

## Estudo de compósitos de poliéster/tecido de juta para construção de silos cilíndricos verticais

R. R. Dantas<sup>1\*</sup>; L. H. Carvalho<sup>2</sup>; J. W. B. Nascimento<sup>3</sup>; V. M. Fonseca<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PPGEM/UFPB, Cidade Universitária - CEP - 58059-900 João Pessoa - PB - Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, Av. Aprígio Veloso – 882, Bodocongó, 58109 – 970, Campina Grande – PB, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Av. Aprígio Veloso – 882, Bodocongó, 58109 – 970, Campina Grande – PB, Brasil.

(Recebido em 10/10/2008; revisado em 08/11/2008; aceito em 02/12/2008)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

---

### Resumo:

Neste trabalho, foi estudada a viabilidade do uso de compósitos poliméricos, resina de poliéster reforçada com tecido de juta, para construção de silos cilíndricos verticais. Foram confeccionados compósitos tubulares com teores de fibras variando de 22 a 31% em massa. Os corpos de prova obtidos foram cortados nas dimensões preconizadas pelas normas NBR 14262 (1999), NBR 5683 (1999) e NBR 12770 (1992) para a determinação das resistências ao impacto por queda de dardo, pressão hidrostática e compressão respectivamente. Os dados obtidos no ensaio de pressão hidrostática foram utilizados para calcular as pressões e tensões de tração atuantes na parede do silo, tomando-se como base silos de dois e três metros de diâmetro e alturas de três, seis e nove metros. Com base nos resultados obtidos o compósito investigado apresentou propriedades compatíveis para a construção de silos cilíndricos verticais com a finalidade de armazenamento de produtos agressivos.

**Palavras-chave:** Fibras naturais; silo; compressão; pressão hidrostática

---

### Abstract:

In this work the viability of using vegetable fiber reinforced polymer composites (unsaturated polyester/jute fabric) in cylindrical vertical silos was ascertained. Tubular composites with different fiber contents (22-31% w/w) were prepared. Samples were cut-up from the tubes or else from similarly manufactured plates and their falling dart impact strength, hydrostatic pressure and compressive properties were estimated according with NBR standards 14262 (1999), 5683 (1999) and 12770 (1992), respectively. The hydrostatic pressure data was used to calculate the pressures and tensile stresses acting on the silo walls for silos 2-3m in diameter and 3, 6, and 9m in high. The data indicates that the properties of the composites under study render them suitable for application in vertical cylindrical silos for storing aggressive products.

**Keywords:** Natural fiber; silo; hydrostatic pressure; compression

---

\* E-mail: [rejane3000@yahoo.com.br](mailto:rejane3000@yahoo.com.br) (R. R. Dantas)

## 1. Introdução

O termo silo é utilizado para designar construções ou estruturas destinadas ao armazenamento a granel de produtos sólidos. As estruturas para armazenamento têm conquistado espaço de destaque dentro dos processos de diversos setores da economia mundial, seja industrial ou rural. No Brasil, em sua grande maioria, os silos construídos são metálicos e de grande porte, o que não condiz com a realidade agrícola brasileira, basicamente, formada por pequenos e médios produtores [1].

Com o avanço da tecnologia, materiais com combinações incomuns de propriedades não encontrados em materiais convencionais têm se destacado. Durante as últimas décadas, um substancial desenvolvimento de compósitos para aplicações estruturais tem sido observado, sendo a principal motivação desta grande evolução a possibilidade de materiais com altas propriedades mecânicas e baixas densidades serem produzidos, o

que potencialmente poderiam substituir materiais usualmente utilizados como o aço e madeira [2].

Existem alguns sólidos que não podem ser estocados em silos metálicos ou outros materiais de construção que sejam conectados com materiais metálicos, devido à sua corrosão. Desta forma o emprego de materiais que possuam boas propriedades mecânicas e resistência a corrosão garante a possibilidade de se construir silos vertical de modo seguro e econômico, utilizando novos materiais, entre eles, compósitos de poliéster/tecido de juta [2].

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a viabilidade da utilização de compósitos poliméricos com resina de poliéster reforçada com tecido de juta como material alternativo para construção de silos cilíndricos verticais. Para tanto serão determinadas a resistência ao impacto, à compressão e a pressão hidrostática para comparação das pressões nas paredes do silo provocadas pela força de atrito do produto com a parede.

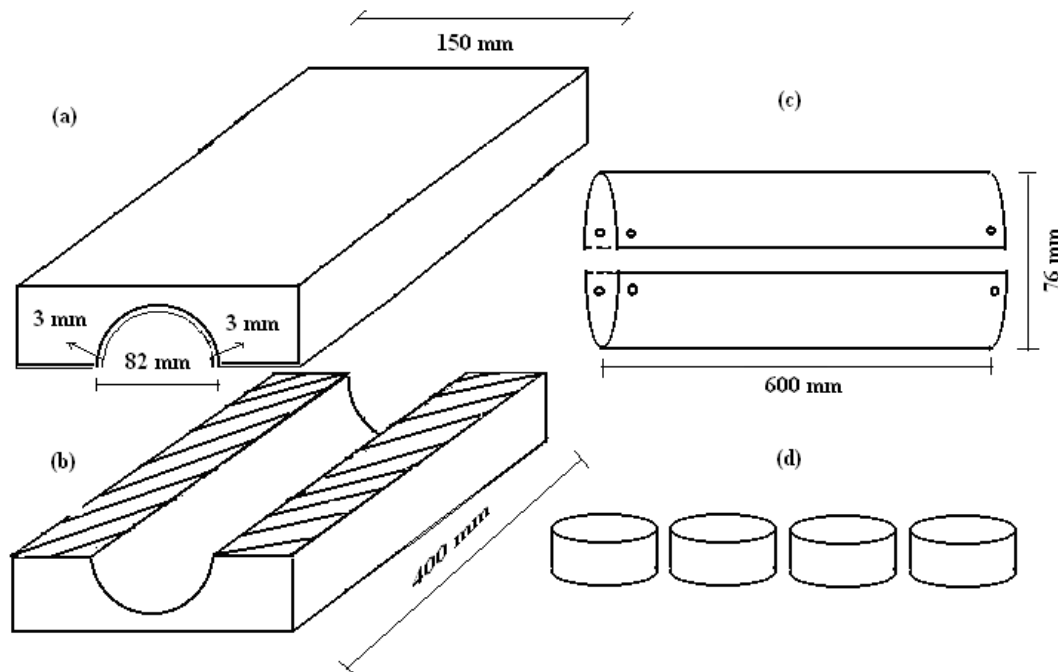


Figura 1. Cortes interno e externo do molde tubular. (a) e (b) parte superior e inferior, para prensar o tubo de PVC, auxiliando o formato do compósito; (c) tubo de PVC e (d) rodas de madeira para dar apoio ao tubo PVC.

## 2. Procedimento Experimental

### 2.1. Preparação dos compósitos

Utilizou-se como matriz a resina de poliéster insaturado ortoftálico pré-acelerado, fabricada e fornecida pela RESANA S/A sob o código

RESAPOL 10-116, catalisada com 1% (V/V) MEK-P, fornecido pela VI FIBER LTDA. Como elemento de reforço foi utilizado um tecido de juta empregado em sacaria, classificação 2J e densidade de 340 g/m<sup>3</sup>, fornecido pela Cia Têxtil Castanhal, PA. Para a confecção dos compósitos foi utilizado o processo de moldagem manual, hand-lay-up,

utilizando-se um molde em madeira, composto de duas partes iguais, revestidas internamente com fôrmica, e um tubo de PVC como parte interna, conforme apresentado na Figura 1.

O tecido de juta, tal como recebido da indústria foi cortado na largura equivalente ao molde, e com o comprimento necessário para produzir compósitos com duas, quatro e seis camadas de reforço, teores de fibra de 22, 28 e 31 % respectivamente. Os tecidos foram previamente pesados e enrolados ao redor da parte central do molde, sendo a seguir impregnados pela resina. O molde então foi fechado e desmoldado após o período de 8 horas.

## 2.2. Resistência à pressão hidrostática

Corpos de prova tubulares para ensaios de resistência à pressão hidrostática foram confeccionados a partir dos tubos produzidos

com teor de fibras de 31% em massa, com dimensões de 400 mm de comprimento e 82 mm de diâmetro. O ensaio foi realizado utilizando gás nitrogênio garantindo assim a distribuição uniforme da pressão na parede e o cálculo da pressão horizontal máxima atuante nas paredes de silos destinados ao armazenamento de cimento, com relação altura/diâmetro iguais a 1,5; 2,5 e 3,0, respectivamente. A simulação das pressões suportadas por silos em tamanhos reais foi realizada tomando-se como base a Norma DIN 1055 [3] conforme descrito pelas equações 1 a 6. A partir do cálculo do raio hidráulico ( $R$ ) descrito na equação 01 são calculadas as pressões horizontal (Eq. 2), vertical (Eq. 3) e de atrito por metro de superfície (Eq. 4) ocorrida no silo durante o carregamento de cimento tendo-se como base a densidade do produto armazenado ( $\gamma$ ), o coeficiente de atrito do produto com a parede do silo ( $\mu$ ), a relação entre as pressões horizontais e verticais ( $K$ ) e a profundidade do silo abaixo da superfície efetiva ( $Z$ ).

$$R = 0,25 d_c \quad (1)$$

$$P_{hc} = \frac{\gamma R}{\mu} \left( 1 - e^{-\frac{\mu K Z}{R}} \right) \quad (2)$$

$$P_{vc} = \frac{\gamma R}{\mu K} \left( 1 - e^{-\frac{\mu K Z}{R}} \right) \quad (3)$$

$$P_{wc} = \gamma R \left( 1 - e^{-\frac{\mu K Z}{R}} \right) \quad (4)$$

A partir dos cálculos de pressões pelas equações de 2 a 4, e utilizando-se o coeficiente de

sobrepressão de descarregamento central recomendada pela Norma DIN 1055 [3], calcula-se a pressão horizontal (Eq. 05) e de atrito (Eq. 6) durante o descarregamento do cimento no silo.

$$P_{hd} = C \times P_{hc} \quad (5)$$

$$P_{wd} = 1,1 \times P_{wc} \quad (6)$$

O cálculo do esforço de tração atuante na parede do silo foi realizado tendo como parâmetros as pressões calculadas através das equações 02 a 06, para a relação hipotética altura/diâmetro do silo de 1,5 e 3 m devido estas serem provenientes das pressões horizontais calculadas para o carregamento e descarregamento do produto (cimento) nas paredes do silo conforme apresentado na Figura 2.

As sobrepressões são computadas por meio da pressão horizontal de descarregamento, que ocorrem nas paredes dos silos, e para o cálculo da força de tração atuante nas paredes utilizar-se-á a pressão horizontal na descarga e o diâmetro do silo.

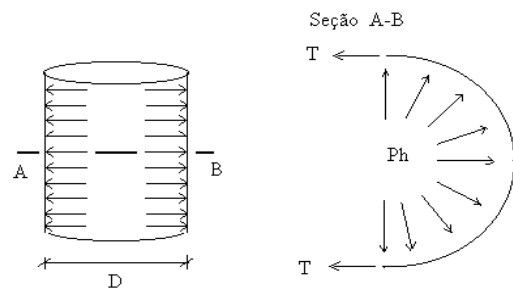


Figura 2. Distribuição da pressão horizontal no silo e o efeito da força de tração

Durante o descarregamento ocorre sobrepressões horizontais nas paredes do silo, e estas são usadas para o cálculo da força de tração (T).

$$T = \frac{P_h \times D}{2} \quad (7)$$

## 2.3. Resistência ao impacto por queda de dardos

O ensaio de resistência ao impacto foi realizado com base na Norma NBR 14262 [4] para os compósitos com teor de fibras de 31 % em massa, utilizando-se uma coluna de 2 m de altura e pesos de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 kg.

A Tabela 1 reporta dados que são utilizados no ensaio de resistência ao impacto por dardo, e neste ensaio foram adotados o DN (diâmetro nominal) 75 mm e PN (pressão nominal) 0,4 MPa (devido ao diâmetro do corpo de prova, adequando-se pesos de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 kg), seguindo a norma ABNT-NBR 14312 (1999) para tubos de PVC.

Tabela 1. Dados utilizados nos testes de resistência ao impacto

DN (mm)	PN (MPa)	Nº de impactos	Peso do percussor (kg)
50	0,4	3	1,5
75	0,4	4	2,0
100	0,4	6	3,0

## 2.4. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com base na norma NBR 12770 [5], em corpos de prova com teores de fibras de 22, 30 e 32%, espessuras de 3, 4 e 6 mm respectivamente, em uma máquina FARNELL, operando a uma velocidade de carregamento 1,27 mm.min<sup>-1</sup> e uma célula de carga de 50 kN conectada a um sistema de aquisição de dados. Um extensômetro elétrico

foi colado no sentido longitudinal do corpo de prova para a medição da deformação do mesmo durante o ensaio.

Segundo a norma ASA.B.31 [6], a tensão máxima devido à pressão interna ou externa não deve ultrapassar a tensão admissível do material na temperatura considerada, ou seja, a tensão circunferencial.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Resistência à pressão hidrostática

O valor máximo da pressão hidrostática de ruptura dos corpos de prova foi de 1,8 MPa, que submeteu à parede a tensão de tração (tensão circunferencial) de 22,5 MPa, enquanto a tensão de tração máxima atuante nas paredes de silos cilíndricos com altura de três, seis e nove metros e diâmetros de dois e três metros (Tabela 2) é de 19,23 MPa. Portanto, o compósito (poliéster/tecido de juta) com três milímetros de espessura é adequado para construção de silos cilíndricos com relação H/D = 3 e espessura de três milímetros, para estocagem de cimento.

Tabela 2. Tensão de tração com H/D = 1,5 e 3

H(m)	Tensão de tração (MPa)					
	e = 3mm		e = 4mm		e = 6mm	
	D = 2m	D = 3m	D = 2m	D = 3m	D = 2m	D = 3m
3,0	6,81	12,29	5,11	9,22	3,40	6,15
6,0	8,55	17,24	6,41	12,93	4,27	8,62
9,0	8,99	19,23	6,74	14,42	4,50	9,61

Apresenta-se na Figura 3 a forma de ruptura do compósito tubular (poliéster/tecido de juta) durante os ensaios de pressão hidrostática. Observa-se ainda, que a fissuração ocorreu na emenda do molde interno, o que possivelmente em outra maneira de confecção ou de moldagem (pultrusão ou filament winding), poderia aumentar a

resistência à tração do tubo. Como existem produtos sólidos agressivos aos metais, logo o compósito (poliéster/tecido de juta) apresenta-se como uma alternativa para construção de silos para armazenamento destes produtos.

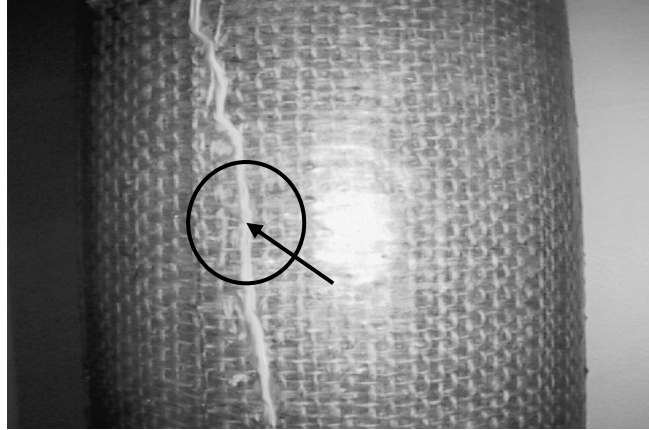


Figura 3. Compósito tubular após ensaio de pressão hidrostática (seta indicando a fissura do compósito após o ensaio)

### 3.2. Resistência ao impacto por queda de dardo nos compósitos tubulares

Os resultados obtidos com o ensaio de impacto são ilustrados na Figura 4. Podendo ser observado o comportamento para cada peso utilizado no teste. Verificou-se que com

os dardos de massa iguais a 0,5 e 1 kg os tubos não foram perfurados (Figura 4A e 4B), enquanto que para os de massa de 1,5kg ocorreu ruptura (perfuração) após o quarto impacto. Já para o dardo com massa de 2 kg houve ruptura no primeiro impacto (Figura 4D).

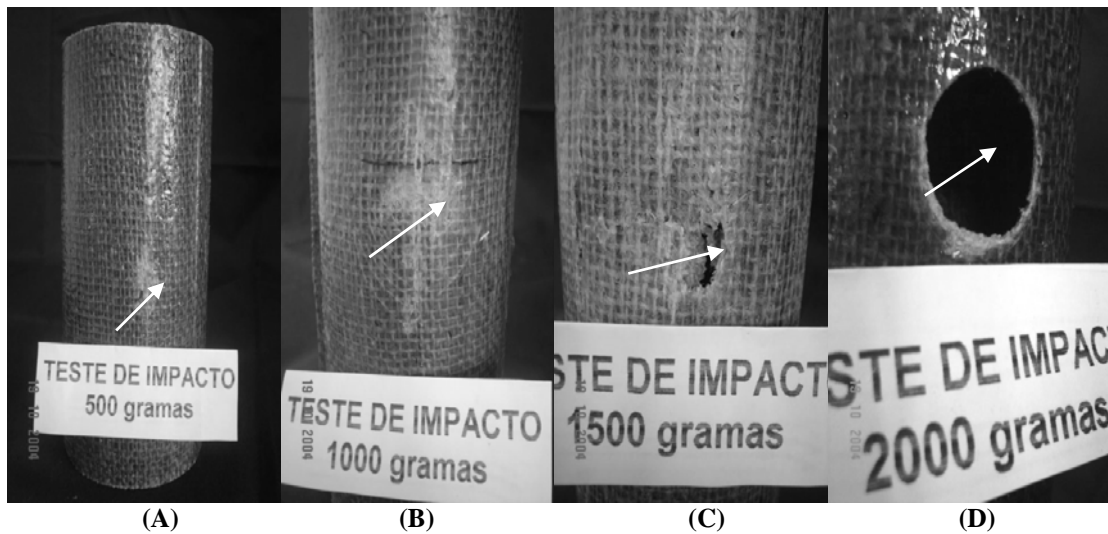


Figura 4. Compósitos tubulares após ensaio de resistência ao impacto com peso de: (A) 0,5 kg, (B) 1 kg, (C) 1,5 kg e (D) 2 kg.

Para os compósitos ensaiados com 0,5; 1,0 e 1,5 kg, conforme a Tabela 1 resultou a danificação superficial em 0,5 e 1,0 kg, com o número de impactos previstos. Já no caso do compósito com o percussor de 1,5 kg ficou perfurado no quarto impacto em menos proporção que o de 2,0 kg que perfurou no primeiro impacto. Mesmo atingindo esta perfuração, os silos podem ser construídos com este compósito, devido à facilidade de processamento. Pois, caso ocorra acidente

semelhante aos testes, o conserto pode ser feito no próprio local que se encontra estabelecido o silo.

### 3.3. Resistência à compressão

Neste ensaio pode-se determinar através do diagrama tensão x deformação, algumas propriedades importantes como, por exemplo: o módulo de elasticidade. (sabendo-se que este diagrama varia de material para material). Os

resultados obtidos neste ensaio são ilustrados na Tabela 3. O compósito com seis camadas de fibras obteve menor resistência à compressão. Esta baixa tensão é devido à dificuldade na confecção do

molde (por não haver boa impregnação do poliéster na forma empregada).

Tabela 3. Ensaio de resistência à compressão no compósito tubular (poliéster/tecido de juta)

Nº de camadas de fibras	Módulo de elasticidade (GPa)	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação (%)
3	2,5	17,93	25,0	1,4
4	2,7	19,35	24,5	1,09
6	2,0	14,30	11,5	0,7

Observa-se na Tabela 3, que a tensão de ruptura no compósito (poliéster/tecido de juta) com 22% de fibra, ou seja, 3 camadas foi a mais elevada e apresentou maior deformação. Enquanto que o compósito com teor de fibras de 29% (quatro camadas) obteve o melhor comportamento, atingindo tensão de ruptura e módulo de elasticidade mais elevado.

Para silos com relação  $H/D \leq 1,5$ , é opcional a colocação de colunas internas para absorver as forças de atrito, porque a pressão vertical é dominante e a pressão de atrito deverá ser absorvida pelas paredes do silo sem provocar flambagem.

Para verificar se o compósito poliéster/tecido de juta, com os teores de fibras utilizados poderão ser aplicados em silos, foram realizados cálculos de pressão de atrito para simular as tensões de compressão que atuarão nas paredes dos silos cilíndricos verticais. Para isso utilizou-se as alturas de 3 e 6 m e diâmetros de 3, 6 e 9 m. Desta forma pode-se calcular tensão de compressão para relação altura/diâmetro de 1,0; 1,5; 2,0; 3,0.

São apresentadas na Tabela 4 as tensões de compressão para as relações altura/diâmetro estudadas e as tensões determinadas experimentalmente em função dos teores de fibra de juta no compósito.

Tabela 4. Tensão de compressão experimental e teóricos para silos com  $H=3$ ; 6 e 9m e  $D=2$  e 3m

Espessura (mm)	Dados experimentais (MPa)	Dados teóricos					
		H = 3 m		H = 6 m		H = 9 m	
		Diâmetro (m)		Diâmetro (m)		Diâmetro (m)	
		2	3	2	3	2	3
3	25,0	7,3	8,2	21	26	36	47
4	24,5	5,4	6,2	16	19	27	35
6	11,5	3,6	4,0	10	13	18	24

### 3.4. Esforço de tração nas paredes do silo

Observou-se que a tensão de tração diminuiu à medida que aumentou a espessura. Quanto ao valor teórico da tensão de tração em relação à altura e ao diâmetro, revelou-se com aumento insignificante.

De acordo com Dantas et. al. (2004) no ensaio de resistência à tração, verificou-se que o compósito (poliéster/tecido de juta) atingiu a tensão de tração máxima de 32,5 MPa para amostras planas do compósito. Para efeito

comparativo com as tensões de tração calculadas para atuarem em silos, utilizam-se apenas os dados da tensão de tração com espessura de 3 mm, já que o ensaio foi feito com os compósitos laminados com esta espessura. Comparando os dados da resistência à tração experimentais com os calculados para silos de 2 e 3 m de diâmetros e com 3, 6 e 9 m de altura, observa-se que os valores experimentais das tensões de tração (Tabela 4) são superiores aos valores da tensão de tração calculadas para o diâmetro e altura máxima (19,23

MPa – Tabela 2). Permitindo assim, a utilização deste compósito (poliéster/ tecido de juta) para construção de silos cilíndricos verticais com relação altura/diâmetro igual às utilizadas nos cálculos.

Segundo Almeida & Godoy [7], existem dois problemas que ocorrem em silos carregados com sólidos, com relação à distribuição das pressões: imperfeição nas suas paredes e as pressões na zona das imperfeições.

O efeito da força de tração é proveniente das pressões horizontais obtidas através do carregamento e descarregamento do produto nas paredes do silo. Daí a importância de se calcular as pressões antes de qualquer projeto de para determinar o material e as dimensões de silos.

Foram feitas simulações de pressões horizontais de atrito, adotando a Norma DIN 1055 [3], para projeto de silo de fundo plano, construído com o compósito poliéster/ tecido de juta para o

armazenamento de cimento portland ou outro material agressivo aos metais. Estas pressões foram calculadas para silos com 2 e 3 m de diâmetro e 3, 6 e 9 m de altura (Tabela 5). De acordo com estes dados calculou-se a tensão de tração (Tabela 6). Estes cálculos foram feitos baseados nas três espessuras do compósito tubular (poliéster/tecido de juta) de 3 mm; 4 mm; e 6mm e os dois diâmetros hipotéticos e as alturas previstas. Observou-se que a tensão de tração diminuiu à medida que aumentou a espessura, conforme Figura 7.

Como se observa na Figura 5, a cada profundidade haverá uma pressão horizontal que atuará na parede e por sua vez, provocará esforço de tração circunferencial, sendo máximo na base do silo. Esta tração é provocada pela força de atrito (Figura 6) nas paredes durante o armazenamento do produto no silo.

Tabela 5. Pressões atuantes nas paredes dos silos

H (m)	Phc (kPa)	Pvc (kPa)	Pwc (kPa)	Pwd (kPa)	Phd (kPa)
3,0	17,0	11,0	6,0	6,6	20,4
6,0	21,4	13,8	7,5	8,2	25,6
9,0	22,5	14,6	7,9	8,7	27,0

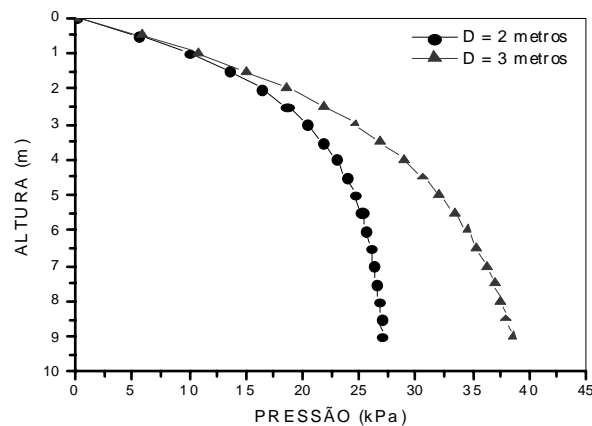


Figura 5. Pressões atuantes nas paredes dos silos

Observa-se nas Figuras 5 e 6, as curvas de pressão horizontal e força de atrito calculadas para atuar nas paredes dos silos. A pressão horizontal provocará tração circunferencial, devido à forma geométrica do silo. Adotou-se a pressão máxima em cada altura analisada para comparar com a tensão de tração determinada com cada corpo de prova dos compósitos.

Nas Figuras 7A e 7B são apresentadas as tensões de tração que poderão atuar em silos com 2 e 3 m de diâmetros e espessura da parede de 3, 4 e 6

mm. Observa-se ainda, constam na Tabela 6, as tensões máximas (calculadas) das paredes dos silos. Verifica-se que as tensões determinadas nos corpos de prova são superiores às calculadas para atuar nos silos, de acordo com as condições supostas.

#### 4. Conclusões

- Compósitos tubulares com três camadas de reforço, testados em impacto por queda de dardo a 2m de altura, sofreram danos graves com pesos

superiores a 1,5kg e foram completamente perfurados por um peso de 2,0 kg.

• A pressão hidrostática dos compósitos tubulares foi de 1,8 MPa, o que submete a parede a uma tensão de tração (circunferencial) de 22,5MPa. Os compósitos tubulares com três camadas de reforço ao atingir esta pressão apresentaram fissuras e não estilhaçamento, o que indica que podem ser utilizados para armazenagem de produtos pulverulentos ou granulares em pressões superiores a 1,8 MPa sem que sua integridade física seja ameaçada.

• A comparação da pressão hidrostática com a pressão horizontal calculada pela norma DIN 1055, demonstra que pode construir silos com materiais compósitos (poliéster/tecido de juta) com relação altura/diâmetro igual a 3.

• A partir dos dados obtidos foram estimadas as tensões de tração nas paredes de silos verticais com diferentes relações altura/diâmetro. Onde os compósitos tubulares desenvolvidos atingiram propriedades superiores às requeridas.

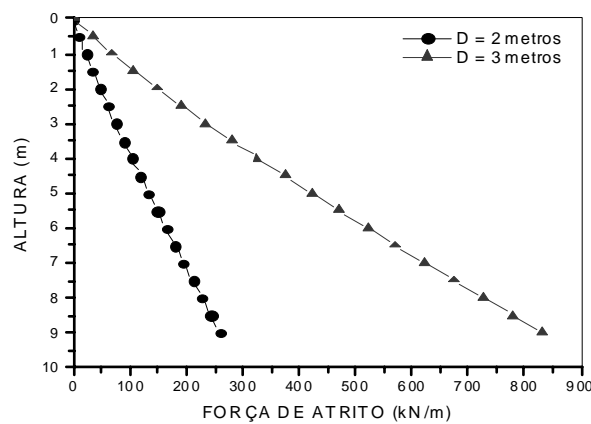


Figura 6. Força de atrito sobre as paredes do silo

Tabela 6. Dados da tensão de tração

H (m)	Tensão de tração (MPa)					
	e = 3mm		e = 4mm		e = 6mm	
	Diâmetro (m)		Diâmetro (m)		Diâmetro (m)	
	2	3	2	3	2	3
3,0	6,8	12,3	5,1	9,2	3,4	6,1
6,0	8,5	17,2	6,4	12,9	4,3	8,6
9,0	9,0	19,2	6,7	14,4	4,5	9,6

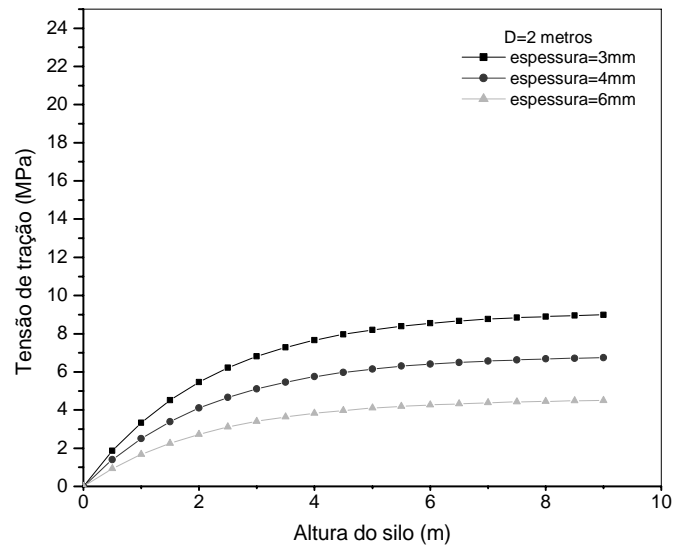
### Agradecimentos

À CAPES e ao CNPq pelo o apoio financeiro e, à Companhia Têxtil de Castanhal – PA, VI FIBER e RESANA S/A, pela doação dos insumos que permitiram a realização da pesquisa, DOLOMIL e CANDE.

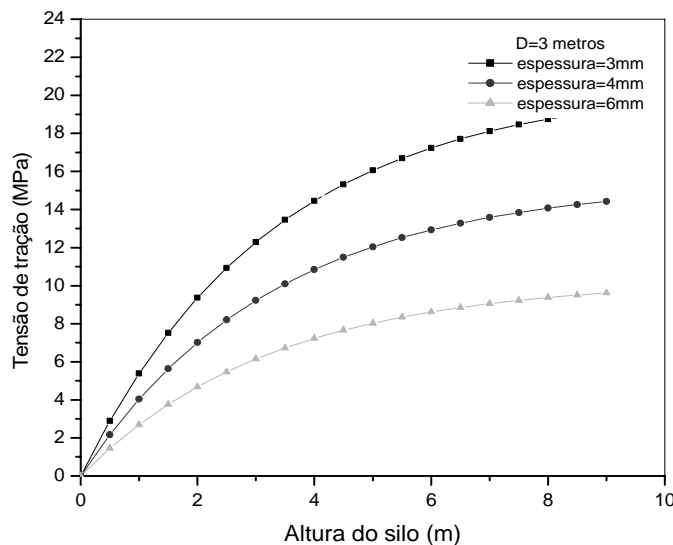
### Referências

- [1] Calil Jr., C.; Nascimento, J. W. B.; Araújo, E. C. Silos metálicos multicelulares. São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.117p.
- [2] Dantas, R. R. Uso de compósitos (poliéster/tecido de juta) para construção de silos cilíndricos verticais. Campina Grande: UFCG, 2004.100p. Dissertação de Mestrado.





(A)



(B)

Figura 7. Tensão de tração no silo com H = 3; 6 e 9m (e = 3; 4 e 6 mm): (A) D = 2m e (B) D = 3m

- [3] DIN 1055 – Lastannahme für Bunker, Blatt 6, Lasten in silozellen. German, 1987. 12p.
- [4] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 14262, NBR 14312, NBR 5683. Ed. Copyright (1999), Janeiro de 1999.
- [5] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12770. Determinação da resistência à compressão não confinada. Ed. Copyright (1990), Outubro de 1992.
- [6] ASA-B.31 - American Standards Association - Published by the American Society of Mechanical Engineers, United Engineering Center, 345 East 47th Street, New York, New York 10017.
- [7] Almeida, S. D., Godoy, L. A. Stresses redistributions due to circumferential imperfections and cracks in vertical silos, *Bulk Solids*. Vol. 16, Jul/Set, 1996.