tensão X Deformação Específica” obtidas nos ensaios.

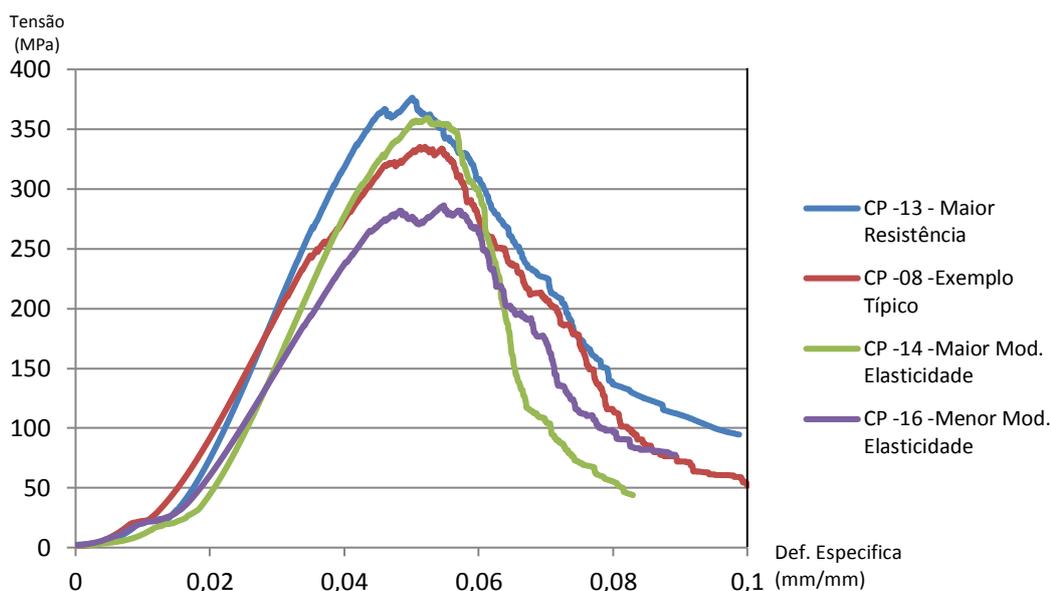


Figura 41. Curvas tensão x deformação específica do ensaio de tração nos tecidos de sisal.  
Fonte: O autor.

Os resultados médios, desvios padrões e coeficiente de variação, das variáveis: área, força máxima, rigidez e resistência à tração, são exibidos na Tabela 12.

Tabela 12. Resultados do ensaio de tração nos tecidos de sisal.

<b>N= 20</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Def. Esp. na Tensão Máxima (mm/mm)</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Rigidez (GPa)</b>
Média	4,96	0,05195	335,77	8,32
Desvio Padrão	0,34	0,00283	26,09	0,78
Coef. Variação (%)	6,89	5,43901	7,77	9,32

Fonte: O autor.

Pode ser observado na tabela 12 que foi obtido um desvio padrão baixo para todas as medidas. Isto ocorreu, pois o tecido utilizado possuía aproximadamente 10 fibras em cada feixe, logo a variação de diâmetros de cada fibra se torna um fator menos relevante, devido à compensação estatística dos diâmetros em torno de um valor médio, deste modo espera-se que este valor esteja bem próximo do valor real para este tecido. Estes valores são superiores ao de Cerchiaro (2010), 145,05 MPa de resistência à tração, e de 6,24 GPa de rigidez.

Pode ser notado que em cada feixe do tecido, as rupturas ocorrem em algumas fibras individuais quando alcançam sua resistência máxima. Esse comportamento ocorre devido às pequenas diferenças no diâmetro, constituição e microestrutura de cada fibra, resultando na variação das tensões máximas suportadas pelo tecido.

Analisando as curvas de “Tensão X Deformação” observa-se quatro fases distintas durante o ensaio de tração:

- Na fase I ocorre uma acomodação das fibras, e pode ser dividida em duas etapas: Na etapa A - ocorre uma acomodação natural das fibras nos feixes do tecido, com um aumento gradual da tensão e da rigidez. Na etapa B observa-se uma ligeira acomodação da curva onde a deformação aumenta sem acréscimo significativo na tensão, isto ocorre, pois neste ponto as fibras da trama que antes estavam desalinhadas por causa do urdume de algodão se realinham devido ao carregamento;
- Na fase II ocorre o aumento da tensão, da deformação e da rigidez, até o início da ruptura das fibras;
- Na fase III inicia-se o processo de ruptura das fibras do tecido
- Na fase IV ocorre um escorregamento entre as fibras dentro dos feixes, pois a maior parte das fibras, senão todas, já romperam. Vale lembrar que a deformação específica média na ruptura das fibras individuais foi de 0,03751 mm/mm. Mesmo considerando a acomodação inicial das fibras na fase I, seriam poucas as fibras

que iriam romper com uma deformação específica acima de 0,06 mm/mm. A figura 42 mostra cada uma das quatro fases.

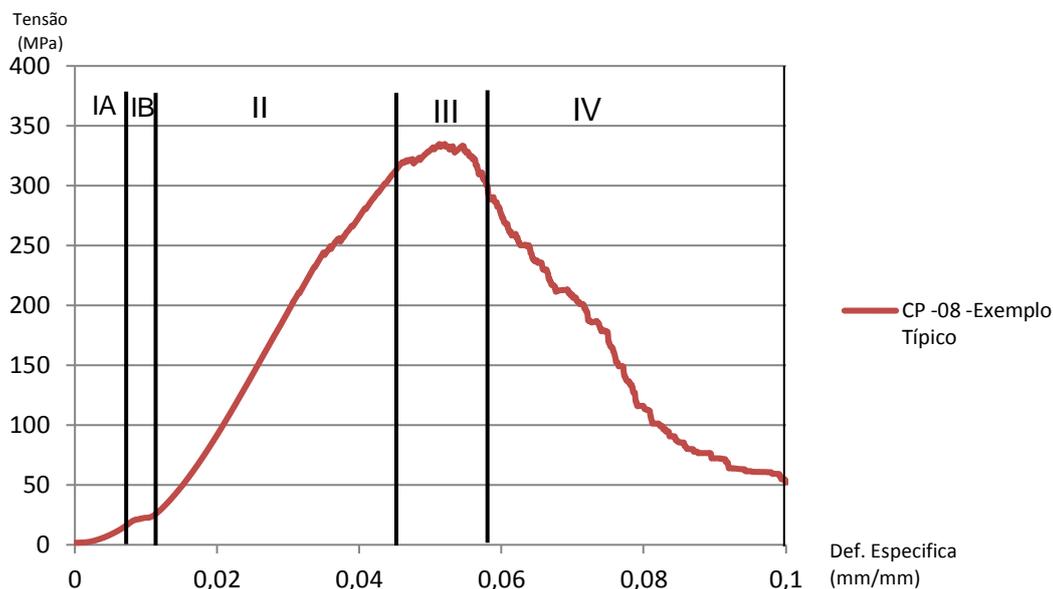


Figura 42. Fases do comportamento do tecido de feixes de sisal submetido à tração.  
Fonte: O autor.

Quando os tecidos são comparados com as fibras os módulos de elasticidade e a resistência à tração são menores que os das fibras, já quando comparados aos feixes a rigidez é inferior, porém sua resistência à tração é superior. Isto deve ocorrer devido à própria conformação dos tecidos, onde os feixes da trama são unidos e organizados por fios de algodão do urdume, que deve proporcionar uma força de atrito lateral entre as fibras que compõem cada feixe e também entre as fibras e o próprio urdume.

Desta forma, mesmo com o rompimento de todas as fibras do tecido, este não se rompe por completo, pois o rompimento de cada fibra não ocorre no mesmo ponto, mas em espaçamentos diferenciados. Como existe um fio de algodão entrelaçando as fibras, a força de atrito lateral mantém o tecido unido, porém com perda de resistência à medida que aumenta o deslocamento.

Nas figuras 43 e 44 encontram-se ilustradas duas fibras de sisal unidas transversalmente por um fio de algodão submetidas à tração. No início as duas fibras estão íntegras, após aplicação de carga observa-se que mesmo após a ruptura das duas fibras, ainda existe uma força de atrito lateral entre as fibras, e também entre as fibras e os fios do urdume, que mantém o sistema com certa resistência à tração.

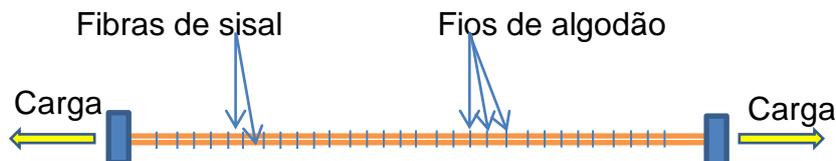


Figura 43. Fibras de sisal entrelaçadas com fios de algodão submetidas à tração.  
Fonte: O autor.

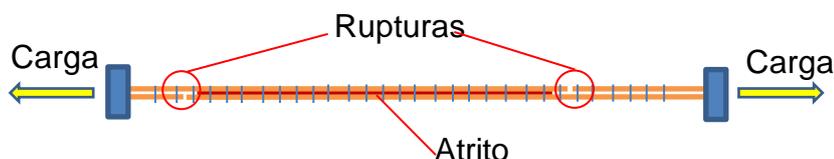


Figura 44. Detalhe das rupturas e da força de atrito lateral entre as fibras.  
Fonte: O autor.

#### 4.4 Ensaio de tração direta nos compósitos

Foram realizados ensaios de tração direta nos compósitos cimentícios reforçados com tecidos de sisal. Utilizou-se quatro corpos de prova para cada um dos seis tipos de placas moldadas. A deformação específica foi calculada com o deslocamento da garra.

Pode-se observar na figura 45 um comportamento semelhante entre as placas, com quatro fases distintas:

- Na fase I o compósito apresenta um comportamento elastoplástico, sem aparecimento de fissuras visíveis mesmo com o auxílio da câmera fotográfica, até que a matriz atinge sua capacidade de carga e surge a primeira fissura detectada pela máquina de ensaio universal, finalizando esta fase com uma queda brusca na tensão;
- Na fase II após o aparecimento da primeira fissura, ocorre um pequeno aumento de sua dimensão até que o reforço de tecido de sisal começa a mostrar sua eficiência suportando cargas adicionais sem que a fissura se propague, logo a tensão que o compósito suporta começa a aumentar, até que em outro ponto

ocorra o aparecimento de uma nova fissura na matriz, com nova redução na carga suportada. Este ciclo de surgimento de fissuras e do combate às mesmas pelo reforço se repete diversas vezes e em intervalos regulares, assim esta fase é conhecida como multifissuração, nesta fase também há uma redução na rigidez;

- Na fase III praticamente não ocorre abertura de novas fissuras, mas o aumento da abertura das fissuras existentes, pois o reforço já não consegue transmitir eficientemente as tensões para outros pontos da matriz, mesmo assim a resistência à tração continua a tendo um aumento significativo na pós-fissuração.
- Na fase IV onde a maior parte das fibras do tecido de sisal utilizado como reforço, senão todas, já sofreram ruptura, iniciando um escorregamento entre as fibras dentro dos feixes, reduzindo a resistência do compósito de forma semelhante com o que ocorre no tecido quando submetido ao ensaio de tração. O comportamento das placas quando submetidas à tração foi semelhante ao encontrado por Olivito *et al.* (2014).

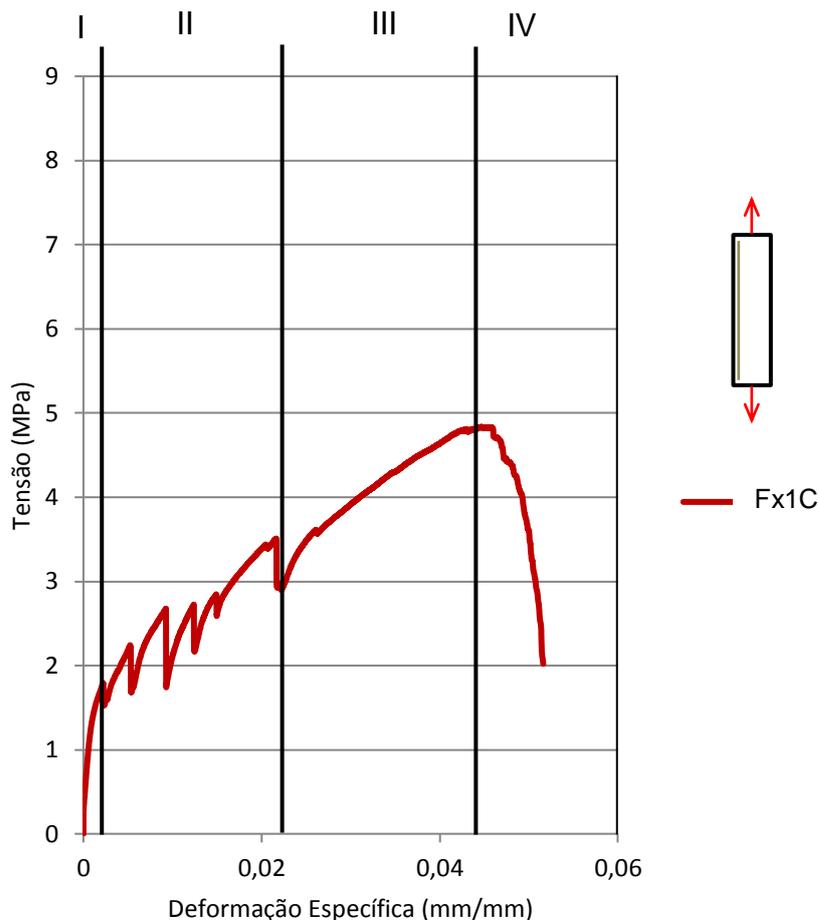


Figura 45. Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração nos compósitos  
Fonte: O autor.

Na figura 46 são apresentadas as curvas típicas de “Tensão X Deformação” para seis tipos de placas. Observa-se que as tensões de primeira e última fissuras das placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C e Fx5C, são diretamente afetadas pelo número de camadas e volume de reforço utilizado na moldagem, a exceção é a placa Fx2C\*, que possui praticamente a mesma quantidade de reforço da placa Fx4C, mas devido à disposição das camadas na placa não obteve o mesmo comportamento.

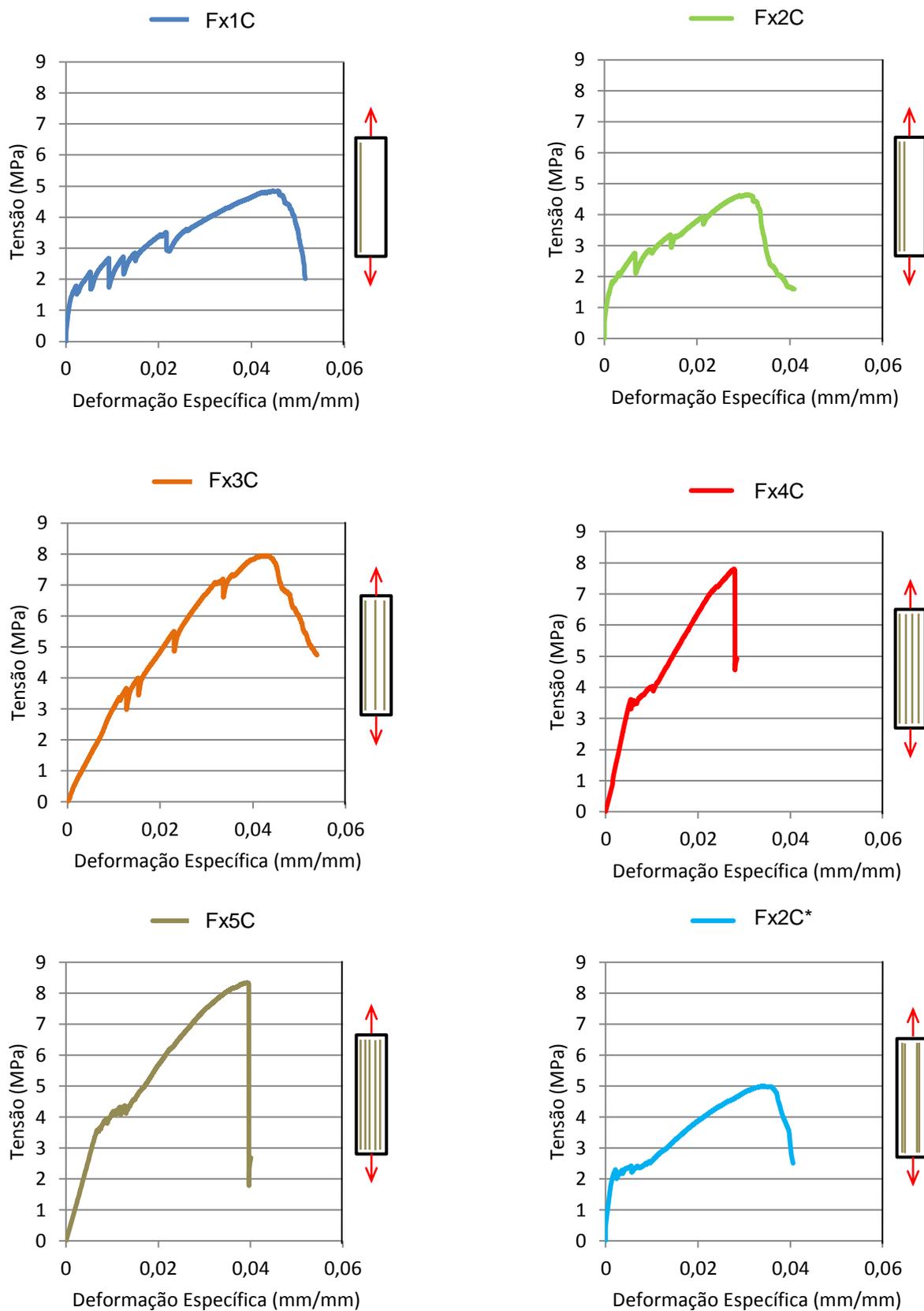


Figura 46. Curvas Típicas de “Tensão x Deformação Específica” do ensaio de tração nos compósitos. Placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C, Fx5C e Fx2C\*.

Fonte: O autor.

Na tabela 13 são exibidos os resultados médios, desvios padrões e coeficiente de variação, das variáveis: tensão crítica (MPa), deformação específica na tensão crítica (mm/mm), tensão máxima (MPa), deformação específica (mm/mm) e rigidez (GPa), obtidos no ensaio de tração direta nos compósitos.

Tabela 13. Resultados do ensaio de tração direta nos compósitos.

Placa		Tensão Crítica (MPa)	Def. Específica Crítica (mm/mm)	Tensão Máx (MPa)	Def. Específica (mm/mm)	Rigidez (MPa)
Fx1C	Média	1,92	0,0026	3,99	0,0438	270,45
	D. Padrão	0,19	0,0005	0,22	0,0088	35,92
	C. Var. (%)	9,77	21,06	5,41	20,14	13,28
Fx2C	Média	3,98	0,0019	4,84	0,0460	212,82
	D. Padrão	0,11	0,0003	0,21	0,0035	119,83
	C. Var. (%)	2,75	15,24	4,38	7,60	56,30
Fx3C	Média	3,37	0,0076	6,89	0,0497	386,39
	D. Padrão	0,47	0,0039	1,92	0,0061	94,77
	C. Var. (%)	14,04	51,71	27,95	12,24	24,53
Fx4C	Média	3,80	0,0079	8,50	0,0291	543,24
	D. Padrão	0,09	0,0003	0,99	0,0021	40,77
	C. Var. (%)	2,27	3,75	11,68	7,29	7,51
Fx5C	Média	3,89	0,0090	7,60	0,0433	402,54
	D. Padrão	0,27	0,0008	0,35	0,0008	68,91
	C. Var. (%)	6,91	9,01	4,57	1,86	17,12
Fx2C*	Média	2,36	0,0064	4,29	0,0414	326,85
	D. Padrão	0,27	0,0011	0,09	0,0034	138,38
	C. Var. (%)	11,48	16,48	2,11	8,20	42,34

Fonte: O autor.

Com as informações contidas na tabela 13, observa-se que a quantidade de reforço influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos compósitos, a tensão crítica vai de 1,92 MPa na placa Fx1C, com uma camada de reforço, para 3,89 MPa na placa Fx5C, com cinco camadas de reforço. Não foi só na tensão crítica que houve ganho de desempenho, as placas também deformaram mais antes do início da fissuração, a deformação específica na tensão crítica passou de 0,0026 (mm/mm) na placa Fx1C, para 0,0090 (mm/mm) na placa Fx5C. A tensão máxima passou de 3,99 MPa na placa Fx1C, para 8,50 MPa na placa Fx4C e a rigidez que na placa Fx1C era 270,45 MPa, chegou aos 543,24 MPa, na placa Fx4C.

Quando comparadas as placas Fx4C, que possui quatro chamados de reforço, com a placa Fx5C com cinco camadas de reforço, observa-se uma pequena perda de desempenho quanto a tensão máxima que caiu 8,50 MPa na placa Fx4C para 7,60 MPa na placa Fx5C, e a rigidez que caiu 543,24 MPa na placa Fx4C para 402,54 MPa na placa Fx5C. Este comportamento não ocorreu devido a ruptura das placas, mas devido ao descolamento do adesivo epóxi em alguns corpos-de-prova, e principalmente pelo destacamento da parte externa da matriz que possuía uma espessura pequena. Isto pode ser sanado aumentando a área de ancoragem dos corpos-de-prova com o aparato metálico desenvolvido para a realização dos ensaios, desta forma seriam encontrados melhores resultados.

Ao comparar a placa Fx4C com a placa Fx2C\*, que cada uma possui quatro camadas tecido para reforço, porém com disposição diferentes na conformação dos compósitos, como descrito no capítulo 3, verifica-se a disposição dos tecidos tem um grande impacto no desempenho dos compósitos com uma grande queda de desempenho em todos os parâmetros da placa Fx4C para a placa Fx2C\*, a tensão crítica vai de 3,80 MPa para 2,36 MPa, deformação específica na tensão crítica passou de 0,0079 (mm/mm) para 0,0064 (mm/mm), a tensão máxima caiu de 8,50 MPa para 4,29 MPa, e a rigidez que era 543,24MPa, chegou aos 326,85 MPa.

Ao comparar os resultados obtidos com os de Olivito *et al.* (2014), que moldou placas com 5 mm e 8 mm de espessura, com volume de reforço de

2,9%, percebe-se que para a placa Fx1C, que possui 2,91% de volume de reforço, obteve a tensão máxima de 3,99 MPa, valor próximo ao de Olivito *et al.* (2014) na placa de 5 mm, com tensão máxima de 3,87 MPa, já a rigidez foi de 270,45 MPa na placa Fx1C, um pouco abaixo aos 350,00 MPa encontrado por Olivito *et al.* (2014). Ao comparar a placa Fx1C com a placa de 8 mm, espessura mais próxima da placa Fx1C, o desempenho fica muito superior ao de Olivito *et al.* (2014), que obteve 2,37 MPa de tensão máxima, com rigidez de 260,00 MPa. Vale ressaltar que com o tipo de tecido utilizado como reforço alcançou-se 9,30% de volume de reforço, com tensão máxima de 8,50 MPa, com rigidez de 543,24 MPa, na placa Fx4C. Valores muito acima aos encontrados por Olivito *et al.* (2014).

Outro parâmetro importante é o número de fissuras, e seus espaçamentos. O número de fissuras no ensaio de tração foi determinado contando a quantidade de fissuras existentes na parte central do compósito, onde não haviam as placas metálicas fixadas com o adesivo epóxi. Foram calculadas as médias dos quatro corpos-de-prova para cada tipo de compósito. Na tabela 14 fica claro que para a espessura de placa e o tipo de reforço utilizado quanto maior a quantidade de camadas de reforço maior é o número de fissuras e menor o espaçamento entre as mesmas.

Tabela 14. Número e espaçamentos das fissuras no ensaio de tração.

<b>Placa</b>	<b>Fx1C</b>	<b>Fx2C</b>	<b>Fx3C</b>	<b>Fx4C</b>	<b>Fx5C</b>	<b>Fx2C*</b>
Número de camadas	1	2	3	4	5	2
Média nº fissuras	5,25	5,5	8,75	12,5	17	6,75
Espaçamento médio entre fissuras (mm)	19,0	18,2	11,4	8,0	5,9	14,8

Fonte: O autor.

As figuras 47 e 48 apresentam os corpos-de-prova durante os ensaios de tração quando os mesmos alcançam a tensão máxima, onde fica claro o melhor desempenho conseguido com o maior número de camadas de reforço. Observa-se que nas placas com menor quantidade de reforço como as placas Fx1C e Fx2C, ocorre uma pequena quantidade de fissuras, com grande espaçamento entre elas 19,0 mm na placa Fx1C e 18,2 mm na placa Fx2C, bem como grandes espessuras das mesmas. Já nas placas Fx4C e Fx5C, a quantidade de fissuras é notadamente superior, o espaçamento entre as mesmas é muito menor 8,0 mm na placa Fx4C e 5,9 mm na placa Fx5C, e a espessura das fissuras é muito menor.

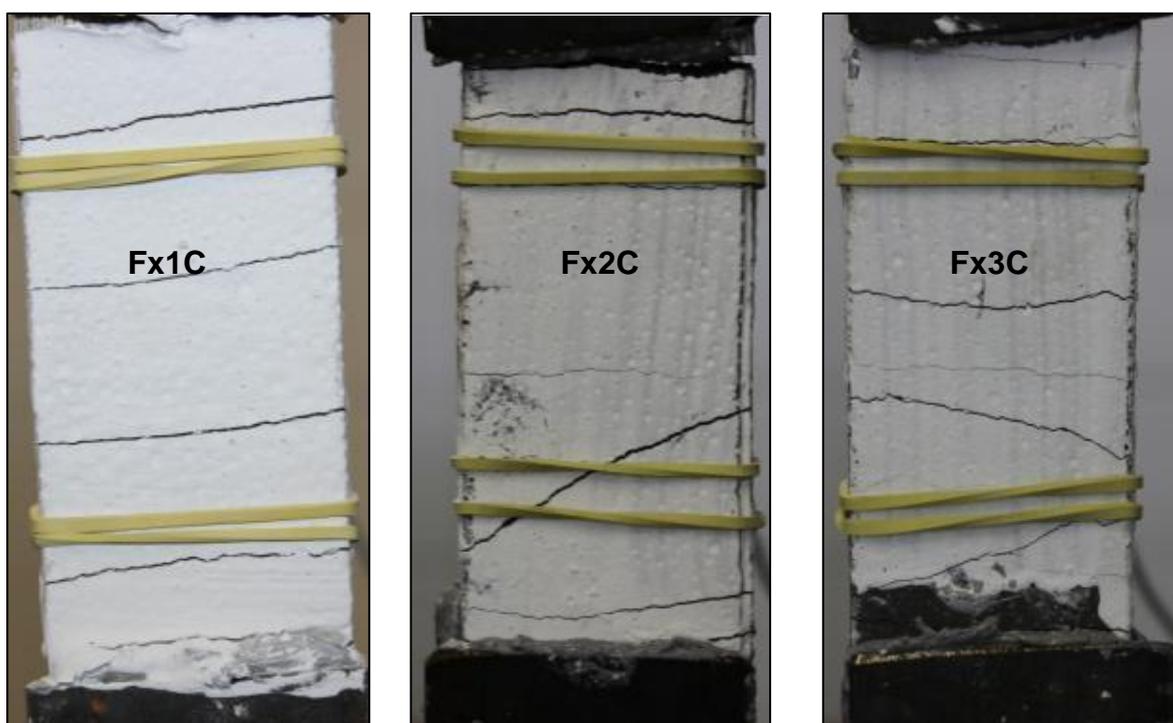


Figura 47. Fissuras nos corpos-de-prova durante o ensaio de tração, Placas Fx1C, Fx2C e Fx3C.

Fonte: O autor.

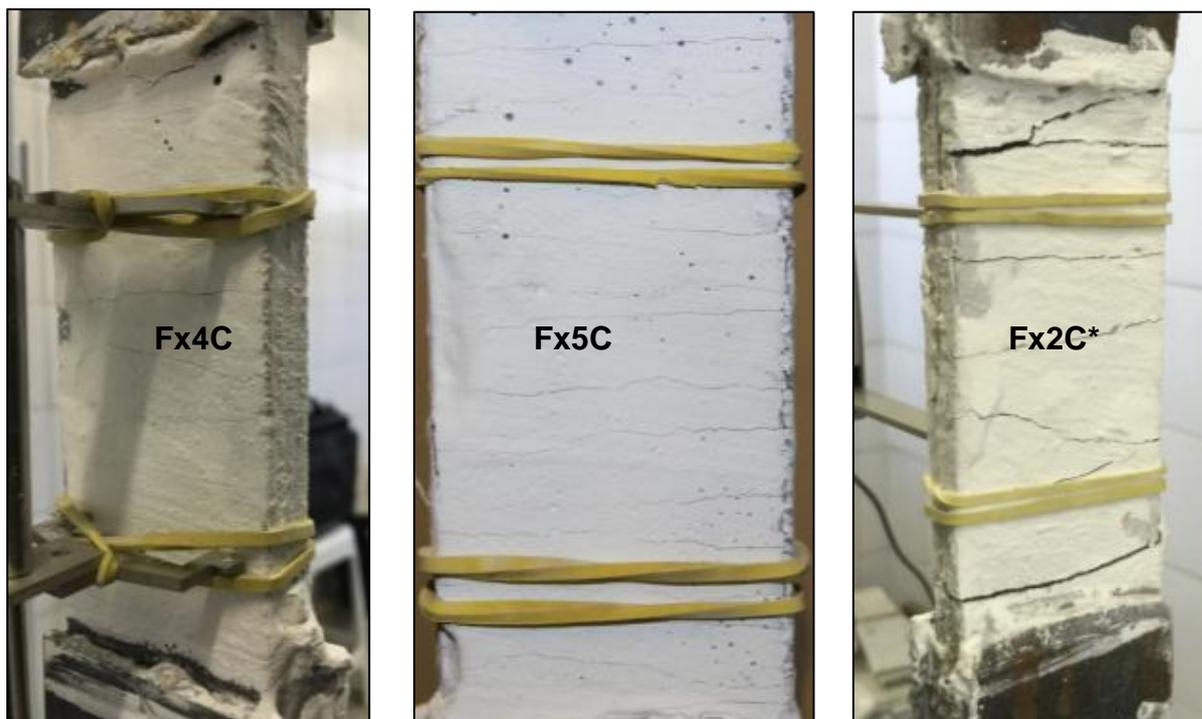


Figura 48. Fissuras nos corpos-de-prova durante o ensaio de tração, Placas Fx4C, Fx5C e Fx2C\*.  
Fonte: O autor.

Este comportamento das placas com Fx4C e Fx5C, significa que houve uma maior interação entre a matriz e o reforço, onde sempre que uma nova fissura na matriz era iniciada o reforço logo conseguia impedir que a mesma continuasse a se propagar e aumentar suas dimensões, então outra fissura surgia e logo era impedida de se expandir pelo reforço. Este ciclo se repetia originando a multifissuração do compósito.

Na figura 48 fica evidente a diferença no padrão de fissuração entre as placas Fx4C e Fx2C\*, que cada uma possui quatro camadas tecido para reforço, porém com disposição diferentes na conformação dos compósitos, como descrito no capítulo 3, comprovando que também a disposição do reforço interfere diretamente no desempenho do compósito.

Algumas placas foram submetidas a um deslocamento maior que o deslocamento na ruptura, para se observar com detalhes a propagação das fissuras, e encontramos dois padrões. No primeiro a fissura se propaga transversalmente à placa, transpondo toda a espessura, como ocorrido nas placas Fx1C, Fx2C e Fx3C. A figura 49 mostra o detalhe desta fissura. No outro padrão, que é o caso da placa Fx2C\*, a fissura se propaga

transversalmente da face até encontrar a camada de reforço, neste ponto ela segue longitudinalmente, separando as camadas de reforço e delaminando o compósito, o detalhe desta fissura pode ser visto na figura 50.



Figura 49. Detalhe da propagação da fissura na placa Fx3C.  
Fonte: O autor.

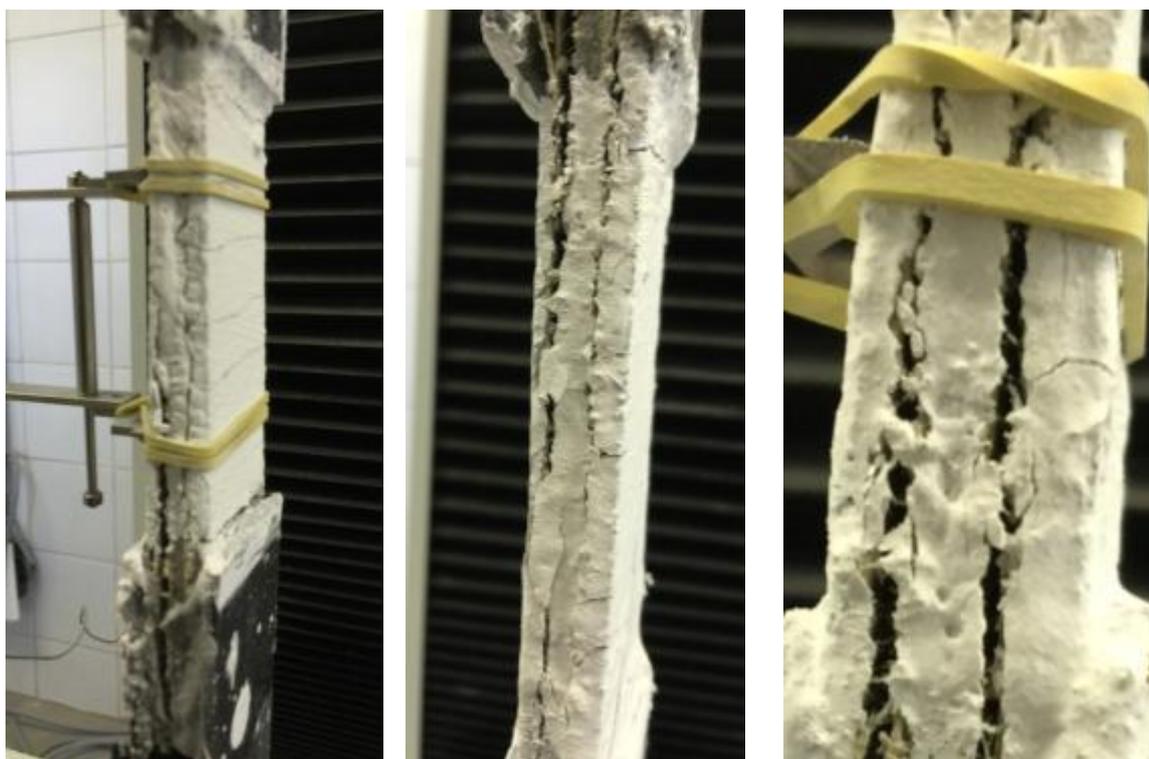


Figura 50. Detalhe da propagação da fissura na placa F.  
Fonte: O autor.

As rupturas nas placas Fx4C e Fx5C ocorreram não pela propagação das fissuras pela placa, mas pelo descolamento do adesivo epóxi em alguns corpos-de-prova, e principalmente pelo destacamento da parte externa da matriz que possuía uma espessura pequena, como pode ser observado nas figuras 51 e 52.

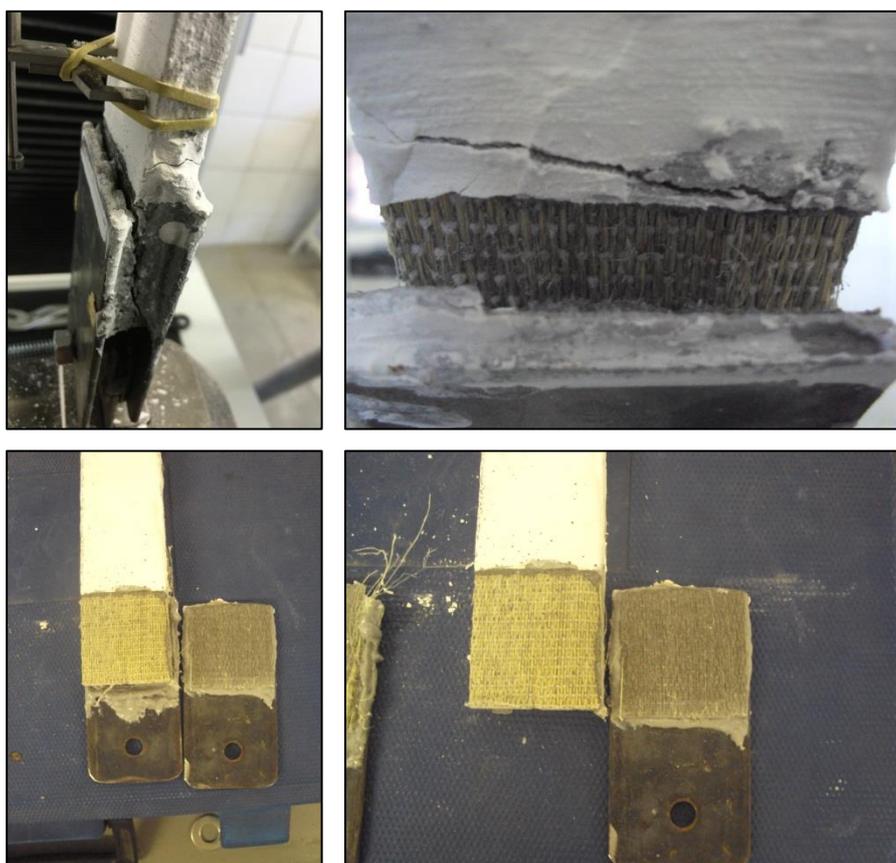


Figura 52. Detalhe do deslocamento da matriz na placa Fx4C.  
Fonte: O autor.

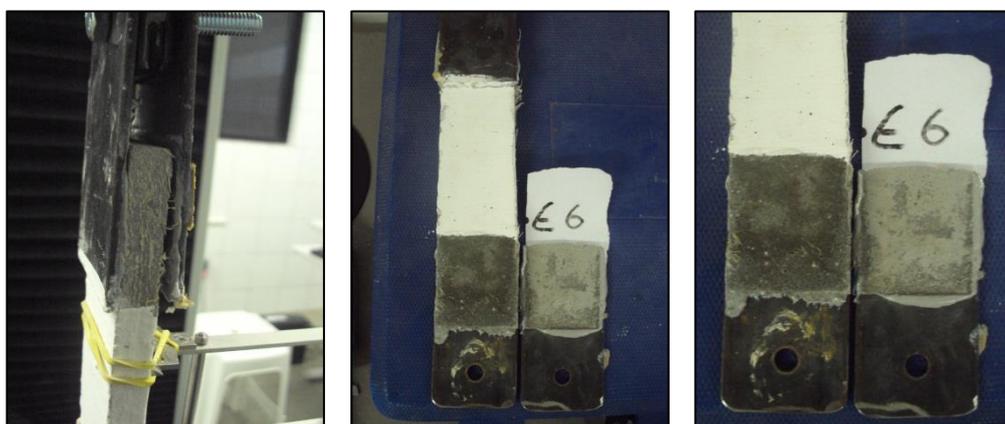


Figura 51. Detalhe do descolamento do adesivo epóxi na placa Fx5C.  
Fonte: O autor.

#### 4.5 Ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos

Foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos nos compósitos cimentícios reforçados com tecidos de sisal. Três corpos de prova foram utilizados para cada um dos seis tipos de placas moldadas.

Pode-se observar na figura 53 o comportamento das placas submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos com quatro fases distintas:

- Na fase I o compósito apresenta um comportamento elastoplástico, sem aparecimento de fissuras visíveis mesmo com o auxílio da câmera fotográfica, até que a matriz atinge sua capacidade de carga e surge a primeira fissura detectada pela máquina de ensaio universal, finalizando esta fase com uma queda na tensão;
- Na fase II após o aparecimento da primeira fissura, ocorre um pequeno aumento de sua dimensão até que o reforço de tecido de sisal comece a mostrar sua eficiência suportando cargas adicionais sem que a fissura se propague, logo a tensão que o compósito suporta começa a aumentar, até que em outro ponto ocorra o aparecimento de uma nova fissura na matriz, com nova redução na carga suportada. Este ciclo de surgimento de fissuras e do combate às mesmas pelo reforço se repete diversas vezes e em intervalos regulares, assim esta fase é conhecida como multifissuração, nesta fase também há redução na rigidez;
- Na fase III praticamente não ocorre abertura de novas fissuras, mas a propagação e aumento da abertura das fissuras existentes, pois o reforço já não consegue transmitir eficientemente as tensões para outros pontos da matriz, mesmo assim a resistência continua a tendo um aumento significativo na pós-fissuração, até alcançar resistência máxima do compósito.

- Na fase IV, após a ruptura do compósito, houve um comportamento de amolecimento devido ao aumento da espessura das fissuras, reduzindo a resistência do compósito. O comportamento das placas quando submetidas ao ensaio de tração em quatro pontos foi semelhante ao encontrado por Melo Filho et al. (2013).

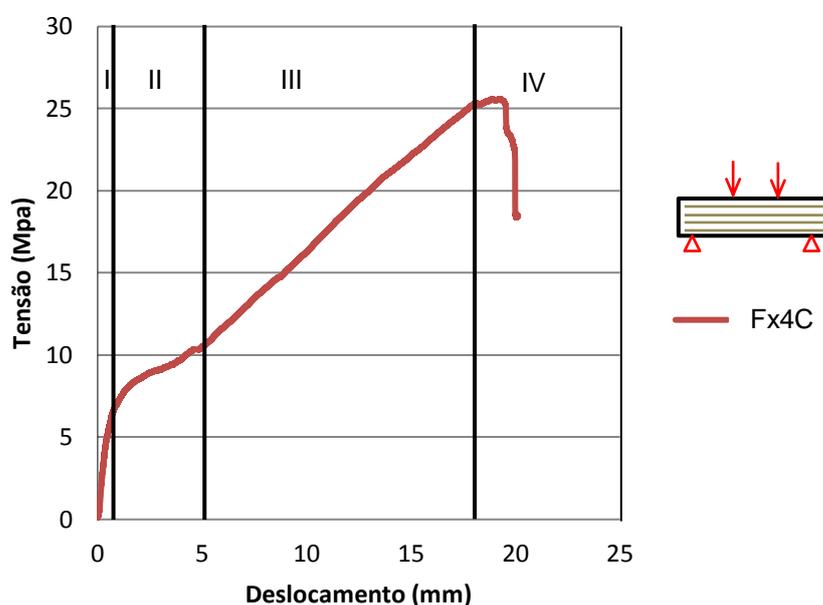


Figura 53. Curva tensão x deslocamento. Ensaio de flexão nos compósitos.  
Fonte: O autor.

Na figura 54 são apresentadas as curvas típicas de “Tensão X Deslocamento” para cada um dos seis tipos de placas. Observa-se que as tensões de primeira fissura e resistência máxima das placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C e Fx5C, são diretamente afetadas pelo número de camadas e volume de reforço utilizado na moldagem, a exceção é a placa Fx2C\*, que possui praticamente a mesma quantidade de reforço da placa Fx4C, mas devido à disposição das camadas na placa não obteve o mesmo comportamento.

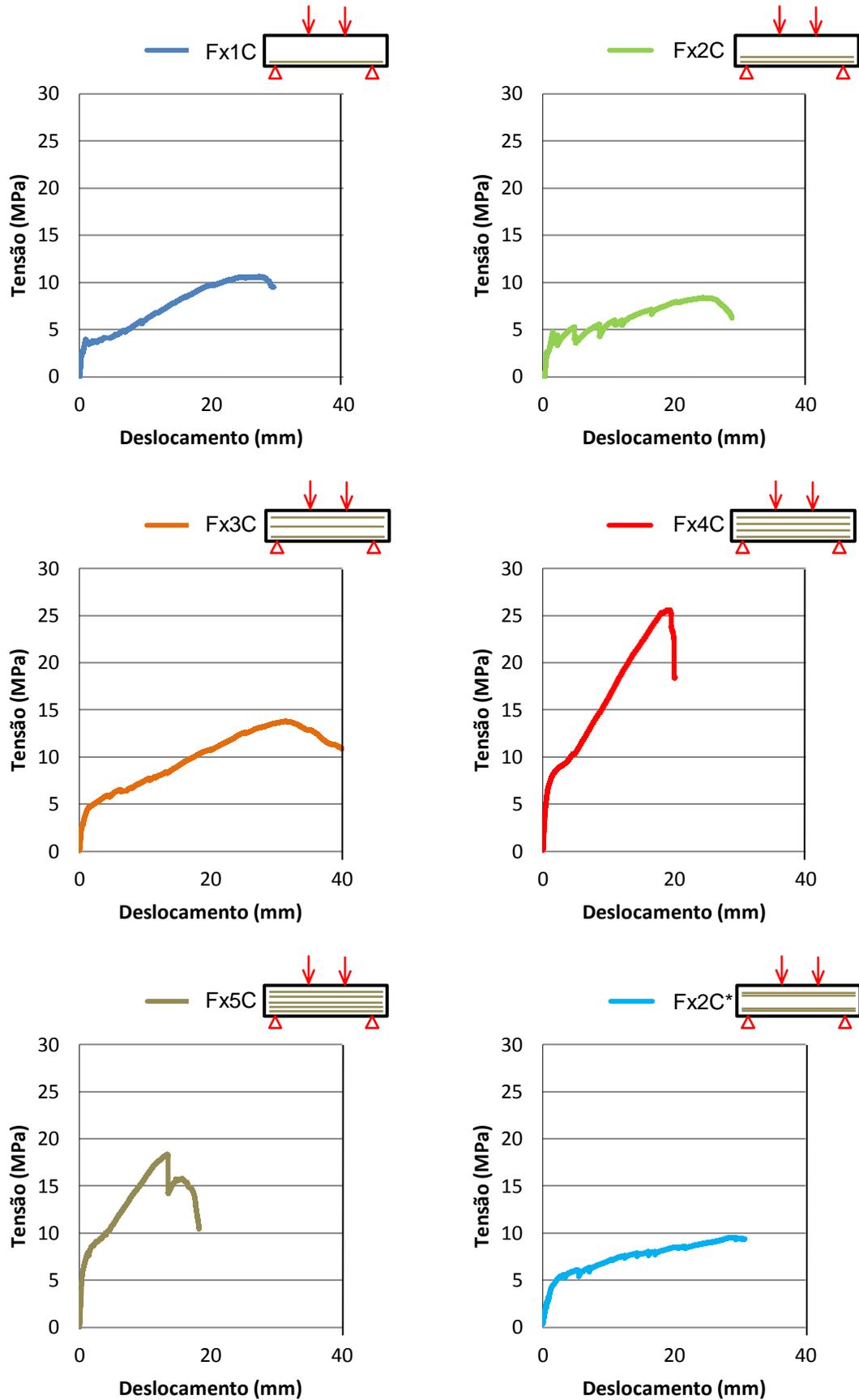


Figura 54. Curvas típicas “Tensão x Deslocamento” do ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos. Placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C, Fx5C e Fx2C\*. Fonte: O autor.

Na tabela 15 são exibidos os resultados médios, desvios padrões e coeficiente de variação, das variáveis: tensão crítica (MPa), deslocamento na tensão crítica (mm), tensão máxima (MPa), deslocamento (mm) e rigidez (GPa), obtidos no ensaio de tração nos compósitos, bem como o número de camadas e o volume de reforço em cada placa.

Tabela 15. Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos.

Placa	Nº de Camadas	Volume de Reforço		Tensão Crítica (MPa)	Desloc.		Desloc. (mm)	E (GPa)
					na tensão Crítica (mm)	Tensão Máx (MPa)		
Fx1C	1	2,91%	Média	2,42	0,38	9,96	59,93	5,62
			D. Padrão	0,04	0,09	0,94	2,01	0,70
			C. V. (%)	1,70	23,28	9,43	3,35	12,44
Fx2C	2	4,11%	Média	2,57	0,70	8,26	36,96	7,44
			D. Padrão	0,05	0,06	0,18	2,95	0,83
			C. V. (%)	2,02	8,73	2,20	7,97	11,14
Fx3C	3	5,48%	Média	2,80	0,43	14,38	38,69	8,30
			D. Padrão	0,26	0,09	0,82	0,87	0,02
			C. V. (%)	9,20	20,84	5,69	2,25	0,27
Fx4C	4	9,30%	Média	3,89	0,31	25,91	30,64	13,09
			D. Padrão	0,01	0,05	0,47	3,56	1,16
			C. V. (%)	0,31	16,11	1,80	11,61	8,82
Fx5C	5	10,46%	Média	4,73	0,39	18,28	27,39	13,26
			D. Padrão	0,26	0,02	0,06	0,18	2,13
			C. V. (%)	5,52	4,98	0,33	0,66	16,07
Fx2C*	2	10,74%	Média	2,10	0,42	9,58	45,56	4,01
			D. Padrão	0,00	0,02	0,04	1,89	0,22
			C. V. (%)	0,02	4,82	0,46	4,16	5,58

Fonte: O autor.

Com as informações contidas na tabela 15, observa-se que a quantidade de reforço influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. A tensão crítica vai de 2,42 MPa na placa Fx1C, com uma camada de reforço, para 4,73 MPa na placa Fx5C, com cinco camadas de reforço, valor um pouco abaixo dos 6,67 MPa encontrado por Melo Filho *et al.* (2013). Na figura 55 pode-se ver a evolução do desempenho na tensão crítica das placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C e Fx5C, à medida que é aumentado o número de camadas de reforço.

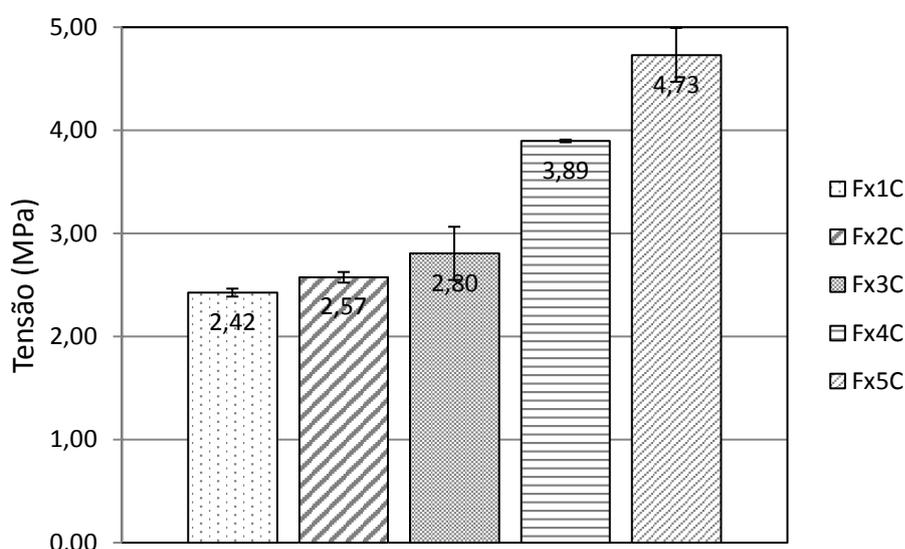


Figura 55. Evolução do desempenho na tensão crítica dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos.

Fonte: O autor.

Não foi só na tensão crítica que houve ganho de desempenho, a tensão máxima passou de 9,96 MPa na placa Fx1C, para 25,91 MPa na placa Fx4C, valor próximo dos 26,86 MPa encontrado por Melo Filho *et al.* (2013). Pode ser visto na figura 56 a evolução do desempenho na resistência máxima à flexão das placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C e Fx5C, à medida que é aumentado o número de camadas de reforço.

Quando comparadas as placas Fx4C, que possui quatro camadas de reforço, com a placa Fx5C com cinco camadas de reforço, observa-se uma perda de desempenho quanto a tensão máxima que caiu 25,91MPa na placa Fx4C para 18,28MPa na placa Fx5C. Neste caso uma maior quantidade de reforço não resultou num aumento de desempenho mecânico uma hipótese para isto é que para a espessura de placa e o tipo de tecido utilizado como

reforço, o número ideal de camadas seria quatro, acima disto o reforço começaria a perder desempenho, pois a camada de argamassa presente entre as camadas de reforço não teria uma espessura adequada para a transmissão dos esforços entre as camadas de reforço.

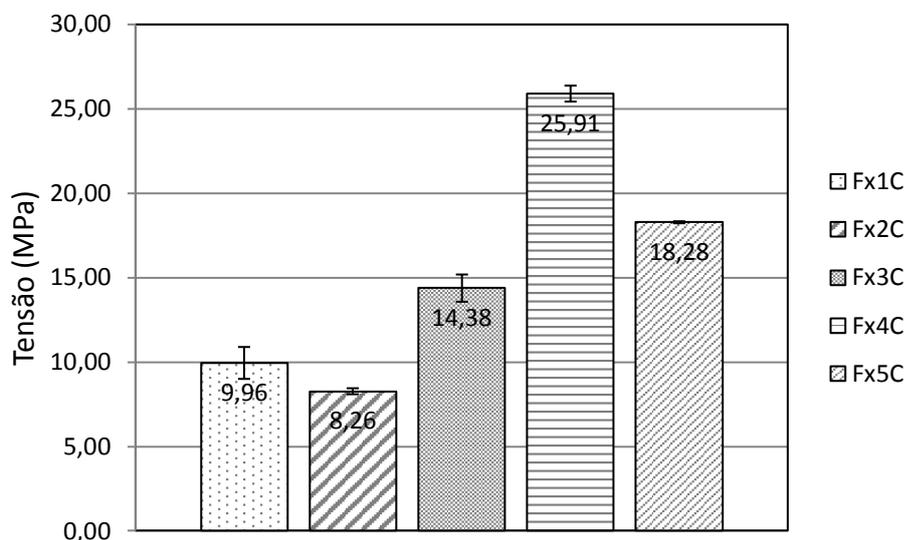


Figura 56. Evolução do desempenho na resistência máxima à flexão dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos.

Fonte: O autor.

As placas também sofreram um menor deslocamento na tensão máxima, que passou de 59,93 mm na placa Fx1C, para 27,39 mm na placa Fx5C, valor próximo dos 26,15 mm encontrado por Melo Filho *et al.* (2013). Na figura 57 observa-se a redução nos deslocamentos nas tensões máximas das placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C e Fx5C, à medida que é aumentado o número de camadas de reforço.

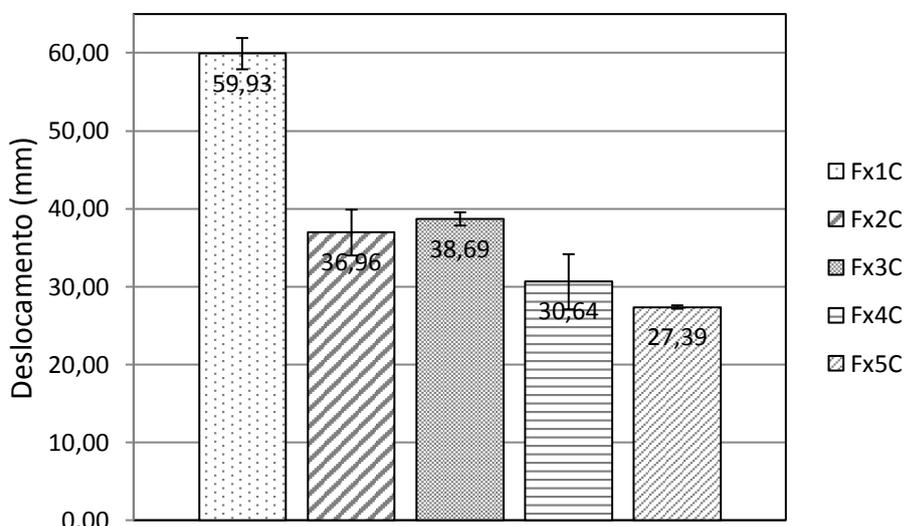


Figura 57. Redução do deslocamento na tensão máxima dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos.

Fonte: O autor.

A rigidez que na placa Fx1C era 5,62 GPa, chegou aos 13,26 GPa, na placa Fx5C. Sua evolução pode ser notada na figura 58.

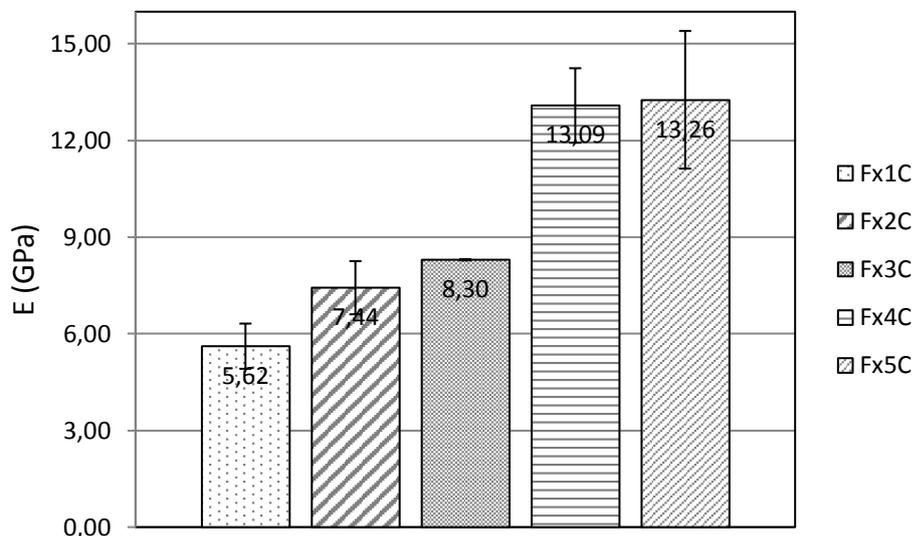
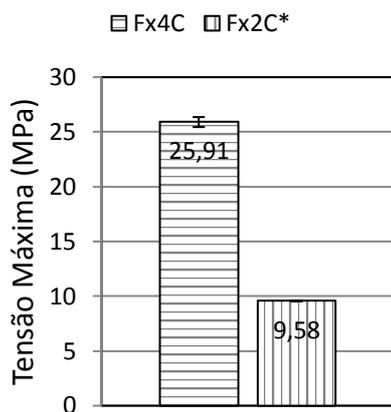


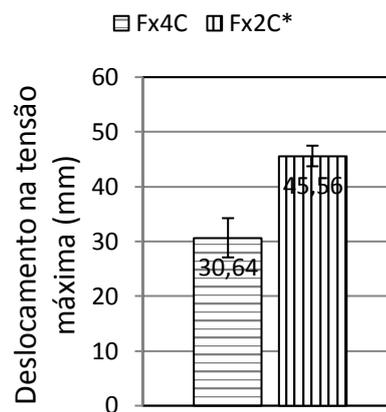
Figura 58. Evolução da rigidez dos compósitos no ensaio de flexão em quatro pontos.  
Fonte: O autor.

As placas Fx4C e Fx2C\* possuem quatro camadas tecido para reforço cada, porém com disposição diferentes na conformação dos compósitos, como descrito no capítulo 3, verifica-se que a disposição dos tecidos tem impacto no desempenho dos compósitos com grande queda de performance em todos os parâmetros da placa Fx4C para a placa Fx2C\*, a tensão crítica vai de 3,89 MPa para 2,10 MPa, deslocamento na tensão crítica passou de 0,31 mm para 0,42 mm, a tensão máxima caiu de 25,91 MPa para 9,58 MPa, deslocamento na tensão máxima passou de 30,64 mm para 45,56 mm, e a rigidez que era 13,09 GPa, chegou aos 4,01 GPa.

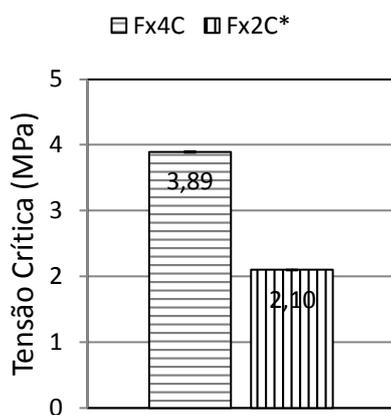
A figura 59 mostra um comparativo do desempenho entre o desempenho das placas Fx4C e Fx2C\* no ensaio de flexão em quatro pontos: A – Tensão Máxima; B – Deslocamento na Tensão Máxima; C – Tensão Crítica; D – Deslocamento na Tensão Crítica; E – Rigidez.



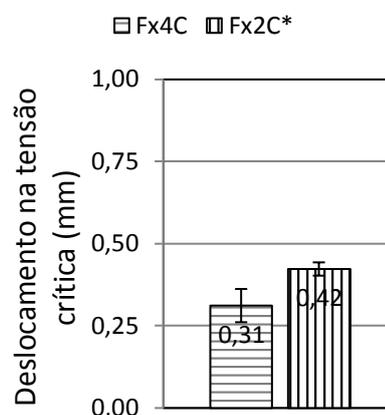
A – Tensão Máxima.



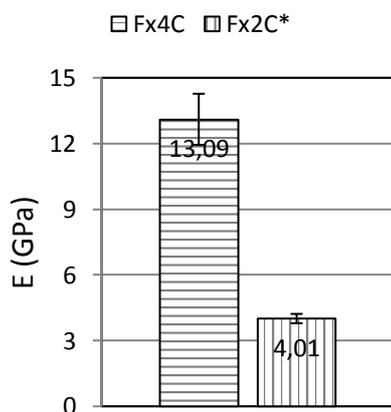
B – Deslocamento na Tensão Máxima.



C – Tensão Crítica.



D – Deslocamento na Tensão Crítica.



E – Rigidez.

Figura 59. Comparação entre as placas Fx4C e Fx2C\* – ensaio de flexão em quatro pontos.  
Fonte: O autor.

O espaçamento médio entre as fissuras também é um parâmetro importante para a avaliação do desempenho dos compósitos. Na tabela 16, observa-se entre as placas Fx2C, Fx3C e Fx4C, que para a espessura de placa e o tipo de reforço utilizado, quanto maior a quantidade de camadas de reforço maior é o número de fissuras e menor o espaçamento entre as mesmas.

Tabela 16. Número de fissuras e espaçamento médio. Ensaio de flexão.

Placa	Fx1C	Fx2C	Fx3C	Fx4C	Fx5C	Fx2C*
Média nº fissuras	14,44	5,56	14,11	20,22	19,11	11,56
Espaçamento médio entre fissuras (mm)	7,04	18,18	7,26	4,95	5,25	9,03

Fonte: O autor.

A figura 60 apresenta os corpos-de-prova durante os ensaios de flexão em quatro pontos quando os mesmos alcançam a tensão máxima, onde fica claro o melhor desempenho conseguido com o maior número de camadas de reforço. Os ensaios foram acompanhados fotograficamente através de uma máquina fotográfica Canon, com resolução de 5 megapixel, acoplada a um computador com software para a captura automática das fotografias. O intervalo programado foi de 30 s entre as capturas. Com as fotografias das placas no momento de ruptura, traçou-se três linhas longitudinais paralelas sobre a mesma, uma no centro e as outras duas nas extremidades, estas linhas estavam delimitadas pelos pontos de carregamento distantes 10 cm um do outro. Desta forma foi possível contar o número de fissuras que interceptavam cada linha para depois calcular a média para cada placa.

Observa-se que nas placas com menor quantidade de reforço como a placa Fx2C, ocorre uma pequena quantidade de fissuras, 5,56 em média, com grande espaçamento entre elas 18,18 mm, bem como grandes espessuras das mesmas. Já na placa Fx4C, a quantidade de fissuras é notadamente superior 20,22 em média, o espaçamento entre as mesmas é muito menor 4,95 mm em média e a espessura das fissuras é mais estreita.

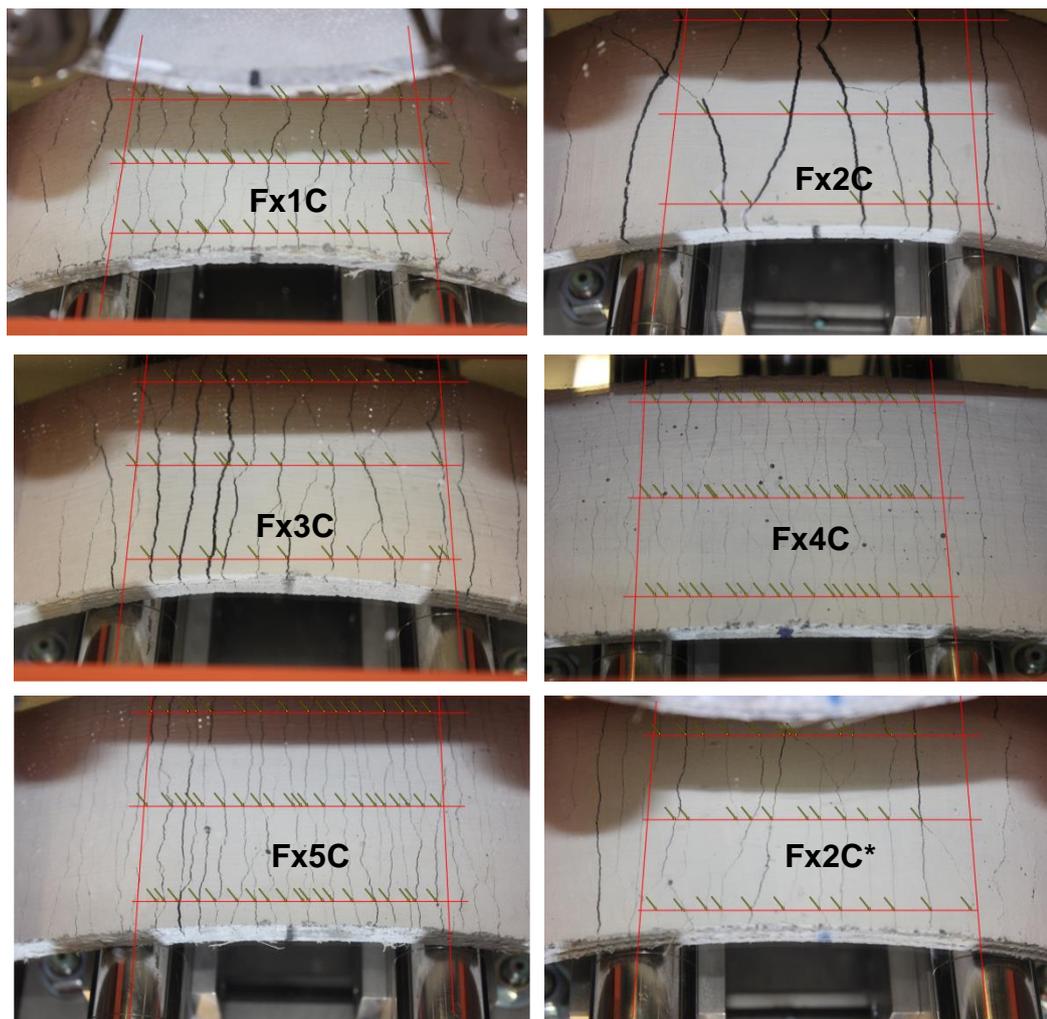


Figura 60. Fissuras nas placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C, Fx5C e Fx2C\*. Ensaio de flexão em quatro pontos.

Fonte: O autor.

Assim como no ensaio de tração direta o comportamento das placas com Fx4C e Fx5C, mostra que houve uma maior interação entre a matriz e o reforço, onde sempre que surgia uma nova fissura na matriz o reforço logo conseguia impedir que a mesma continuasse a se propagar e aumentar suas dimensões, então outra fissura aparecia e logo era impedida de se expandir pelo reforço. Este ciclo se repetia originando múltiplas fissuras no compósito.

As figuras 61 e 62 apresentam a evolução das fissuras nos corpos-de-prova durante os ensaios de flexão em quatro pontos, no início e final do ensaio, e nos deslocamento de 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm e no final do ensaio para as placas Fx1C, Fx2C, e Fx3C, no início e final do ensaio, e nos deslocamento de 5 mm, 10 mm, 20 mm, 25 mm e no final do ensaio para as placas Fx4C, Fx5C, e Fx6C.

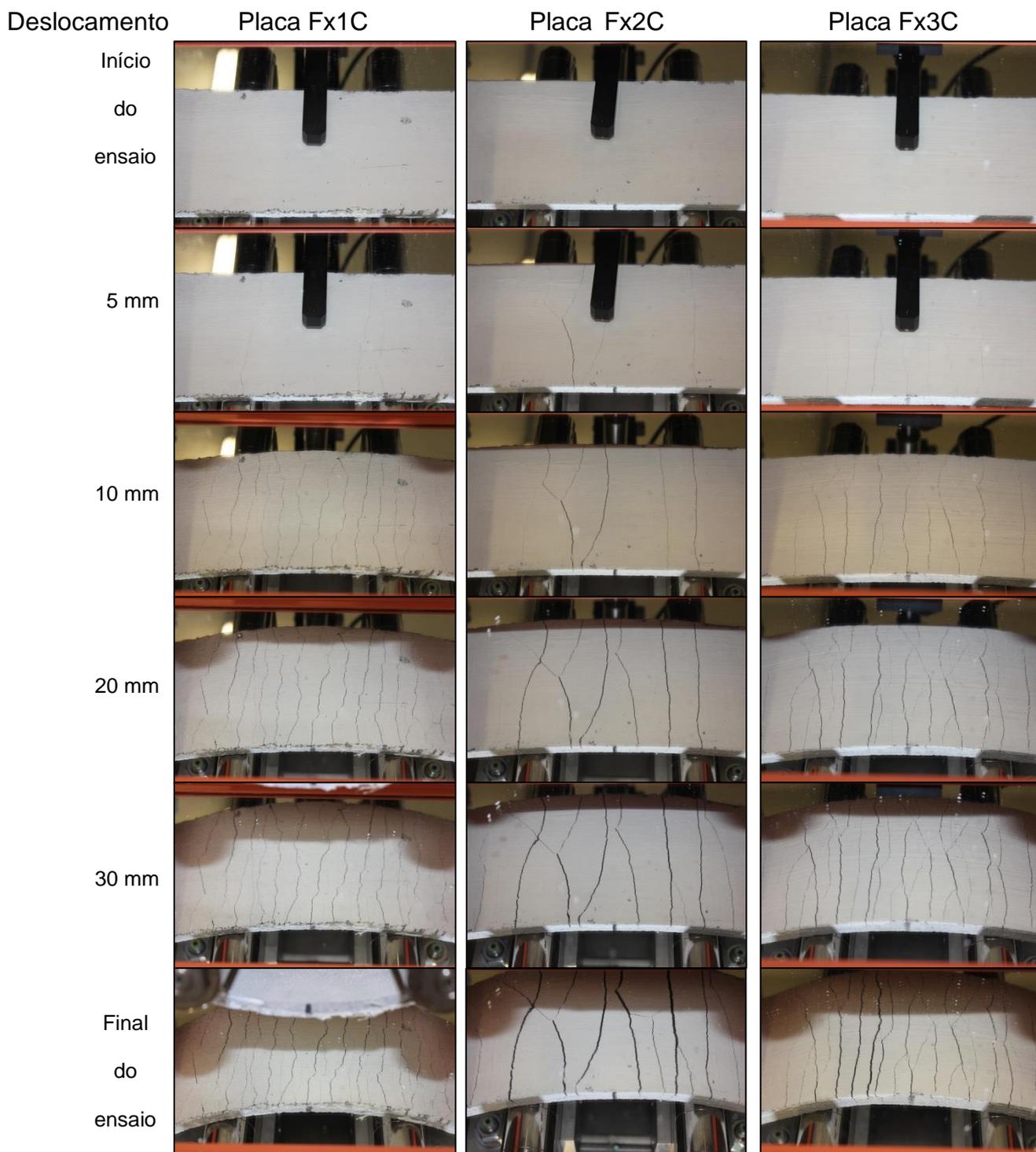


Figura 61. Evolução das fissuras nas placas Fx1C, Fx2C e Fx3C.  
Fonte: O autor.

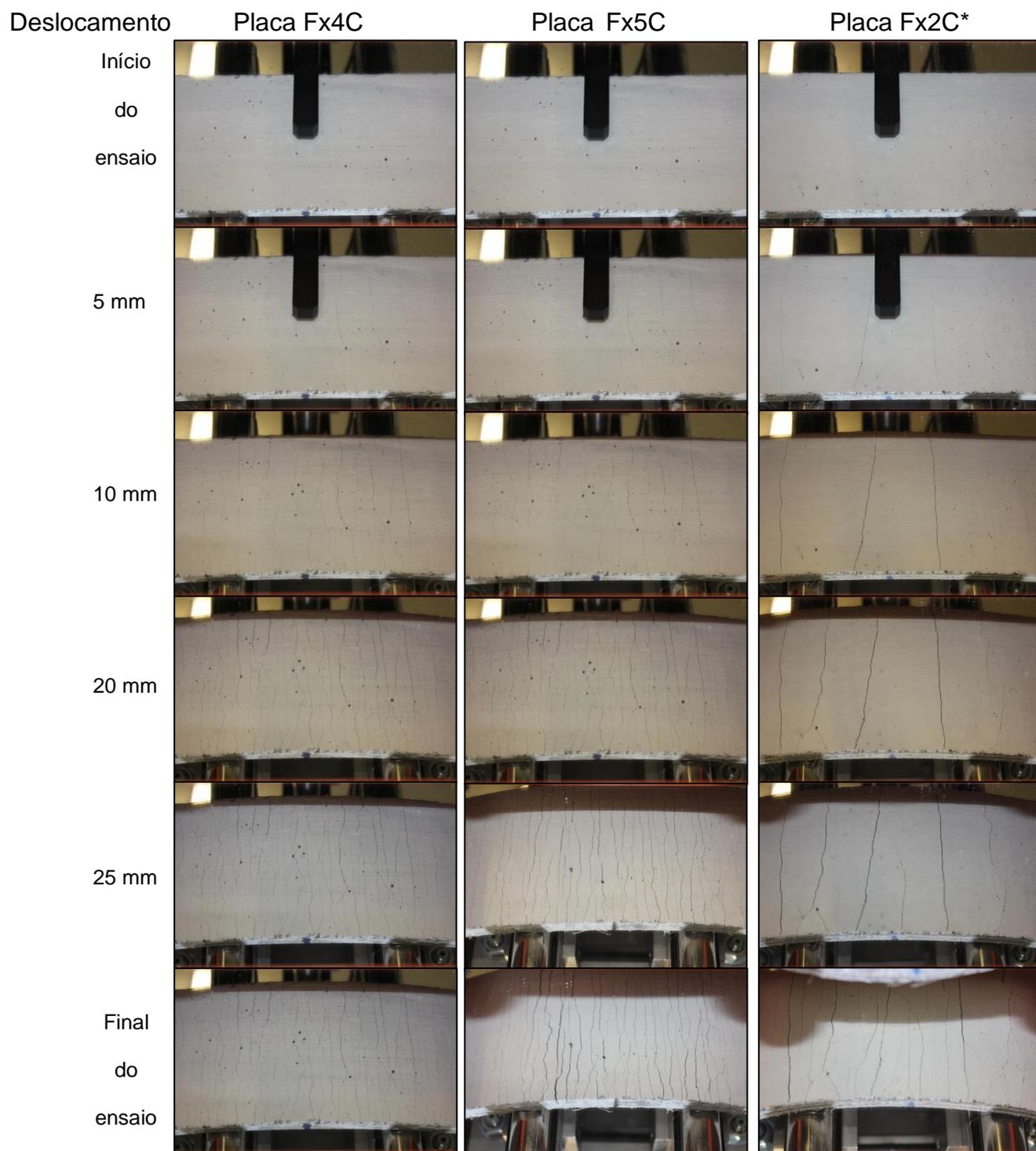


Figura 62. Evolução das fissuras nas placas Fx4C, Fx5C e Fx2C\*.  
Fonte: O autor.

Na figura 62 fica evidente a diferença no padrão de fissuração entre as placas Fx4C, com 20,22 fissuras em média e espaçamento médio de 4,95 mm, e Fx2C\* com 11,56 fissuras em média, e espaçamento médio de 9,03 mm, cada uma possui quatro camadas tecido para reforço, porém com disposição diferentes na conformação dos compósitos, como descrito no capítulo 3, comprovando que também a disposição do reforço interfere diretamente no desempenho do compósito.

A figura 63 mostra a lateral das placas Fx1C, Fx2C, Fx3C, Fx4C, Fx5C e Fx2C\*, no início do ensaio. Com o detalhe para as camadas de reforço.

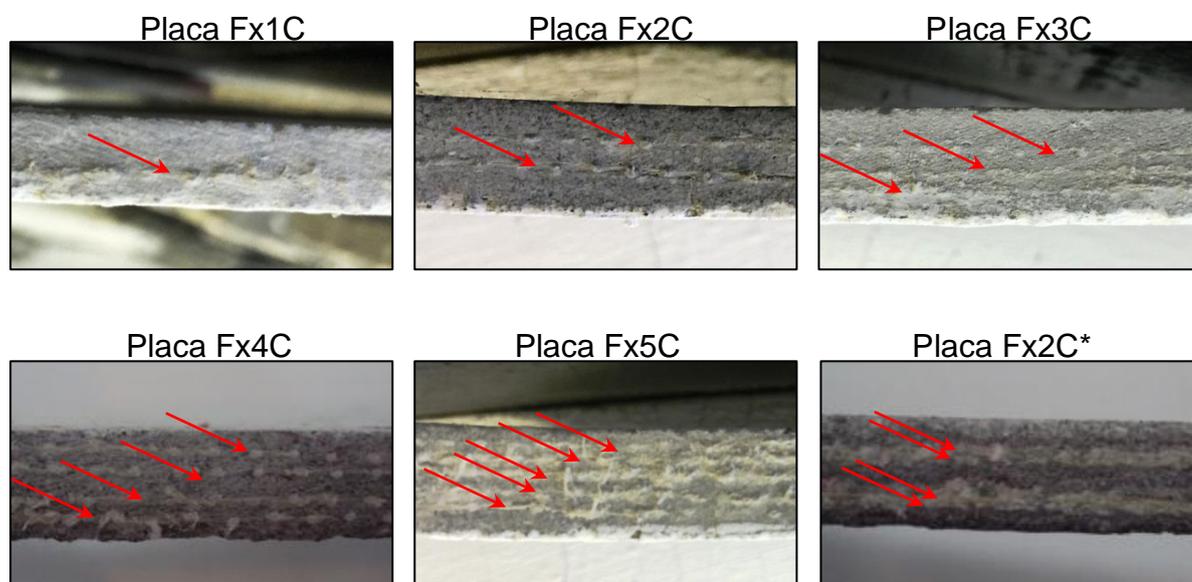


Figura 63. Lateral das placas, com detalhe para as camadas de tecido para reforço.  
Fonte: O autor.

A figura 64 mostra a parte superior das placas após o ensaio de flexão. Ao compararmos as placas Fx2C e Fx3C, que possuem 2 e 3 camadas de reforço respectivamente, com as placas Fx4C e Fx5C, que possuem 4 e 5 camadas, percebemos que as placas com menor quantidade de reforço alcançaram seu limite de resistência sem que as fissuras atingissem a parte superior da placa, ou seja as placas chegaram à resistência máxima ainda na área tracionada sem que a área comprimida da peça contribuísse de forma plena no combate das tensões. Enquanto as placas Fx4C e Fx5C, com maior quantidade de reforço, alcançaram seu limite de resistência quando as fissuras

atingiram a parte superior da placa, ou seja, o reforço contribuiu para que as tensões fossem combatidas também pela a área comprimida da peça.

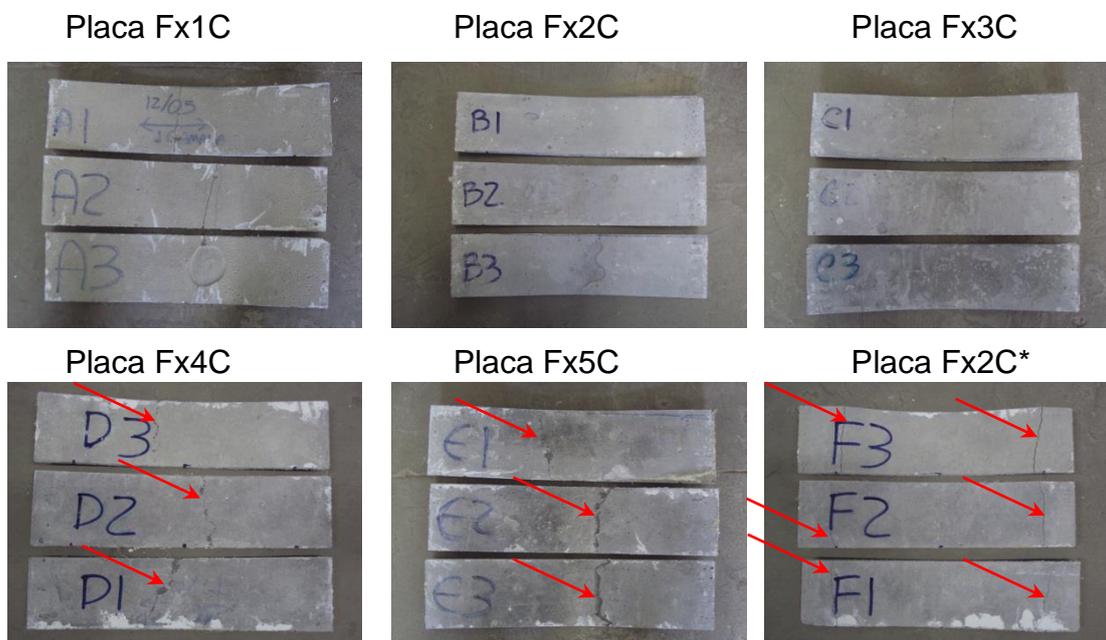


Figura 64. Fissuras na parte superior das placas.  
Fonte: O autor.

Ao comparar as placas Fx4C e Fx2C\*, que possuem a mesma quantidade de camadas de reforço, nota-se a diferença clara entre as fissuras. Enquanto na placa Fx4C existe apenas uma única fissura na parte central, na placa Fx2C\* existem duas fissuras nas extremidades, mais precisamente no local onde estavam posicionados os apoios. Na placa Fx4C as fissuras se propagavam camada a camada até transpassar o compósito, enquanto na placa Fx2C\* a fissura se propagava pela primeira camada da matriz até encontrar o primeiro reforço, a partir daí ela alastrava-se longitudinalmente pelas camadas de reforço, como se houvesse um escorregamento (cisalhamento longitudinal) entre as camadas do tecido de sisal. As tensões também ficavam concentradas na parte superior da placa no local dos apoios, devido a isto as placas fissuravam por cisalhamento. Os detalhes das fissuras podem ser vistos nas figuras 65 e 66.

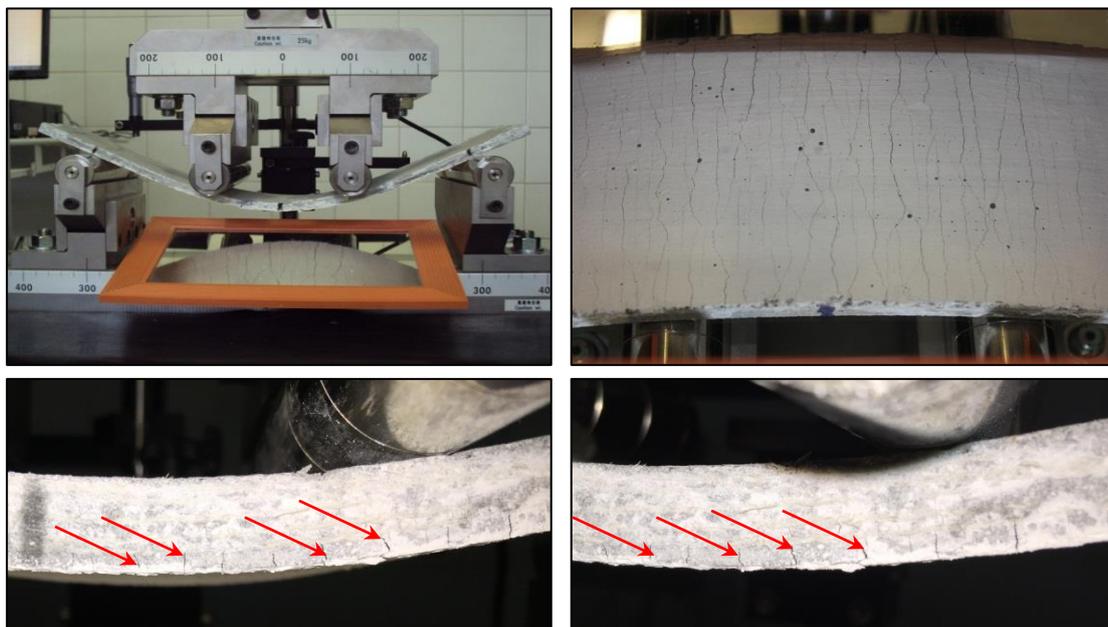


Figura 65. Detalhe da propagação das fissuras na placa Fx4C.  
Fonte: O autor.

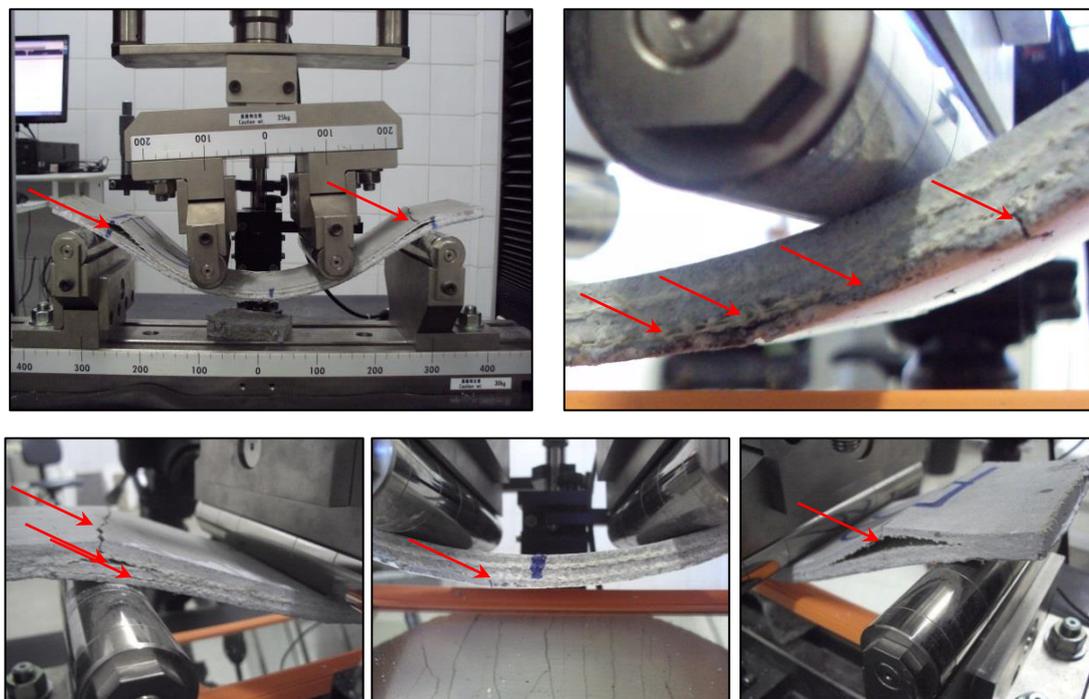


Figura 66. Detalhe da propagação das fissuras na placa Fx2C\*.  
Fonte: O autor.

Em relação à tenacidade também houve melhoria na performance dos compósitos com o aumento do número de camadas de reforço. A tenacidade foi determinada de acordo com a Norma ASTM C1018, onde a área sob a curva “carga x deslocamento” é utilizada para a determinação dos índices de tenacidade I5, I10, I20 e I30. Existe um deslocamento associado para cada índice, este deslocamento é um múltiplo da primeira fissura: para I5 o deslocamento é 3,5 vezes o valor do deslocamento da primeira fissura, 5,5 vezes para I10, 10,5 vezes para I20 e 15,5 vezes para I30. Cada índice é calculado dividindo a área sob a curva “carga x deslocamento” até seu deslocamento respectivo, pela área sob a curva “carga x deslocamento” até o deslocamento da primeira fissura. A figura 67 mostra a definição dos pontos para o cálculo dos índices de tenacidade proposto pela ASTM C1018 (1992).

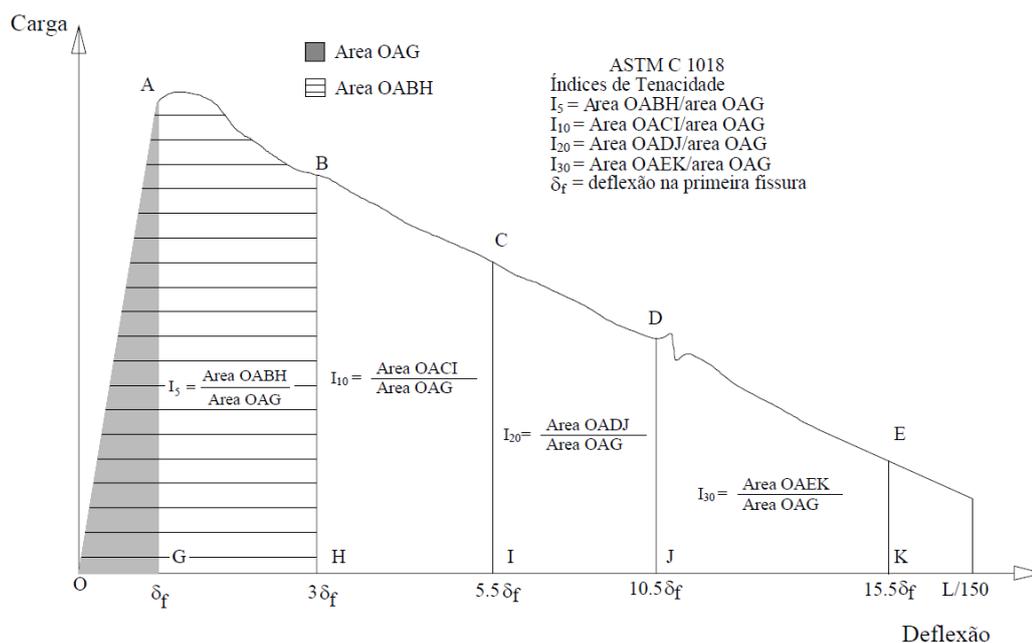


Figura 67. Definição dos pontos para o cálculo dos índices de tenacidade proposto pela ASTM C1018 (1992), Lima (2004).

Na tabela 17 são exibidos os resultados médios, desvios padrões e coeficientes de variação, dos índices de tenacidade I5, I10, I20 e I30, bem como o número de camadas e o volume de reforço em cada placa.

Tabela 17. Índices de Tenacidade.

Placa	Nº de Camadas	Volume de Reforço	Índices de Tenacidade				
			I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>	I <sub>20</sub>	I <sub>30</sub>	
Fx1C	1	2,91%	Média	6,57	15,71	32,00	46,29
			D. Padrão	0,72	1,29	5,35	6,30
			C. Var. (%)	11,01	8,20	16,73	13,60
Fx2C	2	4,11%	Média	4,86	10,23	22,36	36,86
			D. Padrão	0,14	0,49	2,75	4,87
			C. Var. (%)	2,83	4,74	12,28	13,22
Fx3C	3	5,48%	Média	5,64	13,06	29,98	49,28
			D. Padrão	0,47	2,04	5,69	9,48
			C. Var. (%)	8,28	15,62	18,97	19,23
Fx4C	4	9,30%	Média	6,43	15,24	36,27	59,76
			D. Padrão	0,28	0,71	2,49	5,45
			C. Var. (%)	4,36	4,65	6,86	9,12
Fx5C	5	10,46%	Média	6,63	15,54	36,20	59,40
			D. Padrão	0,46	1,44	4,33	6,76
			C. Var. (%)	6,89	9,28	11,96	11,38
Fx2C*	2	10,74%	Média	6,30	16,35	40,05	65,60
			D. Padrão	0,25	0,55	0,87	1,50
			C. Var. (%)	4,00	3,35	2,17	2,28

Fonte: O autor.

Na figura 68 fica fácil a visualização do aumento do desempenho da tenacidade com o aumento do número de camadas de reforço. A exceção é a

placa Fx1C, que apesar de ter apenas uma camada de reforço obteve valores superiores aos das placas Fx2C, nos índices I5, I10, I20 e I30, e C nos índices I5, I10 e I20, isto pode ter ocorrido devido a uma pequena deformação na forma em que a placa A foi moldada, que acabou ficando com uma espessura menor e também pelo fato que por ter apenas uma camada, esta ficou posicionada o mais próxima possível da parte inferior da placa, local que possui a maior concentração de tensões de tração, enquanto nas placas Fx2C e Fx3C as camadas de reforço foram uniformemente distribuídas na espessura da placa.

Comparando as placas Fx4C e Fx2C\*, que possuem a mesma quantidade de camadas de tecido para reforço, verificamos que o arranjo do reforço interfere diretamente no desempenho do compósito. Neste caso o desempenho da placa Fx2C\* foi superior em todos os índices de tenacidade I5, I10, I20 e I30 em relação a placa Fx4C. Porém a análise pura dos números e gráficos não nos leva a uma conclusão adequada, pois como já foi observado na figura 66, a placa Fx2C\* já estava com sua estrutura totalmente comprometida durante a realização do ensaio de flexão em quatro pontos.

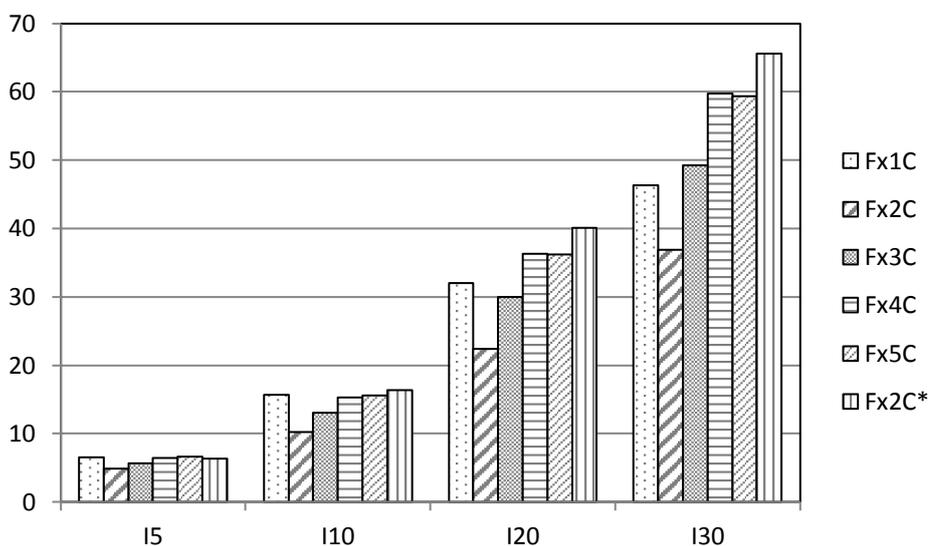


Figura 68. Comparativo dos Índices de Tenacidade.

Fonte: O autor.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um compósito sisal-argamassa a partir de tecidos estruturais que se mostrasse satisfatoriamente resistente aos esforços de tração e flexão, para confecção de placas que possam ter um uso estrutural ou semiestrutural.

A partir dos ensaios mecânicos realizados nos compósitos pode-se afirmar que o tipo de tecido confeccionado com feixes de fibras de sisal desenvolvido por Cerchiaro (2010), obteve melhor desempenho que os dois tecidos feitos com fio de sisal número 700. Este tecido facilitou a impregnação pela matriz, permitiu a moldagem com maior número de camadas de reforço e proporcionou uma boa aderência entre as camadas de matriz e de reforço.

Nos ensaios de tração observou-se que a quantidade de camadas de reforço tem efeito direto no desempenho dos compósitos. A tensão máxima passou de 3,99 MPa na placa Fx1C, com uma camada de reforço, para 8,50 MPa na placa Fx4C, com quatro camadas de reforço, e a rigidez que na placa Fx1C era 270,45 MPa, chegou aos 543,24 MPa, na placa Fx4C. Estes valores são superiores aos encontrados por Olivito *et al.* (2014), que obtiveram a tensão máxima de 2,37 MPa, com rigidez de 260,00 MPa. Em relação à fissuração as placas com maior quantidade de reforço apresentaram o comportamento de multifissuração, com espaçamento na placa Fx5C de 5,9 mm, que possui cinco camadas de reforço, enquanto na placa Fx1C o espaçamento ficou em 19,0 mm.

Nos ensaios de flexão em quatro pontos o comportamento dos compósitos mostra que a quantidade de camadas de reforço tem efeito direto no desempenho dos mesmos. A tensão crítica foi de 2,42 MPa na placa Fx1C, para 4,73 MPa na placa Fx5C, valor um pouco abaixo dos 6,67 MPa encontrado por Melo Filho *et al.* (2013). A tensão máxima passou de 9,96 MPa na placa Fx1C, para 25,91 MPa na placa Fx4C, valor próximo dos 26,86 MPa encontrado por Melo Filho *et al.* (2013). A rigidez que na placa Fx1C era 5,62 GPa, chegou aos 13,26 GPa, na placa Fx5C. Em relação à fissuração as placas com maior quantidade de reforço apresentaram o comportamento de multifissuração, com espaçamento na placa Fx4C de 4,95 mm, que possui

cinco camadas de reforço, enquanto na placa Fx2C o espaçamento ficou em 18,18 mm.

Assim como a quantidade de reforço influencia o desempenho dos compósitos, a disposição das camadas de reforço também tem um papel fundamental. Ao comparar os resultados dos ensaios de flexão das placas Fx4C e Fx2C\*, ambas com quatro camadas de reforço, porém com disposição diferentes na conformação dos compósitos, como descrito no capítulo 3, verifica-se a disposição dos tecidos tem um grande impacto no desempenho dos compósitos, com uma grande queda de performance em todos os parâmetros da placa Fx4C para a placa Fx2C\*. Nos ensaios de flexão a tensão crítica vai de 3,89 MPa para 2,10 MPa, deslocamento na tensão crítica passou de 0,31 (mm) para 0,42 (mm), a tensão máxima caiu de 25,91MPa para 9,58 MPa, deslocamento na tensão máxima passou de 30,64 (mm) para 45,56 (mm), e a rigidez que era 13,09 GPa, chegou aos 4,01 GPa. Nos ensaios de tração a tensão crítica vai de 3,80 MPa para 2,36 MPa, deformação específica na tensão crítica passou de 0,0079 (mm/mm) para 0,0064 (mm/mm), a tensão máxima caiu de 8,50 MPa para 4,29 MPa, e a rigidez que era 543,24MPa, chegou aos 326,85 MPa.

Ocorreu uma melhora direta nos índices de tenacidade I5, I10, I20 e I30, dos compósitos em relação ao aumento do número de camadas de reforço. O arranjo do reforço também interfere índices de tenacidade do compósito. Neste caso o desempenho da placa Fx2C\* foi superior em todos os índices de tenacidade I5, I10, I20 e I30, em relação a placa Fx4C. Porém a análise pura dos números e gráficos não nos traz uma conclusão apropriada, pois como já foi visto na figura 66, a placa Fx2C\* já estava com sua estrutura totalmente comprometida durante a realização do ensaio de flexão em quatro pontos.

Após os estudos teóricos e experimentais conclui-se que as placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal, são afetadas diretamente pela quantidade e disposição dos reforços, e possuem um potencial para serem utilizadas como elementos estruturais, semiestruturais ou de vedação.

## 6 REFERÊNCIAS

AGARWAL, Bahgwan D. *et al.* **Analysis and performance of fiber composites**. New Jersey, USA, 562 p., 2006.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. Tese (Livre docência). EPUSP, São Paulo, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 157, **Length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete**. U.S.A., 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D2256/D2256M - **Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method**, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D3822 - **Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers**, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D5035 - **Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)**, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 459, **Standard test method for asbestos-cement flat products**, **Annual Book of ASTM Standards**, V. 04.05, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 947 **Standard test method for flexural properties of thin-section glass-fiber-reinforced concrete** (using simple beam with third-point loading), **Annual Book of ASTM Standards**, 1999,

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D3039, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. (CD ROM). Philadelphia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733. **Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação**. Rio de Janeiro: 1991

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215.

**Argamassa –Determinação da Resistência à Compressão.** Rio de Janeiro: 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222.

**Argamassa e Concreto-Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778.

**Argamassa e Concreto Endurecido – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica.** Rio de Janeiro: 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778.

**Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779.

**Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52:

**Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2002.

AZIZ M. A., PARAMASIVAM P. and LEE S. L., “**Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction**”. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, V. 3, No 2, Singapura, 1981.

BARRACUDATEC TECNOLOGIES (2003). **Catálogo técnico de produto.**

<http://www.barracudatec.com.br/> /acesso em dezembro de 2003/. Rio de Janeiro.

BERHANE, Z. **Performance of natural fibre reinforced mortar roofing tiles.** Materials and structures. V. 27, p.347-352, 1994.

BUTLER, M.; LIEBOLDT, M.; MECHTCHERINE, V. (2010) - **Application of Textile-Reinforced Concrete (TRC) for structural strengthening and in**

**prefabrication.** Advances in Cement-Based Materials - van Zijl & Boshoff (eds), London, p. 127-136.

CALDAS, B.G.S. **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2014.

CALLISTER, William D. **Materials science and engineering : an introduction.** USA, 2007.

CANOVAS, M. F.; KAWICHE, G. M.; SELVA, N.H. **Possible ways of preventing vegetable fibres in cement mortar.** In 2nd Internacinal Rilem, Symposium...,p120-129, 1990.

CANOVAS, M. F.; SELVA, N.H.; KAWICHE, G.M., **New economical solutions for improviment of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibres.** Materials and structures. V. 25, p.417-422, 1992.

CARVALHO, R. F. **Compósito de fibra de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira.** 119 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CERCHIARO, J. R. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2010.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Sisal – safra 2012/2013 : comercialização – proposta de ações,** 2012.

FERREIRA, S. R., **Influencia da Hornificação na Aderência Fibra-Matriz e no Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras Curtas de Sisal.** Dissertação (mestrado) PPGECEA/UEFS, FEIRA DE SANTANA, Feira de Santana, 129 p., 2012.

GALE, D.M. **“Synthetic fibers in thin-section cement products: a review of the state of the art.** In: ACI SP146 THIN REINFORCED CONCRETE PRODUCTS AND SYSTEMS, Porto Rico, 1992, Edited by P. Balaguru, Detroit, p 160, 1994.

GHAVAMI, K. **Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering**. Mexico: CIB/RILEM, 1989. p.526-536

GOMMERS, B.; VERPOEST, I.; HOUTTE, P.; (1998). **The Mori-Tanaka method applied do textile composite**. *Materials Acta Metallurgica*, vol.46, no.6, pg.2223-2235.

GRAM, H.E. **Durability of natural fibres in concrete, Swedish cement and concrete research institute**, Research Fo 1:83, Stockolm. 1983, 255p.

JOHN, M. J.; THOMAS, S.; Biofibers and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v.71, p.343–364, 2008.

JONES, R. M., “**Mechanics of Composite Materials**”, McGraw-Hill Company, 1975.

LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. (2000). **Sisal fibre and its composites: a review of recente developments**. *Composites Science and Technology*, v.60, p.2037-2055.

LIMA, P. R. L., **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 263 p., 2004.

MELO FILHO, J. A. **Desenvolvimento e Caracterização de Laminados Cimentícios Reforçados com Fibras Longas de Sisal**. Dissertação (mestrado) COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 114 p., 2005.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal**. Tese (doutorado) COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 207 p., 2012.

MELO FILHO, J. A.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R.D. (2013) - **Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems**. *Cement & Concrete Composites*, v. 40, p.30–39. 2013.

MUMENYA, S.W.; ALEXANDER, M.G.; TAIT, R.B. (2010) - **Evaluation of mechanical behaviour of weathered textile concrete**. *Advances in Cement-Based Materials* - van Zijl & Boshoff (eds), London, p. 137-142.

NAGAHAMA, K. J.; GADEA, A.S.M.; LIMA, P.R.L. (2015) - **Finite strip modeling of cementitious laminates reinforced with sisal fibers**. Cement & Concrete Composites, v. 63, p.8–16. 2015.

OLIVITO, R.S.; CEVALLOS, O.A.; CARROZZINI, A. (2014) - **Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures**. Materials & Design, v.57, p.258–268, 2014.

PELED, A.; SACHIKO, S.; MOBASHER, B. (2006) - **Bonding in fabric–cement systems: Effects of fabrication methods**. Cement & Concrete Composites, v. 36, p.1661–1671. 2006.

RONG, M.Z.; ZHANG, M.Q.; LIU, Y.; YANG, G.C.; ZENG, H.M.; (2001). **The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites**. Composites Science and Technology, v.61,p.1437–1447.

ROQUE, A. B. **Elemento construtivo de fibrocimento contendo resíduo de concreto e fibra de sisal para uso como enchimento em lajes pré-moldadas**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2015.

SANTOS, R. J.; LIMA, P. R. L. **Aderência fibra-matriz em compósitos a base de cimento reforçados com dois tipos de resíduos de sisal**. III Encontro Nacional sobre o Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil, ANTAC, São Leopoldo, RS, 2013.

SAVASTANO JR, H., NOLASCO, A. M., LUZ, P. H. C., **Análise dos resíduos e subprodutos da agroindústria de fibras vegetais do Brasil para uso em materiais de construção**. In: Simpósio de Ciências da Engenharia Ambiental, 2., e Simpósio do Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, 4., 1997, São Carlos – SP. Anais... São Carlos – SP: CRHEA-EESC-USP, p. 87-87,1997.

SHACKELFORD, James F. **Introduction to Materials Science for Engineers**. Ed. Pearson Education. 6a edição, USA.

SILVA, F. A. **Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal**. Tese (doutorado) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 243 p., 2009.

TOLEDO FILHO, R.D.; BARBOSA, N.P.; GHAVAMI, K. (1990) - **Applications of sisal and coconut fibres in adobe blocks**. II International RILEM Symposium on vegetable Plants and their fibres as building materials. Salvador, Brasil, 17-21 set, p. 139-149.