ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS ESTRUTURAIS DE FIBRAS DE SISAL *IN NATURA* E HORNIFICADAS

Tema: Tecnologia dos materiais.
Grupo[1]: 2

SANDE S. BATISTA[1,2], MARIANA S. NUNES [1,2], ADILSON B. ARRUDA FILHO[2,3], JOSÉ H. T. SANTOS[4], RICARDO F. CARVALHO[5]

[1]Estudante do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/UFRB, sandebatista@gmail.com

[2] Pesquisador(a) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia/UFBA, msant.nunes@gmail.com

[3]Prof. MSc, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/UFRB, adilson.arruda@ufrb.edu.br

[4]Prof. Dr, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/UFRB, jhtsantos@yahoo.com.br

[5] Prof. Dr, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia/UFBA, ricardoc@ufba.br

RESUMO

Na busca por desenvolver materiais de construção mais sustentáveis esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados com tecidos estruturais, *in natura* e hornificado, da fibra de sisal, que foram agrupadas em feixes para confecção do tecido em um tear manual. Os compósitos foram submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos para análise do desempenho mecânico. Através dos resultados obtidos verificou-se que o tratamento de hornificação elevou o desempenho mecânico dos compósitos, mostrando condições para serem utilizadas como elemento estrutural, semiestrutural ou de vedação.

Palavras-chave: argamassa cimentícia, compósitos, fibra de sisal.

[1] **Grupo 1:** Oriundos de teses, dissertações e relatórios finais de projetos de pesquisa; ou **Grupo 2:** oriundos de disciplinas de pós graduação, iniciação científica, trabalhos de conclusão de curso (TCC), pesquisas aplicadas e outros.

ANALYSIS OF THE FLEXURAL BEHAVIOR OF CEMENTITIOUS COMPOSITES REINFORCED WITH STRUCTURAL FABRICS OF *IN NATURA* AND HORNIFIED SISAL FIBERS

ABSTRACT

In the search for the development of more sustainable building materials, this research had the objective of developing cementitious composites reinforced with structural fabrics, *in natura* and hornification, of sisal fiber, which were grouped in bundles for fabric preparation in a manual loom. The composites were submitted to the four point bending test to analyze the mechanical performance. Through the results obtained, it was verified that the furnace treatment increased the mechanical performance of the composites, showing conditions to be used as structural, semi-structural or sealing element.

Key-words: cement mortar, composites, sisal fiber.

1. INTRODUÇÃO

Mediante ao impacto causado ao meio ambiente pela indústria da construção civil, faz-se necessário desenvolver e aplicar novas tecnologias com materiais renováveis, que sejam menos agressivos ao ambiente. Nesse sentido diversos estudos estão sendo realizados utilizando fibras naturais vegetais em detrimento a fibras sintéticas como reforço de materiais compósitos[1,2,3,4], que são materiais oriundos da combinação de dois ou mais constituintes com propriedades físicas e químicas distintas[1].

A utilização de fibras naturais vegetais, como o sisal, para o reforço é uma alternativa viável, por ser biodegradável, possuir baixo custo e ser abundante no Brasil, considerado o maior produtor mundial de fibra de sisal, exportando cerca de 70% de sua produção[5].

O reforço do compósito a partir das fibras pode ocorrer de diversas formas: fibras, feixes, fios, mantas e tecidos, sendo a última, a que fornece melhores propriedades para esse tipo de compósito, que conhece-se a direção dos esforços[3,6], até mesmo em matrizes cimentícias que apresentam ruptura frágil, o reforço auxilia na distribuição de tensões no compósito, tornando o material mais tenaz e dúctil[2].

As fibras naturais apresentam certas limitações, como variações dimensionais em função da umidade e degradação em meio alcalino, afetando negativamente o desempenho do compósito[7]. Para minimizar a alcalinidade do meio, promover uma proteção superficial das fibras e aumentar a durabilidade dos compósitos cimentícios podem ser adicionados à matriz materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento Portland, pois, além de reduzir o pH, reduzem o teor de hidróxido de cálcio e aumentam a resistência à compressão[3,4]. Também podem ser realizados tratamentos nas fibras, como a hornificação, para minimizar variação dimensional, elevar a resistência a tração e rigidez, e prolongar a avida útil do material[7].

Desta forma, o presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver compósitos com matriz cimentícia reforçadas com tecido estrutural de sisal *in natura* e hornificado, e analisar a influência do tratamento de hornificação dos tecidos de sisal no comportamento mecânico dos compósitos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais e Métodos

Para o reforço, utilizaram-se fibras oriundas da Associação dos Pequenos Agricultores do Estado da Bahia – APAEB, situada no município de Valente – Bahia. As mesmas foram lavadas à temperatura de 50° C, por 20 minutos, para retirada de alguns constituintes que poderiam reagir com a matriz retardando sua pega e cura. Após a lavagem, as fibras foram colocadas para secar ao ar livre durante 24h[3].

A partir das fibras foi confeccionado um tecido do tipo tramado simples, em um tear manual de pente liso com 400 mm de largura. O urdume foi composto com linhas de algodão espaçadas em 2,5 mm e a trama por feixes de fibras de sisal, contendo 10 fibras cada, espaçados em 1 mm.

Depois de pronto, parte do tecido passou pelo processo de hornificação – ciclos de molhagem/secagem. Para realização deste procedimento o tecido foi imerso em um recipiente com água a temperatura ambiente (≈27° C) durante 3 h, até atingir a saturação. Depois, o mesmo foi colocado para secar em estufa à 80° C por 16 h. Este procedimento correspondeu a 1 ciclo de molhagem e secagem e foi repetido por 10 vezes[7].

Para confecção da matriz cimentícia, adaptou-se[8] , e assim, utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI), areia lavada, sílica ativa, superplastificante Vedacit Adiment Premium (teor de 0,8 %) e o Agente Modificador de Viscosidade – VMA (teor 0,07 %). O traço utilizado nesta matriz foi 1 : 0, 4 : 2 : 0,76 (cimento : sílica : areia : água).

Foram moldados dois compósitos com quatro camadas de reforço, os quais diferenciavam-se pelo reforço de tecido utilizado – *in natura* e hornificado. Os tecidos utilizados foram cortados previamente com as dimensões da forma utilizada (400 mm x 400 mm), e pesados para obtenção da massa do reforço. Aplicou-se desmoldante na forma para facilitar a remoção da placa após a secagem inicial. Em seguida, iniciou-se a preparação da argamassa conforme a norma NBR 13276 [9].

A moldagem do compósito iniciou aplicando-se uma camada de 2 mm de argamassa na forma metálica, depois foi colocada a primeira camada de tecido de feixes de fibra de sisal e esta foi compactada com um rolo de nylon para melhor impregnação da matriz no reforço. Assim, sucessivamente para as outras camadas de tecido de sisal e argamassa até que as quatro camadas de reforço estivessem conformadas no compósito. Por fim, aplicou-se uma camada de argamassa, cobrindo totalmente o tecido. Uma tampa de acrílico foi utilizada

para melhorar o acabamento superficial da placa e evitar a perda de umidade durante a secagem inicial.

Após 48 horas, as placas foram desmoldadas e levadas para cura em tanque com água a temperatura ambiente até o 28º dia. Após esse período, as placas foram cortadas em formato prismático gerando 16 corpos de prova cada, de dimensões 200 mm x 50 mm, as quais apresentaram espessura média de 12 mm.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Ensaio de tração no reforço

Para analisar o comportamento mecânico do reforço foram realizados ensaios de tração direta nas fibras, feixes e tecidos (vinte amostras de cada), seguindo as prescrições das normas ASTM D 3822[10], ASTM D 2256[11], ASTM D 5035[12], respectivamente. A partir desse ensaio foram obtidos os valores de carga e deslocamento ao decorrer do tempo, e então foi possível calcular a deformação específica e a tensão. Na Tabela 1 constam os resultados encontrados.

Tabela 1: Resultados do ensaio de tração no material de reforço - Fibras, feixes e tecido.

		Def. Específica (mm/mm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Fibras	*In natura*	0,0220 ± 0,0032	540,93 ± 48,59	25,43 ± 4,25
	Hornificadas	0,0180 ± 0,0044	588,92 ± 75,18	33,21 ± 11,37
Feixes	*In natura*	0,0111 ± 0,0016	330,02 ± 57,10	34,69 ± 4,34
	Hornificados	0,0117 ± 0,0014	375,59 ± 33,89	40,82 ± 4,19
Tecidos	*In natura*	0,0311 ± 0,0038	295,82 ± 46,95	11,14 ± 1,99
	Hornificados	0,0273 ± 0,0039	310,45 ± 48,21	13,75 ± 1,86

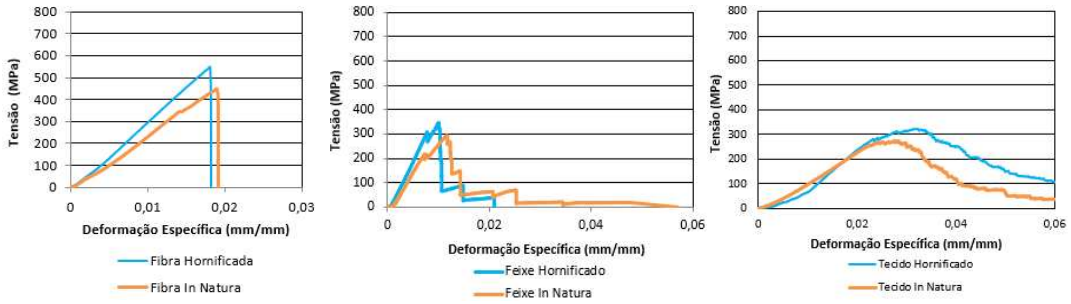
Os resultados obtidos pelo ensaio de tração na fibra demonstraram que o sisal sofre deformação elástica, ocorrendo um ganho de tensão e de deformação até o ponto de ruptura, comportamento este, característico de fibras vegetais [6] (Figura 1a). A hornificação possibilitou um aumento de 8,87 % para a resistência à tração e 30,59 % para o módulo de elasticidade.

A partir das curvas geradas pelo ensaio nos feixes (Figura 1b), observou-se uma pequena acomodação das fibras que compõe o feixe, seguida de um aumento de tensão até ocorrer a primeira ruptura e, a partir de então, a ruptura sequencial das demais fibras. Com o

tratamento de hornificação houve um aumento de 13,81 % para a resistência e 17,67 % para o módulo de elasticidade.

No ensaio dos tecidos observou-se distintos comportamentos (Figura 1c), verificando-se inicialmente uma pequena acomodação devido um realinhamento das fibras, seguido do aumento gradual da tensão e rigidez até início da fase de rupturas das fibras. Detectou-se aumento de 4,95 % para a resistência à tração e 23,43 % para o módulo de elasticidade com nos tecidos hornificados.

Figura 1: Curva Tensão x Deformação Específica. Ensaio de tração. Curvas típicas. a) Fibras; b) Feixe; c) Tecido



a b c

3.2. Ensaio de flexão em quatro pontos no compósito

A Figura 2 apresenta a realização dos ensaios nos compósitos, que foram realizados de acordo com as normas ASTM C 947[13] e ASTM C 459[14]. Durante a realização do ensaio a máquina de ensaio universal estática servo-elétrica modelo Autograph AGS-X Séries, fabricante Shimadzu, forneceu os dados de carga e deslocamento. A tensão foi calculada a partir da Equação 1:

$$\sigma = \frac{\left(\frac{q}{2}.a\right).\left(\frac{e}{2}\right)}{I} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

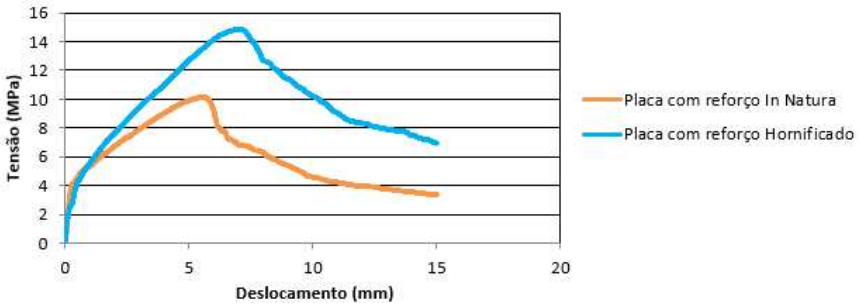
Onde: q é a carga (kN), a corresponde a distância entre o ponto de apoio e o ponto de aplicação da carga (mm), e representa a espessura da placa (mm), e I corresponde ao momento de inércia da seção transversal (mm^4).

Figura 2: Realização do ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos.



A Figura 3 apresenta o comportamento da curva Tensão x Deformação para os compósitos reforçados com tecido *in natura* e hornificado. Inicialmente o compósito está trabalhando no regime elástico, no qual o mesmo tem grande ganho de resistência e deslocamento mínimo. Então, a matriz atinge uma tensão crítica, onde ocorre a primeira fissura e, por consequência, queda de tensão. Após o surgimento da primeira fissura, imediatamente, o reforço passa a suportar as cargas que vão aumentando gradativamente, até o surgimento de uma nova fissura em outro ponto da matriz e ocorre uma queda de tensão. Esse ciclo de surgimento de fissuras e de combate às mesmas pelo reforço se repete diversas vezes. Finalizado o ciclo de múltiplas fissuras as cargas continuam a aumentar até atingir a resistência máxima do compósito. Após este pico de tensão máxima, verifica-se um comportamento de amolecimento da placa devido ao aumento da espessura das fissuras, ocasionando a redução da resistência do compósito. O comportamento apresentado pela placa quando submetido ao ensaio de flexão em quatro pontos foi semelhante ao encontrado por ARRUDA FILHO [3].

Figura 3: Curva Tensão x Deslocamento. Ensaio de flexão em quatro pontos nas placas – Curvas típicas



Os resultados obtidos pelos compósitos reforçados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos nas placas.

Placa	Vol. de Reforço (%)	Tensão Crítica (MPa)	Deslocamento na Tensão Crítica (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento na Tensão Máxima (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Reforço *In Natura*	6,54	4,01 ± 0,13	0,36 ± 0,01	10,28 ± 0,43	6,12 ± 0,55	14,21 ± 2,19

Reforço Hornificado	9,45	5,13 ± 0,76	0,56 ± 0,02	14,69 ± 0,39	6,78 ± 0,36	7,11 ± 0,65

A partir da Figura 3 e dos resultados dispostos na Tabela 2 fica claro o aumento de resistência à flexão da placa com reforço hornificado com relação à placa com reforço *in natura.*

4. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de tração direta pôde-se observar que, após a realização do tratamento de hornificação, com dez ciclos de molhagem e secagem houve uma melhora no desempenho mecânico do material de reforço, promovendo um aumento de resistência a tração e também de seu módulo de elasticidade.

Verificou-se, através do ensaio de flexão, que as placas reforçadas com tecidos hornificados obtiveram melhor desempenho mecânico, nas quais as houve um aumento da tensão crítica de cerca de 27,93 %, e tensão máxima de 42,90 %.

O tratamento de hornificação no reforço melhora o desempenho mecânico dos compósitos cimentícios reforçados com tecido estrutural de sisal, tornando-os mais resistentes aos esforços de flexão, admitindo assim, potencial para uso como elementos estruturais, semiestruturais ou de vedação.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana, ao Departamento de Construção e Estruturas da Universidade Federal da Bahia e à equipe do Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, pelo apoio para realização da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

2. LIMA, J. C. A. **Modelagem computacional de placas de matriz cimentícia reforçadas com fibras de sisal.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.

3. ARRUDA FILHO, A. B. **Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

4. LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal.** 2004. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

5. CONAB, 2018. **Fibras - Conjuntura Setembro 2017**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/.../15253_02a2a248e38eb4f68c8734448bf580d2>. Acesso em: 01 de julho de 2018.

6. CALDAS, B. G. S. **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado cm tecido de sisal conformado por infusão a vácuo.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

7. FERREIRA, S. R.; LIMA, P. R. L.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de ciclos de molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, p. 1024-1034, jun. 2012.

8. LIMA, P. R. L.; BARROS, J. A. O.; ROQUE, A. B.; FONTES, C. M. A; LIMA, J. M. F. Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs**. Construction and Building Materials**, v. 187, p. 620-634, out. 2018.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3822**: Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. Annual Book of ASTM Standards, 2007.

11. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2256**: Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method. Annual Book of ASTM Standards, 2010.

12. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5035**: Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method). Annual Book of ASTM Standards, 2011.

13. 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.

14. 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.