

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Carlos Fernando Soares de Oliveira D'Angio

Gabriellen Ramos Campos

Giulia Ferreira Moreira de Azevedo

Larissa Paes Pierosi

Rhyan Crys Vieira

Wagner Gustavo Camargo Custodio da Silva

**UTILIZAÇÃO DO TECIDO DE FIBRA DE JUTA EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS: COMPORTAMENTO MECÂNICO E ANÁLISE DE IMAGENS**

SÃO PAULO

2021

Carlos Fernando Soares de Oliveira D'Angio

Gabriellen Ramos Campos

Giulia Ferreira Moreira de Azevedo

Larissa Paes Pierosi

Rhyan Crys Vieira

Wagner Gustavo Camargo Custodio da Silva

**UTILIZAÇÃO DO TECIDO DE FIBRA DE JUTA EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS: COMPORTAMENTO MECÂNICO E ANÁLISE DE IMAGENS**

Monografia apresentada à Universidade São Judas Tadeu, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Dimas Alan Strauss Rambo

SÃO PAULO

2021

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pela oportunidade de estarmos realizando esse trabalho, a nossa família e amigos por todo o suporte e compreensão que nos deram em momentos que tanto precisamos durante a graduação. Agradecemos ao professor Dimas Alan Strauss Rambo pelo apoio e orientação, ao professor Fernando Russo pelo auxílio com o ensaio das molas e aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu pelo suporte e auxílio em todos os processos do desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

O reforço de matrizes cimentícias pode ser executado utilizando-se fibras de diversas origens: sintéticas ou naturais. O emprego de fibras como reforço faz com que esses compósitos tenham maior resistência a tração quando comparados a matrizes sem qualquer tipo de reforço. Neste contexto, as fibras naturais se tornam atrativas pelo fator econômico e sustentável, este trabalho tem por objetivo caracterizar mecanicamente e por correlação digital de imagem corpos de prova reforçados com fibra de juta, analisando a influência de diferentes tratamentos aplicados ao tecido, saturação em água, saturação em nano-sílica e pré-tensionamento do tecido de juta combinado com saturação em nano-sílica. Para tanto, foram moldados corpos de provas os quais foram posteriormente submetidos a ensaios de tração direta. As imagens capturadas durante os ensaios de tração foram submetidas a análise em *software* de correlação digital de imagens afim de mapear fissuras e deslocamentos. Os resultados indicaram que os tratamentos no tecido influenciaram no processo de fissuração dos compósitos e foram capazes de melhorar a resistência à tração pós-fissuração e a aderência fio-matriz. A combinação dos tratamentos de saturação em nano-sílica e pré-tensionamento mostrou-se mais eficaz do que o tratamento em água.

Palavras-chave: fibras naturais; nano-sílica; pré-tensionamento; resistência a tração.

ABSTRACT

The reinforcement of cementitious matrices can be performed using fibers of various origins: synthetic or natural. The use of fibers as reinforcement makes these composites have higher tensile strength when compared to matrices without any type of reinforcement. In this context, the natural fibers become attractive for the economic and sustainable factor, this work aims to characterize mechanically and by digital correlation of image specimens reinforced with jute fiber, analyzing the influence of different treatments applied to the fabric, saturation in water, saturation in nano-silica and pre-tensioning of the jute fabric combined with saturation in nano-silica. For this, specimens were molded and later submitted to direct traction tests. The images captured during the traction tests were submitted to analysis in software of digital correlation of images in order to map cracks and displacements. The results indicated that the fabric treatments influenced the composites cracking process and were able to improve the post-cracking tensile strength and wire-matrix adhesion. The combination of nano-silica saturation and pre-stressing treatments proved to be more effective than the water treated one.

Keywords: natural fibers; nano-silica; prestressing; tensile strength.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Justificativa.....	9
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3	METODOLOGIA	14
3.1	Materiais utilizados	14
3.1.1	Matriz cimentícia.....	14
3.1.2	Tecido de fibra de juta	14
3.1.3	Nano-sílica.....	16
3.2	Métodos.....	17
3.2.1	Capacidade de absorção do tecido de juta	17
3.2.2	Ensaio de resistência a tração dos cordões de juta.....	18
3.2.3	Tratamentos aplicados ao tecido de juta	19
3.2.3.1	Compósito reforçado com tecidos de juta imerso em água (TRC_REF) 19	
3.2.3.2	Compósito reforçado com tecidos de juta imerso em nano-sílica (TRC_NS) 19	
3.2.3.3	Compósito reforçado com tecidos de juta imerso em nano-sílica e pré-tensionado (TRC_PS).....	20
3.2.3.4	Determinação da tensão aplicada no tecido de juta 20	
3.2.4	Produção da matriz e compósitos	21
3.2.4.1	Processos de moldagem dos corpos de prova	23
3.2.4.2	Cura	25
3.2.4.3	Preparação do corpo de prova	26
3.2.4.4	Ensaio de tração direta	28
3.2.4.5	Análise de imagens pelo software	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Capacidade de absorção do tecido de juta.....	31
4.2	Resistência a tração dos cordões de juta	31

4.3	Caracterização mecânica dos compósitos	32
4.4	Análise DIC através do GOM	34
5	CONCLUSÕES	36
6	REFERÊNCIA	37

1 INTRODUÇÃO

Compósitos cimentícios reforçados com fibras têxteis (TRC), são matrizes cimentícias reforçadas com fibras alinhadas em, pelo menos, duas direções. Nesses compósitos cimentícios podem ser utilizados diferentes tipos de fibra e quando submetidos a ensaios de tração direta apresentam resultados característicos de fissuração (BRAMESHUBER, 2016). Devido seu elevado desempenho mecânico juntamente com seus benefícios sustentáveis, seu uso na construção civil é potencializado (FIDELIS, 2014).

Alguns autores como Silva (2009), Fidelis (2013) e Melo filho (2012), mostraram através de estudos que a utilização de fibras vegetais, como a juta, é aplicada em compósitos cimentícios com o intuito de reforçar esses elementos e aprimorar a resistência a tração. Por serem de origem natural, as fibras apresentam vantagem econômica em comparação as fibras sintéticas e metálicas, possuem baixa densidade, boa resistência mecânica, são materiais renováveis e não produzem substâncias prejudiciais à saúde.(FICHER, EICHHOLZ, & MARANGON, 2020).

A matriz cimentícia quando submetida à tração, apresenta ruptura frágil, com baixo nível de tensão e propagação rápida de fissuras. Quando reforçada com fibras, a aderência delas a matriz, faz com que as fibras suportem tensões geradas no compósito após a primeira fissura da matriz. À medida que a carga aumenta, tensões adicionais são transferidas para o substrato e, quando a tensão de adesão é superada, novas fissuras são causadas. Esse processo de múltiplas fissuras do compósito continua até que a fibra seja rompida ou arrancada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ao analisar compósitos reforçados com fibras vegetais, a incidência de arrancamento da fibra é maior, em relação a ruptura. Analisando a microestrutura, a adesão na interface matriz/fibra tem um efeito significativo na tenacidade do material compósito (SAVASTANO, 2000). A imersão da fibra em nano-sílica antes de seu embebedimento na matriz aprimora a tenacidade dos compósitos reforçados com fibras naturais (RAMBO, 2021; TOLEDO, 1997).

Nesse contexto, esse estudo tem por objetivo analisar o comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com tecido de fibra de juta, em três condições diferentes: Saturação do tecido de juta em água, saturação do tecido de juta em nano-sílica e tecido de juta tensionado saturado em nano-sílica.

1.1 Justificativa

Devido a modernização da tecnologia e o aumento da preocupação mundial com o bem-estar do meio ambiente, nos últimos anos se tornou urgente a busca de materiais sustentáveis para a substituição dos materiais convencionais na construção civil, que minimizem os impactos negativos ao meio ambiente.

Na confecção do aço um dos materiais mais utilizados na construção civil, há um alto custo devido a matéria prima e a mão de obra utilizada, além da grande emissão de gases poluentes na atmosfera devido a queima de carvão vegetal.

Já na confecção de fibras de carbono é utilizado a polimerização por pirólise, que consiste na decomposição através do calor de um material rico em carbono, depois é feito o esticamento dos polímeros para o eixo da fibra, a oxidação do material e a adição de reagentes. Por conter vários materiais a fibra de carbono não pode ser reciclada, aliado a isso, sua alta resistência gera altos impactos ambientais.

Com o objetivo de apresentar uma alternativa ao uso de fibras sintéticas em matriz cimentícias nesse trabalho, será caracterizado mecanicamente e por correlação digital de imagem os corpos de prova reforçados com fibra de juta, que possui baixo custo de produção, cultivo nacional e contribui para a preservação do meio ambiente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar a influência de três diferentes tratamentos aplicados ao tecido de juta no comportamento mecânico da TRC (compósitos cimentícios reforçados com têxteis). Os tratamentos consistiram em saturação do tecido de juta em água, nano-sílica e tecido de juta tensionado saturado em nano-sílica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os 4 objetivos específicos descritos a seguir:

- I. Caracterizar os cordões de fibra de juta por meio de ensaios de absorção e tração direta.
- II. Produzir compósitos cimentícios reforçados com tecido de fibra de juta submetidos à três condições distintas, tecido de juta saturado em água e nano-sílica e tecido de juta tensionado saturado em nano-sílica.
- III. Caracterizar e comparar mecanicamente os compósitos em três condições distintas, tecido de juta saturado em água, nano-sílica e tecido de juta tensionado saturado em nano-sílica.
- IV. Analisar por correlação digital de imagem (DIC) o padrão de fissuração dos compósitos em três condições distintas, tecido de juta saturado em água, nano-sílica e tecido de juta tensionado saturado em nano-sílica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aumento da conscientização ambiental nos últimos anos tem sido crescente tanto na sociedade em geral como também na construção civil. A otimização do tempo é uma busca diária assim como a racionalização de materiais, não somente no sentido de produzir menos resíduos, mas principalmente na incorporação de materiais renováveis, de forma a reduzir o impacto ambiental desse setor. Nesse contexto, as fibras têxteis (naturais) foram incorporadas nesse ramo como forma de substituição de fibras sintéticas utilizadas nos últimos anos, como reforço para matrizes frágeis, aumento da resistência a tração e diminuição das fissuras.

Devido as fibras naturais terem baixo custo, serem manuseadas facilmente e requirirem menos energia no processo de produção, quando comparadas às fibras sintéticas, se tornam uma alternativa para o equilíbrio entre a otimização do tempo e economia com baixo impacto ambiental. Desta forma compósitos reforçados com fibras naturais, combinados às técnicas modernas, são desenvolvidos para reduzir resíduos gerados e o consumo de recursos petroquímicos, promovendo assim a sustentabilidade (DITTENBER *et al.*, 2012).

As fibras naturais são materiais compósitos que exibem uma estrutura complexa, formada de uma fina parede e de uma segunda parede de três camadas, onde as propriedades mecânicas são determinadas através da camada de espessura média, na qual alguns autores declaram como paredes primária, secundária e terciária (JOHN *et al.*, 2008).

A qualidade das fibras é afetada por vários fatores tanto internos quanto externos, pode-se citar eles como, o ambiente em que a fibra é cultivada, sua região de origem, seu tamanho, sua forma, mas também existem outras características que impactam nas fibras em inúmeros estágios (OCHI,2008). Suas propriedades mecânicas ainda dependem de fatores como diâmetro da fibra, estrutura, grau de polimerização, estrutura cristalina, origem (caule, folha, fruto e semente) e condições de crescimento, além disso, o método e as condições de ensaio também influenciam na obtenção dos resultados. No ensaio de resistência mecânica, critérios como, precisão da instrumentação, taxa de deformação, tipo de garra, comprimento e flexibilidade da máquina podem influenciar nos resultados (THOMAS *et al.*, 2011, SILVA *et al.*, 2008).

A ideia central de colocar fibras nos compósitos é a de que elas contribuam em suas propriedades mecânicas, especialmente a ductilidade, no estágio após a primeira fissura. Existem alguns fatores que determinam a resistência e a ductilidade do material como a qualidade da transferência de tensões entre fibra e matriz, orientação das fibras, e o fundamental: a adesão fibra-matriz, sendo esta influenciada por diversos fatores, como tipo de fibra, diâmetro, comprimento de embebimento e volume. Um material dúctil pode ser obtido

caso a adesão seja fraca, porém se a adesão é forte, o resultado pode ser um material resistente e frágil (REINHARDT *et al.*, 2006). A determinação dessa adesão é determinada por ensaios de *pullout* (arrancamento) (PEHANICH *et al.*, 2004; MONTEIRO e d'ALMEIDA, 2006; BOSHOF *et al.*, 2009; HAMOUSH *et al.*, 2010).

O uso de fibras em matrizes frágeis possui grande dependência nas interações fibra-matriz, pode-se citar elas como: atrito, adesão física e química até mesmo a ancoragem mecânica que ocorre devido a uma geometria de nível complexo ou por deformações na superfície da fibra (BENTUR e MINDESS, 2007).

Sem nenhum tratamento, as fibras têm tendência a apresentar comportamento não monotônico e baixa sensibilidade a deformação, ou seja, quando submetida a tensão, a mesma não atinge o tecido de forma uniforme e continua e o tecido não acompanha a deformação do compósito. Com o pré-tensionamento o tecido apresenta comportamento monotônico e uma melhora em sua sensibilidade a deformação (ALEXOPOULOS *et al.*, 2013).

A imersão de fibras naturais em nano-sílica contribui para o ganho de tenacidade de compósitos reforçados com esse tipo de fibra (TOLÊDO, 1997). O tratamento em nano-sílica tende a aumentar a tenacidade, a resistência pós fissuração e a densidade de fissuras, devido a melhor adesão fio-matriz e a maior formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) no entorno dos cordões tratados, no qual o C-S-H é produto da reação pozolânica (nano-sílica) que ocorre entre um material pozolânico com hidróxido de cálcio, na presença de água (JOHN *et al.*, 2003).

A durabilidade é um problema decorrente da utilização de fibras vegetais como reforço em matrizes cimentícias. A alcalinidade da matriz faz com que o compósito perca resistência ao longo do tempo, assim como a água presente nos poros, que devido à sua alcalinidade reage com os componentes da fibra reduzindo assim sua resistência. Para a redução do hidróxido de cálcio, produto da hidratação, pode ser feita a substituição parcial do cimento por um material pozolânico. A mudança de volume das fibras dentro da matriz causa danos na interface fibra-matriz que por sua vez pode ocasionar a degradação do compósito (GRAM, 1983; AGOPYAN *et al.*, 2005; TOLEDO FILHO *et al.*, 2003; CLARAMUNT *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2010; LIMA, 2004; SAVASTANO *et al.*, 2009).

A fibra de juta, produzida em grande escala na China, Índia e Bangladesh, apresenta moderada resistência a tração e flexão e dentre as fibras naturais é uma das mais economicamente viáveis (RIBEIRO, 2019). É normalmente utilizada em sacos e cordas, e começou a ser utilizada no Brasil nos estados de São Paulo, Pará e Amazonas, onde a planta começou a ser cultivada entre os anos de 1950 e 1980 (SATYANARAYANA, GUIMARÃES,

& WYPYCH, 2007). A partir das hastes da planta *Corchorus capsularis* é obtida a fibra, com uma variação de comprimento de 200 a 1500 mm e composição de 58 a 63% de celulose, 21 a 24% de hemicelulose e 12 a 14% de lignina (SILVA, 2004).

A fibra de juta pode ser utilizada desde o artesanato até em revestimento de pavimentos, isolante e também para proteger o solo, esta fibra possui grande potencial em ser utilizada como geotêxtil onde o mesmo é aplicado para controlar erosões e estabilizar solos (GRAUPNER e MUSSIG, 2010).

Quando comparada quimicamente a outras fibras (sisal, curauá, coco e piaçava), a juta apresenta maior teor de celulose, que é a principal responsável pela resistência. A fibra de juta apresenta também grande resistência a tração, porém baixa capacidade de deformação, além do alto módulo de elasticidade como apresenta a Figura 1 (ERNESTINA, 2014).

Fibras (40 mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	E (GPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	m	Área (mm ²)
Curauá	543 (260)	63,7 (32,5)	1,0 (0,2)	2,22	0,004 (0,002)
Juta	249 (89)	43,9 (12,3)	0,6 (0,2)	2,74	0,004 (0,001)
Coco	90 (35)	2,6 (0,7)	18,8 (9,1)	2,74	0,052 (0,030)
Piaçava	131 (36)	3,8 (0,9)	11,4 (3,6)	3,68	0,585 (0,279)
Sisal	484 (135)	19,5 (4,5)	3,3 (1,6)	3,70	0,023 (0,007)

$\sigma_{\max}$ = tensão máxima; $\epsilon_{\max}$ = deformação máxima; E = módulo de elasticidade;
m = módulo de Weibull.

Figura 1 - Resultados do ensaio de tração para as fibras de curauá, juta, coco, piaçava e sisal. (ENERSTINA, 2014).

O método de Correlação Digital de Imagem (DIC) é uma técnica desenvolvida para medir deformações e deslocamentos sem que haja contato. Esta técnica utiliza imagens capturadas através de câmeras que registram todo o processo de esforço sofrido pelo corpo de prova. Utilizando um conjunto de algoritmos as imagens são processadas e são obtidos os campos de deformação.

Este método é capaz de realizar medições das deformações sofridas no plano (2D) e fora do plano (3D), para capturar deformações em três dimensões é necessário utilizar mais do que uma câmera e configurar o software. O método DIC em três dimensões gera mais informações sobre o comportamento do objeto de estudo, como por exemplo uma estrutura. (BELEZA, 2017).

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Matriz cimentícia

Para a produção das matrizes foi utilizado a Argamassa Colante AC III comercializada pela empresa Weber Quartzolite em pacotes de 20 kg, características: alto teor de polímeros, alto poder de adesão, fácil manuseio, não pode receber adição de cimento ou agregado, deve ser utilizado em superfície com temperatura entre 5°C e 38°C, cujas propriedades físicas e químicas são resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades da argamassa

Propriedades físicas	Densidade (kg/m ³)	2000
	Desempenho de aderência em cura normal (MPa)	≥ 1,0
	Desempenho de aderência em cura submersa (MPa)	≥ 1,1
	Desempenho de aderência em cura em estufa (MPa)	≥ 1,2
Composição química	Cimento Portland	20 - 60%

3.1.2 Tecido de fibra de juta

O tecido de fibra de juta (Figura 2) utilizado como reforço para os compósitos é comercializado pela empresa Sisal Sul em rolos de 1 m de largura, o tecido não possui tratamento superficial, nem revestimento. Sua estrutura é composta por cordões longos de juta entrelaçados (*plain wave*), como apresentado na Figura 3.



Figura 2 - Tecido de Juta.

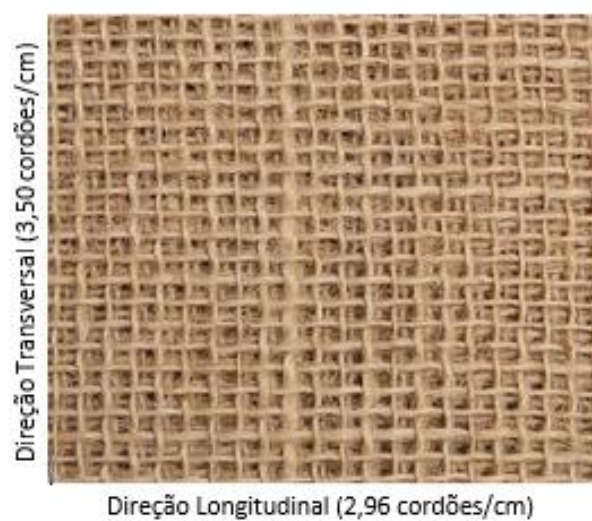


Figura 3 - Detalhe da abertura da trama do tecido de juta.

Para determinar o diâmetro do cordão de juta foi determinada a massa e o comprimento de dez cordões de juta (Figura 4), e então foi calculado por meio de densidade (Equação 1), e os diâmetros estão representados na

Tabela 2. As propriedades do tecido de juta estão resumidas na Tabela 3.

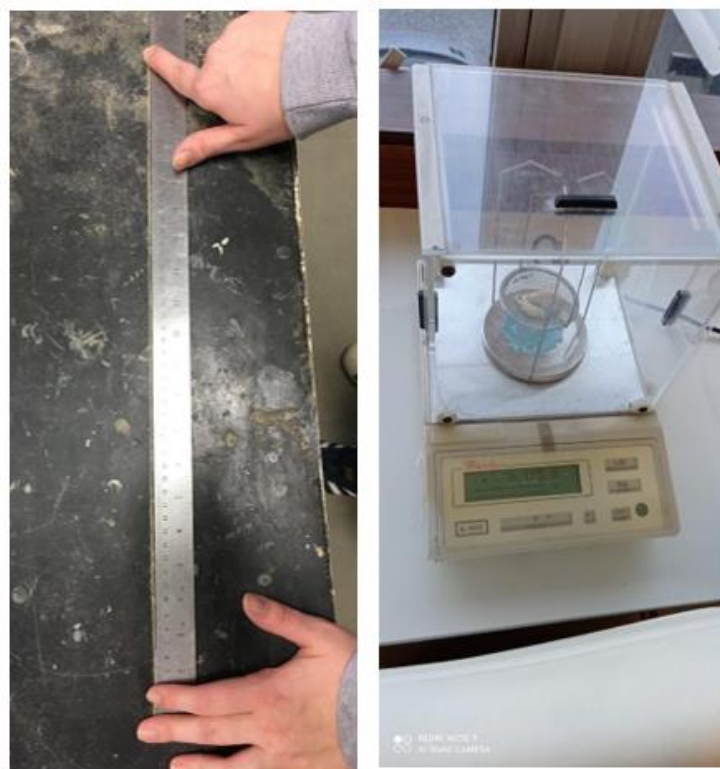


Figura 4 - (a) Medição do cordão de juta. (b) Pesagem do cordão de juta.

$$Densidade = \frac{Massa}{Volume} = \frac{Massa}{Área \times Comprimento} = \frac{Massa}{\frac{\pi \times D^2}{4} \times Comprimento} \rightarrow$$

Equação 1 - Diâmetro

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Massa}{\pi \times Comprimento \times Densidade}}$$

Tabela 2 - Determinação do diâmetro do cordão de juta

Cordão	Massa (g)	Comprimento (cm)	D (cm)
1	0,174	55,0	0,0500
2	0,192	54,5	0,0528
3	0,223	54,4	0,0569
4	0,185	54,6	0,0518
5	0,253	54,8	0,0604
6	0,191	55,0	0,0524
7	0,171	54,7	0,0497
8	0,192	54,4	0,0528
9	0,241	54,9	0,0589
10	0,167	54,5	0,0492
Diâmetro Médio (cm)			0,0535

Tabela 3 - Propriedades do tecido de juta

Propriedade	
Densidade (g/cm ³)	1,61
Tipo de fabricação	Entrelaçado
Número de cordões por cm (longitudinal)	2,96
Número de cordões por cm (transversal)	3,5
Tipo de revestimento	Nenhum
Área da seção transversal do cordão (cm ²)	0,02248
Distância entre cordões (mm)	2
Espessura	3

3.1.3 Nano-sílica

A nano-sílica Levasil CB30 (Figura 5) empregada como tratamento no tecido de juta é comercializada pela empresa Royal Marck em galões de 6 litros. É uma dispersão aquosa e alcalina de sílica coloidal, as partículas de sílica são nanométricas e têm forma esférica levemente áspera. Sua aparência física é um líquido translúcido, mais viscoso que a água. Suas propriedades físicas e químicas são resumidas na Tabela 4.



Figura 5 - Nano-sílica.

Tabela 4 - Propriedades da nano-sílica

Propriedades físicas	Densidade (g/cm ³)	1,2
	Faixa de dimensão do tamanho das partículas (µm)	0,1 – 50,0
	Viscosidade (cP)	4,5
Composição química (%)	Na ₂ O	0,6
	SiO ₂	30
	Ph	10,5

3.2 Métodos

3.2.1 Capacidade de absorção do tecido de juta

Para a determinação da capacidade de absorção do tecido, tanto em água quanto em nano-sílica, foram utilizadas amostras de 27 g (Figura 6). As amostras foram imersas em água e durante cinco horas foram realizadas leituras de massa em intervalos de 30 minutos, utilizando um minuto para que o excesso de água fosse retirado. Após as 5 horas, os intervalos se deram a cada uma hora até completar 24 horas de ensaio. O ensaio também foi realizado em nano-sílica. A absorção foi obtida através da Equação 2.



Figura 6 - Preparação para ensaio de absorção

Equação 2 - Absorção

$$A = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{M_{seca}}$$

3.2.2 Ensaio de resistência a tração dos cordões de juta

Os ensaios de resistência à tração direta foram realizados em máquina Universal de Ensaio KRATOS modelo KE20.000. Para o ensaio foi utilizada uma célula de carga de 5000 kN e velocidade de deslocamento de 3 mm/min. O comprimento de medida adotado para os cordões foi de 25 cm. Foram empregadas polias, em cada extremidade do cordão, para que o mesmo fosse enrolado a fim de evitar o rompimento próximo à garra da máquina. O esquema do ensaio está ilustrado na Figura 7.

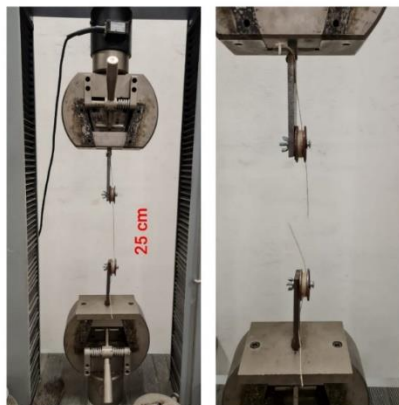


Figura 7 - Ensaio de tração direta do cordão de fibra de juta

3.2.3 Tratamentos aplicados ao tecido de juta

O corte dos tecidos de juta ocorreu de forma manual, utilizando régua e tesoura, foi estabelecido um tamanho padrão de 25x50cm, e para o corpo de prova com tecido pré-tensionado, este foi cortado na dimensão de 25x100cm, criando assim malhas de fibra de juta. Para cada corpo de prova foram utilizadas 3 malhas de fibra de juta. Com as malhas cortadas foram utilizados três métodos para preparação das malhas de fibra de juta, sendo eles, tecido de juta imerso em água (TRC_REF), tecidos de juta imerso em nano-sílica (TRC_NS) e tecidos de juta imerso em nano-sílica e pré-tensionado (TRC_PS).

3.2.3.1 Compósito reforçado com tecidos de juta imerso em água (TRC_REF)

Utilizando uma caixa de massa de 20 litros, as malhas de tecido de juta foram imersas em água até que atingissem o ponto de saturação. O parâmetro de saturação foi determinado usando o processo em 3.2.1.

3.2.3.2 Compósito reforçado com tecidos de juta imerso em nano-sílica (TRC_NS)

Utilizando uma caixa de massa de 20 litros (Figura 8), as malhas de tecido de juta foram imersas em nano-sílica até que atingissem o ponto de saturação. O parâmetro de saturação foi determinado usando o processo em 3.2.1.



Figura 8 - Imersão do tecido de juta em nano-sílica

3.2.3.3 Compósito reforçado com tecidos de juta imerso em nano-sílica e pré-tensionado (TRC_PS)

Um processo de tensionamento foi utilizado para melhorar a aderência fibra-matriz. Este processo contribui para que a fibra não se desprenda da matriz cimentícia. O processo de tensionamento foi realizado através de molas, que tracionaram o tecido enquanto a matriz era adicionada ao molde. A determinação da tensão aplicada no tecido está apresentada no item 3.2.3.4.

3.2.3.4 Determinação da tensão aplicada no tecido de juta

A tensão aplicada no tecido de juta foi determinada pela constante elástica da mola (k), através dos resultados obtidos no ensaio realizado nas molas. O ensaio foi realizado aplicando às molas carregamentos progressivos, de 0,80 kg a 1,10 kg, e medindo a cada 100 g a deformação resultante desse carregamento. As cargas foram aplicadas através de um dispositivo e pesos padrões de 50g, como mostra a Figura 9. Os dados obtidos através do ensaio das molas estão representados na Tabela 5.



Figura 9 - Ensaio da mola

Tabela 5 - Tabela de molas

Mola	Massa (kg)	Comprimento (m)	Deformação (m)	k (kg/m)	k (N/m)		
1	0,8	0,073	0,024	33,333	327	$L_{0(m)}$	0,049
	0,9	0,076	0,027	33,333		$L_{f(m)}$	0,247
	1	0,079	0,03	33,333		$F_{el(N)}$	64,746
	1,1	0,082	0,033	33,333			
2	0,8	0,074	0,024	33,333	327	$L_{0(m)}$	0,050
	0,9	0,077	0,027	33,333		$L_{f(m)}$	0,247
	1	0,080	0,030	33,333		$F_{el(N)}$	64,419
	1,1	0,083	0,033	33,333			
3	0,8	0,073	0,024	33,333	327	$L_{0(m)}$	0,049
	0,9	0,076	0,027	33,333		$L_{f(m)}$	0,247
	1	0,079	0,03	33,333		$F_{el(N)}$	64,746
	1,1	0,082	0,033	33,333			
4	0,8	0,072	0,024	33,333	327	$L_{0(m)}$	0,048
	0,9	0,075	0,027	33,333		$L_{f(m)}$	0,247
	1	0,078	0,03	33,333		$F_{el(N)}$	65,073
	1,1	0,081	0,033	33,333			

No momento da moldagem as molas mediam 24,7 centímetros, o que equivale a uma força de 258,984 N, referente a soma das forças elásticas de cada mola. Para determinar a tensão foi aplicada a Equação 3:

Equação 3 - Tensão

$$Tensão = \frac{Força}{Área} = \frac{258,984 \text{ N}}{\left(3,5 \frac{\text{cordões}}{\text{cm}} \times 25\text{cm} \times 3 \text{ camadas}\right) \times \left[\frac{\pi \times (0,0535 \text{ cm})^2}{4}\right]}$$

$$Tensão = 438,880 \frac{N}{cm^2} = 0,439 \frac{kN}{cm^2}$$

Onde a área é o número de cordões na seção transversal à aplicação da força multiplicados pela área de cada cordão.

3.2.4 Produção da matriz e compósitos

Os compósitos foram produzidos seguindo as especificações do fabricante, para a produção de cada corpo de prova foi utilizado 540 ml de água (Figura 10) e 3 kg de argamassa colante AC III em pó (Figura 111). Para a mistura, foi utilizado um misturador mecânico de

argamassa modelo AG5 da empresa Metal Cairo (Figura 12), primeiramente foi adicionado os 540 ml de água no misturador e durante um período de 40 segundos foi adicionado a argamassa. Então o misturador foi acionado e o processo de mistura teve início, a mistura ocorreu na velocidade baixa com 140 ± 05 rpm, durante 2 minutos e 30 segundos e posteriormente em velocidade rápida com 285 ± 10 rpm por 30 segundos, por fim o recipiente foi retirado do misturador dentro do período de 1 minuto.



Figura 10 - Dosagem de água.



Figura 11 - Dosagem de argamassa



Figura 12 - Misturador mecânico de argamassa.

3.2.4.1 Processos de moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova foram empregadas fôrmas de 400 mm x 250 mm x 10 mm (largura x comprimento x espessura) como mostra a Figura 13(a). O processo começou com a aplicação do desmoldante e em seguida a fixação de 3 camadas de malha de fibra de juta em um dos lados da fôrma utilizando chapas de aço parafusadas, mostrado na Figura 13(b). Após a fixação as camadas ficam posicionadas para o lado de fora da fôrma (Figura 13(c) e Figura 14) para dar prosseguimento ao processo a seguir.

A primeira parte do processo foi a aplicação de uma fina camada de argamassa fresca no fundo da fôrma (Figura 15). A segunda parte do processo consistiu em posicionar a malha de fibra de juta sobre a argamassa fresca, exemplificado na Figura 16. O procedimento foi repetido até atingir o número desejado de camadas, sendo quatro camadas de matriz e três camadas de malha de fibra de juta (Figura 17).

Para este estudo foram produzidos corpos de prova com a malha de fibra de juta pré-tensionada e corpos de prova com a fibra em seu estado natural. O pré-tensionamento da malha se deu utilizando molas. Foram coladas chapas de madeira MDF nas extremidades do tecido com o auxílio de cola, a colagem foi feita de maneira intercalada, sendo uma chapa de madeira/tecido/chapa de madeira e assim por diante até a colagem do último tecido e da última chapa. Uma das extremidades do tecido, juntamente com a madeira, foi travada com o auxílio de grampos do tipo sargento na mesa, na outra extremidade do conjunto foram feitos furos para

a fixação das molas, que por sua vez foram enganchadas nos sargentos localizados na outra extremidade da mesa (Figura 18).

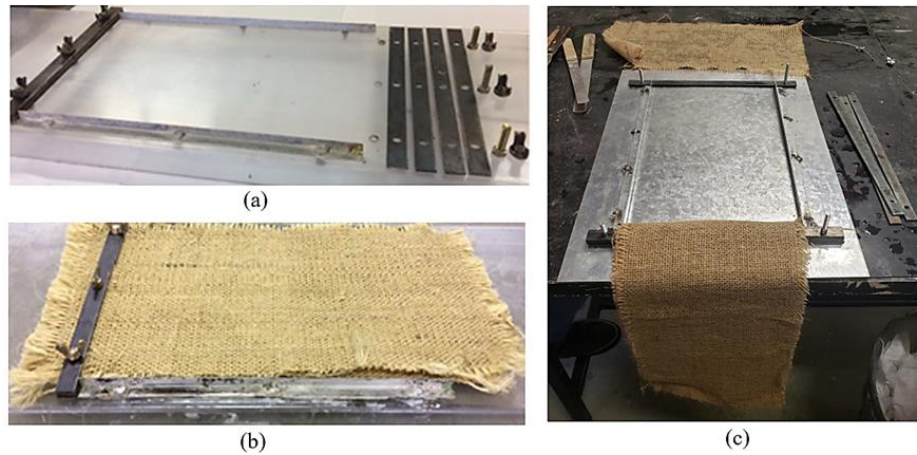


Figura 13 - Forma para moldagem dos corpos de prova em acrílico (a), posicionamento das camadas do tecido de fibra de juta (b), forma em chapa galvanizada e tecidos de juta dispostos ao lado externo (c).



Figura 14 - Tecido de juta fixado na fôrma.



Figura 15 - Primeira etapa do processo de moldagem.



Figura 16 - Aplicação da segunda camada de argamassa.



Figura 17 - Finalização da moldagem.



Figura 18 - Moldagem do TRC_PS.

3.2.4.2 Cura

Como mostra a Figura 19 o processo de cura foi realizado colocando-se um pano úmido sobre o corpo de prova, para mantê-lo úmido e colocando-o na câmara úmida por 28 dias.



Figura 19 - Cura do corpo de prova.

3.2.4.3 Preparação do corpo de prova

As placas dos compósitos (Figura 20(a)) produzidos de dimensão 400 mm x 250 mm x 10 mm (largura x comprimento x espessura) foram pintadas utilizando tinta branca acrílica a fim de criar um fundo branco (Figura 20(b)), após a secagem foram cortadas utilizando uma serra circular modelo 4100NH2X (Figura 21) de modo que cada placa resultasse em 5 corpos de prova de 400 mm x 50 mm x 10 mm (largura x comprimento x espessura) (Figura 22), por fim utilizando uma tinta spray de cor preta foi criado um padrão de pontos aleatórios, a tinta spray foi esguichada nas placas (Figura 23) para que o software de correlação digital de imagens pudesse analisar o deslocamento. Na Figura 24 é possível observar como os cordões ficaram alinhados nos compósitos.



Figura 20 - Corpo de prova seco (a), Processo de pintura dos corpos de prova (b).



Figura 21 - Processo de corte dos corpos de prova



Figura 22 - Corpos de prova cortados.



Figura 23 - Corpos de provas identificados.



Figura 24 - Vista lateral do corpo de prova com a distribuição de fibras visível

Antes das amostras serem levadas para o ensaio de tração direta, foram marcadas, nomeadas, pesadas e dimensionadas, os resultados são observados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões dos corpos de prova.

Corpo de Prova	Massa (g)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)
TRC_REF_I	385	48,75	14,43	703,63
TRC_REF_II	386	46,20	14,67	677,60
TRC_REF_III	412	49,57	15,23	755,07
TRC_REF_IV	394	50,83	14,77	750,64
TRC_NS_I	421	49,25	14,13	696,07
TRC_NS_II	449	49,28	15,10	744,18
TRC_NS_III	420	48,82	13,78	672,86
TRC_NS_IV	446	49,05	14,57	714,50
TRC_NS_V	416	49,53	14,22	704,20
TRC_PS_I	379	47,45	12,30	583,64
TRC_PS_II	369	48,22	12,15	585,83
TRC_PS_III	429	51,72	12,60	651,63
TRC_PS_IV	382	48,12	12,55	603,86
TRC_PS_V	468	51,10	16,52	844,00

3.2.4.4 Ensaio de tração direta

Os ensaios de resistência à tração direta foram realizados na máquina Universal de Ensaio KRATOS modelo KE20.000. Para fixação das amostras na prensa foi utilizado um dispositivo que consiste em quatro chapas de 100 mm x 180 mm x 10 mm (largura x comprimento x espessura), sendo duas chapas fixadas em cada uma das extremidades da amostra, presas por parafusos e porcas sextavadas. O ensaio utilizou célula de carga de 5.000 kN e velocidade de 1 mm/min de deslocamento. Foi posicionada uma câmera em frente à máquina de ensaio para que fossem tiradas foto com intervalo de 10 segundos a fim de registrar o processo de fissuração da amostra como mostra a Figura 25. Na Figura 26 é apresentado o modo de ruptura dos corpos de prova.



Figura 25 - Ensaio de tração direta dos corpos de prova.



Figura 26 - Corpo de prova após ensaio de tração direta.

3.2.4.5 Análise de imagens pelo software

A correlação digital de imagem (DIC) foi realizada pelo software gratuito GOM Correlate 2020, através deste software foi possível determinar a evolução do processo de fissuração em todos os corpos de prova. Este software identifica os pontos aleatórios criados pela pintura na fase de preparo das amostras e acompanha seu deslocamento como está representado na Figura 27, e através de algoritmos detecta o movimento das facetas (faceta padrão, 19 x 19 pixels) durante o ensaio.

O processo teve início na captura de imagens das faces dos corpos de prova (190 mm de altura x 50 mm de largura). A captura das imagens ocorreu através de uma câmera Nikon D5200 utilizando resolução de 3000 x 4496 pixels e intervalos de 10 segundos (Figura 28), e então as imagens foram importadas para o programa. Foram criados componentes de superfície e então os deslocamentos (y) ao longo da superfície foram calculados pelo software e foram obtidos os valores de espaçamento de fissuras que ocorreram durante o ensaio.

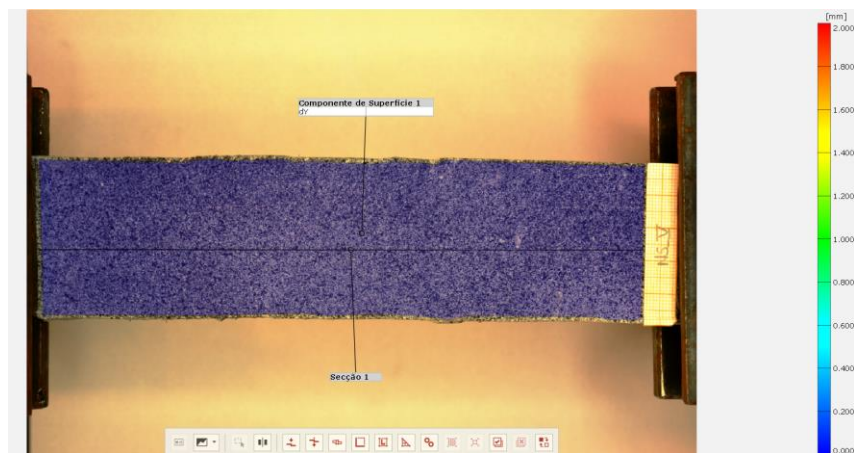


Figura 27 - Componente de superfície criado no software

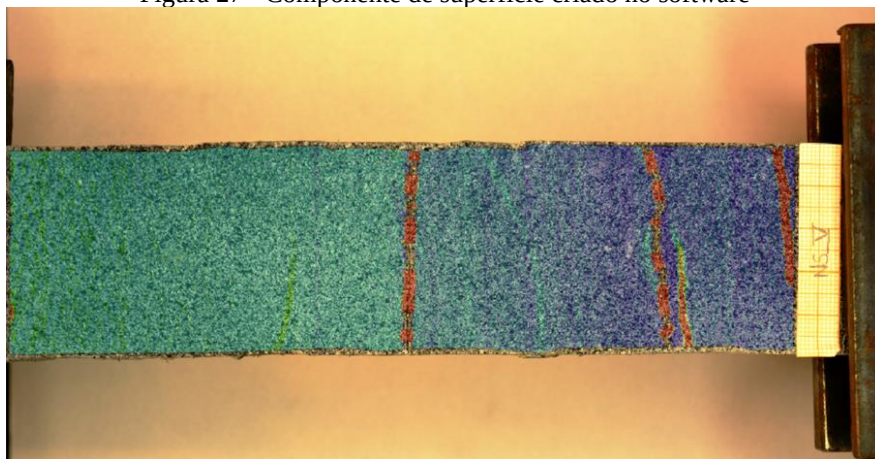


Figura 28 - Deformação calculada pelo software

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Capacidade de absorção do tecido de juta

Na Figura 29 são apresentados os resultados do ensaio de absorção do tecido de juta, onde é possível observar que a absorção da juta em água é bastante rápida no início, alcançando aproximadamente 250% de ganho de massa nas primeiras 8 horas. A absorção da juta em nano-sílica se mostra ainda mais rápida, alcançando aproximadamente 325% de ganho de massa no mesmo período. Após esse período, é notável uma desaceleração no ganho de massa. Com base nos resultados obtidos, o período de saturação do tecido de juta, empregado no estudo, foi de 8 horas.

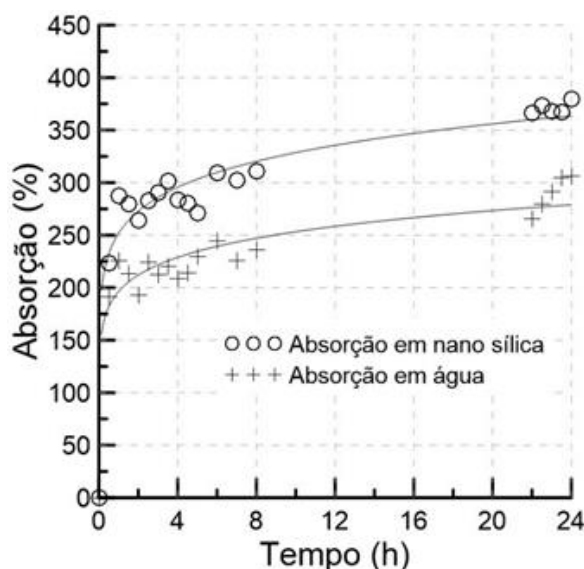


Figura 29 - Absorção do tecido de juta em água e nano-sílica.

4.2 Resistência a tração dos cordões de juta

Na Tabela 7 são apresentados os resultados de carga dos testes de tração direta realizados nos cordões de juta. A partir dos resultados é possível perceber que em média os cordões de juta apresentaram uma resistência à tração de 210,79 MPa. Estes resultados são compatíveis com resultados de estudos similares reportados por Fidelis, *et al*, 2014 nos quais foram observados valores de resistência de 258 MPa.

Tabela 7 - Determinação da tensão de ruptura do cordão de fibra de juta

Cordão	Massa (g)	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Área (cm ²)	Força máxima aplicada (N)	Tensão de Ruptura (N/cm ²)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	1,36	417,0	0,0508	0,0020	29,43	14528,25	145,28
2	1,71	414,5	0,0571	0,0026	68,67	26799,17	267,99
3	2,00	414,5	0,0618	0,0030	58,86	19639,96	196,40
4	1,45	415,4	0,0525	0,0022	49,05	22623,69	226,24
5	1,30	416,0	0,0497	0,0019	29,43	15162,34	151,62
6	1,87	416,0	0,0596	0,0028	49,05	17567,77	175,68
7	1,53	415,7	0,0540	0,0023	58,86	25747,48	257,47
8	1,16	416,0	0,0470	0,0017	58,86	33984,55	339,85
9	1,62	415,9	0,0555	0,0024	49,05	20273,97	202,74
10	1,53	416,9	0,0539	0,0023	49,05	21518,17	215,18
11	1,86	415,9	0,0595	0,0028	68,67	24721,16	247,21
12	1,23	415,1	0,0484	0,0018	39,24	21320,75	213,21
13	1,47	414,6	0,0530	0,0022	68,67	31182,07	311,82
14	1,52	416,9	0,0537	0,0023	39,24	17327,79	173,28
15	1,61	417,2	0,0552	0,0024	58,86	24556,39	245,56
16	1,32	415,5	0,0501	0,0020	29,43	14914,66	149,15
17	1,95	416,6	0,0608	0,0029	49,05	16871,34	168,71
18	1,88	416,2	0,0598	0,0028	49,05	17482,72	174,83
19	1,12	415,4	0,0462	0,0017	19,62	11715,84	117,16
20	1,67	416,5	0,0563	0,0025	58,86	23634,40	236,34
Média						21078,62	210,79

4.3 Caracterização mecânica dos compósitos

Os resultados do ensaio de tração direta estão representados nas curvas de tensão *versus* deformação (Figura 30), até 10% de deformação. Dados médios referentes à tensão máxima ($\sigma_{\text{máxima}}$), tenacidade (T) para deformações com intervalos de 1,5% (2,5 mm) a 5% (10 mm) e quantidade de fissuras são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Cabe ressaltar que os valores de deformação foram obtidos via DIC, análise que será apresentada posteriormente no item 4.4.

Os compósitos apresentaram comportamento *strain hardening*. As curvas do TRC_REF mostram grandes quedas no trecho pós-fissuração, com tendência a “manutenção” da tensão suportada. Enquanto a tensão aumenta, a deformação também avança resultando em um número baixo de fissuras formadas ao longo do eixo longitudinal da amostra devido a reduzida adesão cordão-matriz.

As curvas tensão-deformação apresentadas pelo TRC_NS revelam um comportamento clássico de TRCs, com três distintas fases: pré-fissuração, múltipla fissuração e trecho final governado pelo reforço têxtil. As curvas revelam aumento de resistência de primeira fissura em comparação ao TRC_REF. Além disso, observa-se aumento no número de fissuras formadas e redução nas variações de tensão na fase de múltipla fissuração. Tal comportamento indica melhoria na adesão cordão-matriz proporcionada pela nano-sílica. Este fato também justifica os acréscimos de tenacidade $T_{2,5\%}$ e $T_{5\%}$.

A combinação do tratamento dos cordões em nano-sílica em conjunto com pré-tensionamento dos cordões gerou melhoria no desempenho mecânico, refletido na tensão última e na segunda fase, onde as quedas de tensão são menores que no TRC_NS, isso ocorre, devido, a compatibilidade de deformação entre cordão e matriz se estender por mais tempo durante o tracionamento do compósito. O pré-tensionamento da fibra tratada com nano-sílica - proporcionou maior adesão cordão-matriz gerando maior número de fissuras na amostra. A $T_{5\%}$ médio do TRC_PS é mais de 2 vezes maior que o apresentado pelo TRC_REF, e aproximadamente 20% maior que o TRC_NS. É possível perceber também na Figura 30 (c) que as deformações últimas do TRC_PS foram menores que os TRC_REF e TRC_NS, isso ocorre pelo fato de que parte da deformação já havia ocorrido durante o pré-tensionamento dos cordões.

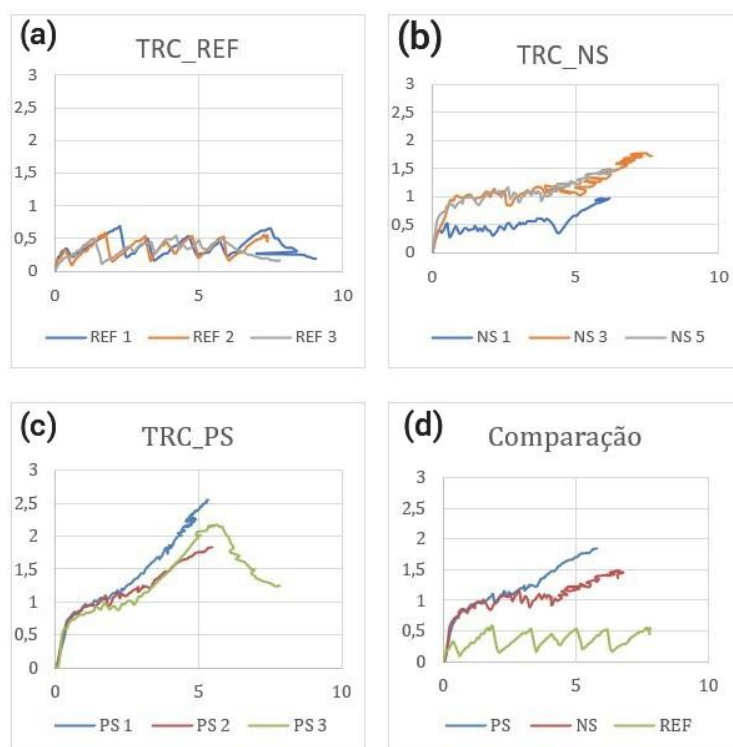


Figura 30 - Curvas de tensão de tração versus deformação de Concretos Reforçados Têxteis de Juta: (a) TRC_REF, (b) TRC_NS, (c) TRC_PS e (d) Comparação entre os compósitos.

Compósito	Tração Direta	Tenacidade			Quantidade média de fissuras
	σ Média (MPa)	T1,5 (J)	T2,5 (J)	T5 (J)	
TRC_REF	0,19	0,20	0,79	2,28	4
TRC_NS	0,48	0,50	1,68	4,85	14
TRC_PS	0,61	0,37	1,93	6,29	24

4.4 Análise DIC através do GOM

A Figura 31 representa a superfície das amostras TRC_REF (a), TRC_NS (b), TRC_PS (c), ilustrando o padrão de fissuração de cada amostra.

A comparação presente na Figura 31 permite analisar a influência da adesão cordão-matriz no modo de fissuração dos TRCs com tecido tratado. Os compósitos que receberam tratamento de nano-sílica apresentam número de fissuras 3 vezes maior que o TRC_REF. É importante notar que, em geral, a “localização” da fissura principal, geradora do colapso da amostra, se deu próximo a garra do equipamento com o *pull-out* dos cordões de juta. Nas amostras TRC_NS e TRC_PS a ruptura se deu em pontos aleatórios sendo caracterizada pelo rompimento dos cordões (sem *pull-out*). Estes dados revelam possivelmente melhor adesão para TRC_NS e compatibilidade de deformações no caso de TRC_PS.

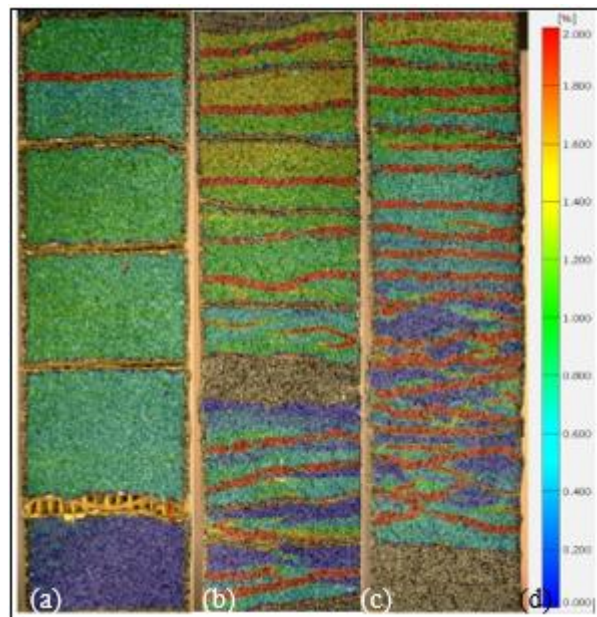


Figura 31 - Fissuração das amostras: (a) TRC_REF, (b)TRC_NS, (c) TRC_PS, (d) Escala de deformação longitudinal.

Os campos de deformação longitudinal (ϵ_y) dos TRCs são mostrados na Figura 32. O estado de deformação da amostra é ilustrado no lado direito utilizando cores, onde o azul escuro representa 0% de deformação, e o vermelho representa 2% de deformação da amostra. É possível notar a diferença na quantidade de fissuras para cada tratamento aplicado nos cordões de juta, e como influenciam no modo de fissuração. Na Figura 32(a), à medida que a tensão sobe para 0,46 MPa, fase de início de múltipla fissuração, começa a surgir fissuras em azul claro, até alcançar o ponto (III), onde as fissuras excedem a capacidade de leitura DIC do software. O ponto (IV) evidencia o efeito *pull-out* característico da baixa adesão cordão-matriz.

A Figura 32(b) mostra o modo de deformação do TRC_NS, apresentando fissuras próximas à 2% de deformação logo no ponto (I). Enquanto a tensão sobe para 0,57 MPa é notável o aumento de fissuras ao longo da amostra, onde, diferente do TRC_REF não há o efeito *pull-out* e sim o elevado número de fissuras. A Figura 32(c) representa o TRC_PS, que apresenta um padrão de fissuras semelhante ao TRC_NS, fato proporcionado pela combinação no tratamento dos cordões de juta em nano-sílica e pré-tensionamento dos cordões de juta. O TRC_PS apresenta mais fissuras vermelhas devido a compatibilidade na deformação entre matriz e cordão ocorrer por mais tempo.

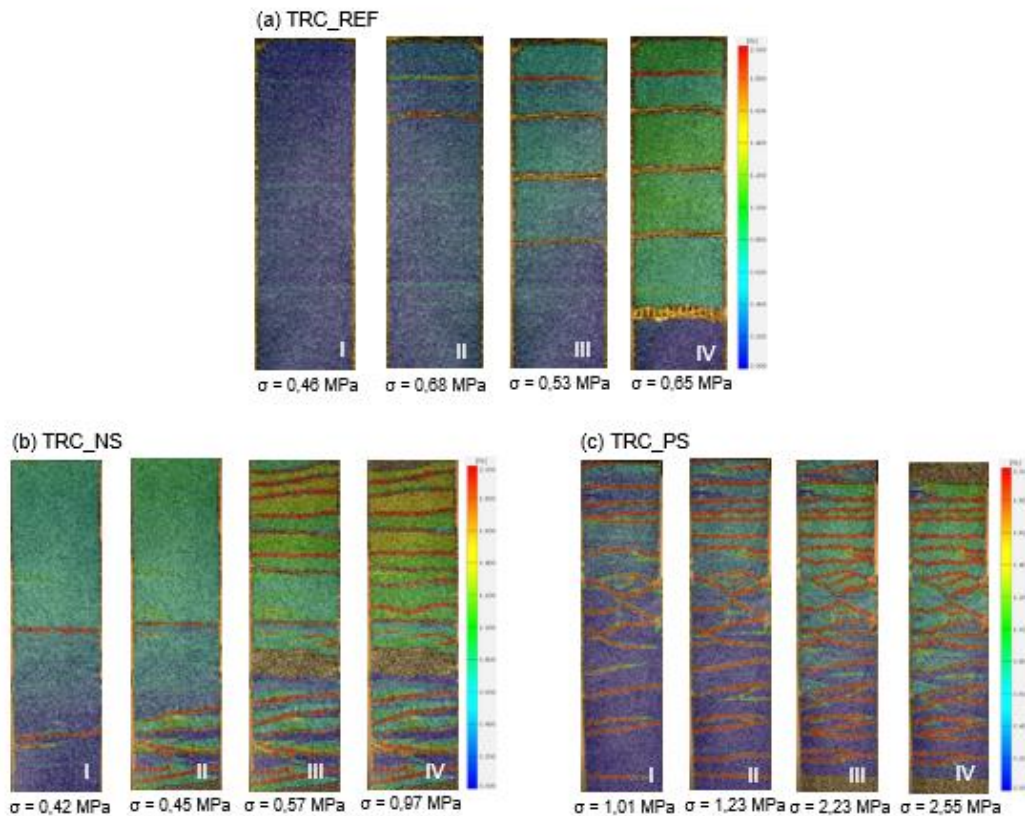


Figura 32 - Padrão de fissuração e tensão nos (a) TRC_REF, (b) TRC_NS, (c) TRC_PS.

5 CONCLUSÕES

O tratamento por imersão do tecido de juta em suspensão de nano-sílica proporcionou um aumento na resistência a tração direta dos compósitos além de apresentar aumento nos valores de tenacidade dos compósitos quando comparados ao TRC_REF. Além disso, houve aumento no número de fissuras quando comparado ao TRC_REF, devido à reação pozolânica da nano-sílica que pode ser observada na melhoria da adesão cordão-matriz.

A ancoragem mecânica promovida pelo tratamento em nano-sílica e pelo pré-tensionamento (TRC_PS) foi capaz de promover um aumento na tenacidade dos compósitos, mostrando, em média, valores até 1,25 vezes superiores aos obtidos nos TRC_REF e TRC_NS. Os testes de tração direta apresentaram que essa combinação se mostrou mais eficaz do que o tratamento com água (TRC_REF) ou apenas com nano-sílica (TRC_NS).

Considera-se que os compósitos reforçados com tecidos naturais têm um grande futuro na produção de elementos construtivos, de tal forma que pesquisas futuras sobre a utilização desses tipos de compósitos são necessárias, levando-se em conta sua alta capacidade de deformação.

6 REFERÊNCIA

AGOPYAN, V., SAVASTANO JR, H., JOHN, V. M., CINCOTTO, M. A., 2005, “Developments on Vegetable Fibre–Cement Cased Materials in São Paulo, Brazil: an Overview”, *Cement & Concrete Composites*, v. 27, pp. 527–536.

ALEXOPOULOS, N. D.; JAILLET, C.; POULIN, P.; KOURKOULIS, S.K. Improved strain sensing performance of glass fiber polymer composites with embedded pre-stretched polyvinyl alcohol–carbon nanotube fibers. *Carbon*, v. 59, p. 65-75, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.02.055>

BENTUR, A., MINDESS, S., 2007, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Elsevier Applied Science. London and New York, 2ª edição. [20:58, 24/04/2021] Larissa: GRAM, H. E., 1983, “Durability of Natural Fibres in Concrete”. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 255 p.

BOSHOF, W. P., MECHTCHERINE, V., ZIJL, G. P. A. G., 2009, “Characterising the Time-Dependant Behaviour on the Single Fibre Level of SHCC: Part 2: The Rate Effects on Fibre Pull-out Tests”, *Cement and Concrete Research*, v39, pp. 787-797.

BRAMESHUBER, W.. Test methods and design of textile reinforced concrete. *Proceedings of RILEM International Conference*, 2016.

CLARAMUNT, J., ARDANUY, M., GARCÍA-HORTAL, J. A., TOLEDO FILHO, R. D., 2011, “The Hornification of Vegetable Fibers to Improve the Durability of Cement Mortar Composites”, *Cement & Concrete Composites*, v. 33, pp. 586–595.

CRISTIANA ALMEIDA BELEZA, Sílvia. Medição de deformações através da técnica de correlação digital de imagem. 2017. Dissertação (Grau de Mestre em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

d’ALMEIDA, J. R. M., AQUINO, R. C. M. P., MONTEIRO, S. N., 2006, “Tensile Mechanical Properties Morphological Aspects and Chemical Characterization of Piassava (*Attalea funifera*) Fibers”, *Composites: Part A*, v. 37, pp. 1473–1479.

DITTENBER, D. B., GANGARAO, H. V. S., 2012, “Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure”, *Composites: Part A*, Article in Press.

FIDELIS, E. A. M. Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibra de juta. Tese de Doutorado, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

GRAUPNER, N., MÜSSIG, J., 2010, “Technical Applications of Natural Fibres: An Overview”, in *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. 1 ed., Wiley Series in Renewable Resources. Edited by JÖRG MÜSSIG.

HAMOUSH, S., ABU-LEBDEH, T., CUMMINS, T., ZORNIG, B., 2010, “Pullout Characterizations of Various Steel Fibers Embedded in Very High-Strength Concrete”, *American J. of Engineering and Applied Sciences*, v.3, pp. 418-426.

JOHN, M. J., ANANDJIWAL, R. D., 2008, “Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites”. *Polymer Composites*, pp. 187-207.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA M. G. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: WESLEY JORGE FREIRE e ANTONIO LUDOVICO BERALDO. *Tecnologias e materiais alternativos de construção*. Campinas: Editora UNICAMP, 2003, p. 145- 190.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M.. *Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo, pp. 434-445, 1994.

MONTEIRO, S. N., d’ALMEIDA, J. R. M., 2006, “Ensaaios de Pullout em Fibras Lignocelulósicas – Uma Metodologia de Análise”, *Revista Matéria*, v. 11, pp. 189-196.

OCHI, S., 2008, “Mechanical Properties of Kenaf Fibers and Kenaf/PLA Composites”, *Mechanics of Materials*, v. 40, pp. 446–452.

PEHANICH, J. L., BLANKENHORN, P. R., SILSBEE, M. R., 2004, “Wood Fiber Surface Treatment Level Effects on Selected Mechanical Properties of Wood Fiber–Cement Composites”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, pp. 59-65.

REINHARDT, H. W., KRÜGER, M., BENTUR, A., BRAMESHUBER, W., BANHOLZER, B., CURBACH, M., JESSE, F., MOBASHER, B., PELED, A., SCHORN, H., 2006, *Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TR*, Ed. W. Brameshuber.

SAVASTANO JUNIOR, Holmer. *Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. 2000. Tese (Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO JR., H., SANTOS, S. F., RADONJIC, M., SOBOYEJO, W. O., 2009, “Fracture and Fatigue of Natural Fiber-Reinforced Cementitious Composites”, *Cement & Concrete Composites*, v. 31, pp. 232–243.

SILVA, F. A., CHAWLA, N., TOLEDO FILHO, R. D., 2008, “Tensile Behavior of High Performance (sisal) Fibers”, *Composites Science and Technology*, v. 68, pp. 3438-3443.

SILVA, F. A., TOLEDO FILHO, R. D., MELO FILHO, J. A., FAIRBAIRN, E. M. R., 2010, “Physical and Mechanical Properties of Durable Sisal Fiber–Cement Composites”, *Construction and Building Materials*, v. 24, pp. 777-785.

THOMAS, S., PAUL, S. A., POTHAN, L. A., DEEPA, B., 2011, “Natural Fibres: Structure, Properties And Applications”, in *Cellulose Fibers: Bio and Nano Polymer Composites – Green Chemistry and Technology*. Springer-Verlag. Edited by KALIA, S., KAITH, B. S., KAUR, I.

TOLÊDO FILHO, R. D. *Materias compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. Tese de Doutorado, DEC-PUC-Rio / DEC-Imperial College-Londres, Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO FILHO, R. D., GHAVAMI, K., ENGLAND, G. L., SCRIVENER, K., 2003, “Development of Vegetable Fibre–Mortar Composites of Improved Durability”, *Cement & Concrete Composites*, v. 25, pp. 185–196.