

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA LUIZA RIBAS DE CHRISTO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS
CÔNICOS DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO
(PRFV)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

MARIA LUIZA RIBAS DE CHRISTO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS
CÔNICOS DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO
(PRFV)**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
do curso de Engenharia Civil do Departamento
Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR, como requisito parcial para a obtenção
do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA
2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS CÔNICOS DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV)

Por

MARIA LUIZA RIBAS DE CHRISTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 06 de maio de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Profa. Elisabeth Penner, Dra.
UTFPR

Prof. Amacin Rodrigues Moreira, MSc.
UTFPR

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 4900 - Curitiba - PR
Brasil
www.utfpr.edu.br dacoc-ct@utfpr.edu.br telefone DACOC: (041) **3279-4500**

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Technofix, em especial ao Roberto, por me apresentar ao mundo dos materiais compósitos e me incentivar a desbravá-lo.

Agradeço imensamente também, ao meu professor orientador Wellington, por aceitar o desafio de me direcionar nesta empreitada que, em alguns aspectos, lhe era tão desconhecida quanto para mim.

Agradeço aos meus amigos Fabiola e Rigo, por sua paciência e ajuda na modelagem da estrutura.

Por fim, a todos os outros, amigos e família, que tanto amo.

RESUMO

CHRISTO, Maria Luiza Ribas de. Análise do comportamento estrutural de elementos cônicos de poliéster reforçado com fibra de vidro. 2016. 47 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Os materiais compósitos, apesar de muito antigos, passaram a ganhar importância no século XX, com o surgimento das fibras sintéticas. Atualmente está presente nos segmentos naval e aeronáutico, pois apresentou diversas vantagens em relação aos materiais antes utilizados como matéria prima. Sua participação em outros segmentos do mercado ainda é limitada. O segmento elétrico encontrou no material compósito uma ótima solução para postes e acessórios que precisam ser instalados em locais de difícil acesso. Porém, por ser um material novo no mercado, a defasagem de informações e estudos sobre ele é grande.

O presente trabalho analisa estruturalmente um poste de material compósito, mais precisamente poliéster reforçado com fibra de vidro. Foram obtidos valores de tensões e deformações em um programa de modelagem estrutural e comparados com resultados obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: PRFV, resina poliéster, fibra de vidro, poste, resistência, flexão, ruptura.

ABSTRACT

CHRISTO, Maria Luiza Ribas de. Analysis of structural behavior of tapered polyester reinforced with glass fiber elements. 2016. 47 pages. Work Completion of course Bachelor of Civil Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Composite materials, although very old, began to gain importance in the twentieth century, with the rise of synthetic fibers. It is currently present in the naval and aeronautical segments, because presented several advantages over materials before used as raw material. Their share in other market segments is still limited. The electrical segment found in the composite material a great solution for poles and accessories, which have to be installed in places of difficult access. However, as a new material in the market, there is a lag of information and studies on it at.

This paper examines structurally a pole made of composite material, more specifically glass fiber reinforced plastic. Stress and deformation values were obtained in a structural modeling program, and compared with results obtained experimentally.

Key-words: GRP, polyester resin, glass fiber, pole, resistance, bend, break.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre classes de materiais de engenharia, mostrando a evolução dos compósitos	5
Figura 2 – Tipos de fibra de vidro	7
Figura 3 – Processo de enrolamento filamentar	13
Figura 4 — Representação de tipos de enrolamento filamentar	14
Figura 5 – Ensaio Mecânico	23
Figura 6 – Forças atuantes na estrutura	23
Figura 7 – Representação das divisões da estrutura	26
Figura 8 – Estrutura Indeformada	28
Figura 9 – Vista em corte da estrutura	29
Figura 10 – Curvas elásticas da estrutura obtidas no programa de análise computacional	31
Figura 11 – Engastamento da estrutura	38
Figura 12 –Estrutura rompida	39
Figura 13 – Correlação entre ovalização e tensões	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaio de caracterização do PRFV	21
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões da estrutura	21
Tabela 2 – Resultados de deslocamento para carga de 50 e 100 daN	29
Tabela 3 – Resultados de deslocamento para carga de 150 e 200 daN	30
Tabela 4 – Resultados de deslocamento para carga de 250 e 300 daN	30
Tabela 5 – Resultados de deslocamento para carga de 350 e 400 daN	30
Tabela 6 – Resultados de deslocamento para carga de 450 e 500 daN	31
Tabela 7 – Resultados de tensão normal para carga de 50 e 100 daN	32
Tabela 8 – Resultados de tensão normal para carga de 150 e 200 daN	33
Tabela 9 – Resultados de tensão normal para carga de 250 e 300 daN	34
Tabela 10 – Resultados de tensão normal para carga de 350 e 400 daN	35
Tabela 11 – Resultados de tensão normal para carga de 450 e 500 daN	36
Tabela 12 – Resultados de tensão normal para carga de 550 daN	37
Tabela 13 – Variação do diâmetro no ensaio mecânico.....	39
Tabela 14 – Deformação no topo no ensaio mecânico	40
Tabela 15 – Comparação entre resultados de deformação	40
Tabela 16 – Diferenças entre deslocamentos obtidos no programa computacional	41
Tabela 17 – Variação do diâmetro	42

LISTA DE ABREVIações

ABMACO	Associação Brasileira de Materiais Compósitos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALMACO	Associação Latino-América de Materiais Compósitos
ASTM	American Society for Testing Materials
NBR	Norma Brasileira
PRFV	Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro
MEF	Método dos Elementos Finitos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICATIVA	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 HISTÓRICO	4
2.2 FIBRAS	5
2.3 MATRIZES	8
2.4 MATERIAL COMPÓSITO	10
2.5 POLIÉSTER REFORCADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV)	11
2.6 PROCESSOS DE PRODUÇÃO	11
2.6.1 Processo De Enrolamento Filamentar (<i>Filament Winding</i>)	12
2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO COMPÓSITO POLIMÉRICO	14
2.8 MODELOS MATEMÁTICOS	15
2.8.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)	16
2.8.2 Modelo Desenvolvido pelo <i>National Physical Laboratory United Kingdom</i> (NPL-UK) (1999)	17
2.8.3 Modelos de Análise de Falha por Ruptura	18
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	20
3.2 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA	21
3.3 DEFINIÇÃO DAS AÇÕES SOLICITANTES E INCÓGNITAS DE PROJETO	22
3.4 ESCOLHA DO MODELO MATEMÁTICO	24
3.5 ANÁLISE ESTRUTURAL	24
4. RESULTADOS	28
4.1 ANÁLISE COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA	28
4.2 ENSAIO MECÂNICO NA ESTRUTURA	38

4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	40
5. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS.....	45
APÊNDICE A - Curvas elásticas obtidas pelo programa de dimensionamento PRFV.....	47

1 INTRODUÇÃO

Uma das características mais virtuosas do ser humano é a sua constante busca por conhecimento. Desde o início dos tempos está à procura de novas tecnologias para melhorar moradias, produção de alimentos, locomoção, entre outros. A construção civil é um mercado de constante inovação. A madeira é um dos materiais mais utilizados dentro da indústria da construção (FERRARI *et al.*,2009 *apud* STINGHEN,2002). Junto a ela, o concreto e o aço ganharam seu espaço e se consagraram no segmento. Porém, como todo material, os três têm suas desvantagens. Buscando suprir as características problemáticas destes materiais, a partir da metade do século XX, o mercado da construção civil abriu espaço para um novo concorrente: o compósito.

Compósito é o nome comercial dado à combinação de dois ou mais materiais com funções estruturais distintas. Normalmente, um compósito é formado por reforço e matriz. Reforço é o material que dará a resistência mecânica ao compósito, enquanto a matriz tem a função de aglomerar o material e distribuir as tensões (CALLISTER, 2002).

O material compósito era muito utilizado na antiguidade. Exemplo disso são os tijolos de barro e palha utilizados no Antigo Egito. Nesta época os reforços eram fibras naturais como palha e papiro (HART, 1996). Porém, este tipo de material perdeu espaço depois da popularização da madeira, concreto e aço. No século XX as fibras sintéticas surgiram no mercado (ORTENZI, 2007). A partir daí, o compósito passou a ser alvo de estudo de muitos pesquisadores, pois suas características se mostravam extremamente vantajosas: alta resistência mecânica, boas propriedades químicas, e, principalmente, baixo peso específico quando comparados aos materiais concorrentes.

Apesar de bastante estudado nos últimos 50 anos, ainda há muito a ser pesquisado sobre as propriedades deste tipo de material para viabilizá-lo como um concorrente direto na indústria da construção civil. Pode-se considerar que trabalhar com concreto, madeira e aço é relativamente fácil, pois há muita informação disponível quando se necessita saber sobre suas características, cálculos para dimensionamentos, entre outros. Já para os compósitos, a escassez de material disponível se dá por dois motivos: o primeiro é devido ao material ainda ser muito novo e estar sendo pesquisado. O segundo é a dificuldade da generalização de

informações, já que as propriedades mudam conforme o tipo de compósito analisado e das múltiplas combinações possíveis.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar estruturalmente um elemento cônico de compósito produzido pelo método de filamento contínuo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Identificar as propriedades do compósito a ser modelado, tais como tipo de fibra, matriz, catalisador, aditivos, relação teor de fibra/matriz, características de cada componente;
- Determinar os métodos de cálculos a serem utilizados;
- Analisar numericamente as tensões e deformações da estrutura. As principais características a serem analisadas serão a tensão normal de ruptura do material, a pressão de ovalização e a deformação da estrutura.

1.3 JUSTIFICATIVA

O compósito é um produto que está tendo uma grande demanda no mercado. Suas propriedades mecânicas, químicas e físicas são extremamente vantajosas, o que torna o produto alvo de muita especulação. Segundo publicação de 2015 da ALMACO (Associação Latino Americana de Materiais Compósitos), a indústria da construção civil consumiu 51% do total material compósito produzido no país. O setor de energia elétrica teve uma representatividade bem menor neste consumo, apenas 5%, conforme a publicação citada acima. Os materiais compósitos utilizados na construção civil são, em sua maioria, produzidos por *Hand Ly Up*, laminação ou pultrusão. Para estes tipos de produção, há uma quantidade razoável de estudos e métodos de cálculo divulgados. Mas, no setor de energia elétrica, a maioria dos produtos em compósito, como postes e cruzetas, é produzida pelo método de filamento contínuo. Neste método de fabricação há algumas características mecânicas diferentes a serem analisadas. Como o setor não tem um expressivo

consumo no mercado, há certa defasagem de informações disponíveis. Portanto, a principal motivação deste trabalho é contribuir com informações sobre métodos de cálculo para estruturas cônicas produzidas em filamento contínuo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO

Os materiais compósitos já existiam na natureza muito antes de assim serem definidos pelo homem.

“The ‘composites’ concept is not a human invention. Wood is a natural composite material consisting of one species of polymer — cellulose fibers with good strength and stiffness — in a resinous matrix of another polymer, the polysaccharide lignin” (HARRIS, 1999).

Não demorou muito para que o homem percebesse que a combinação de materiais com características distintas poderia ser extremamente vantajosa. No antigo Egito os tijolos de adobe foram largamente utilizados. Eram uma mistura de lama e palha cozidos ao sol (HART, 1996). Os romanos combinaram a utilização de pozolana, cal e areia, o que possibilitou a construção de obras de grande magnitude como o Coliseu e o Panteão (KAEFER, 1998).

“Concrete is a classic example of a ceramic/ceramic composite, with particles of sand and aggregate of graded sizes in a matrix of hydrated Portland cement” (HARRIS, 1999).

Harris (1999) divide os compósitos em três tipos: plásticos preenchido por metal, compósitos de matriz metálica ou cerâmica, e plástico reforçado com fibras. A relação entre eles pode ser observada na figura 1:

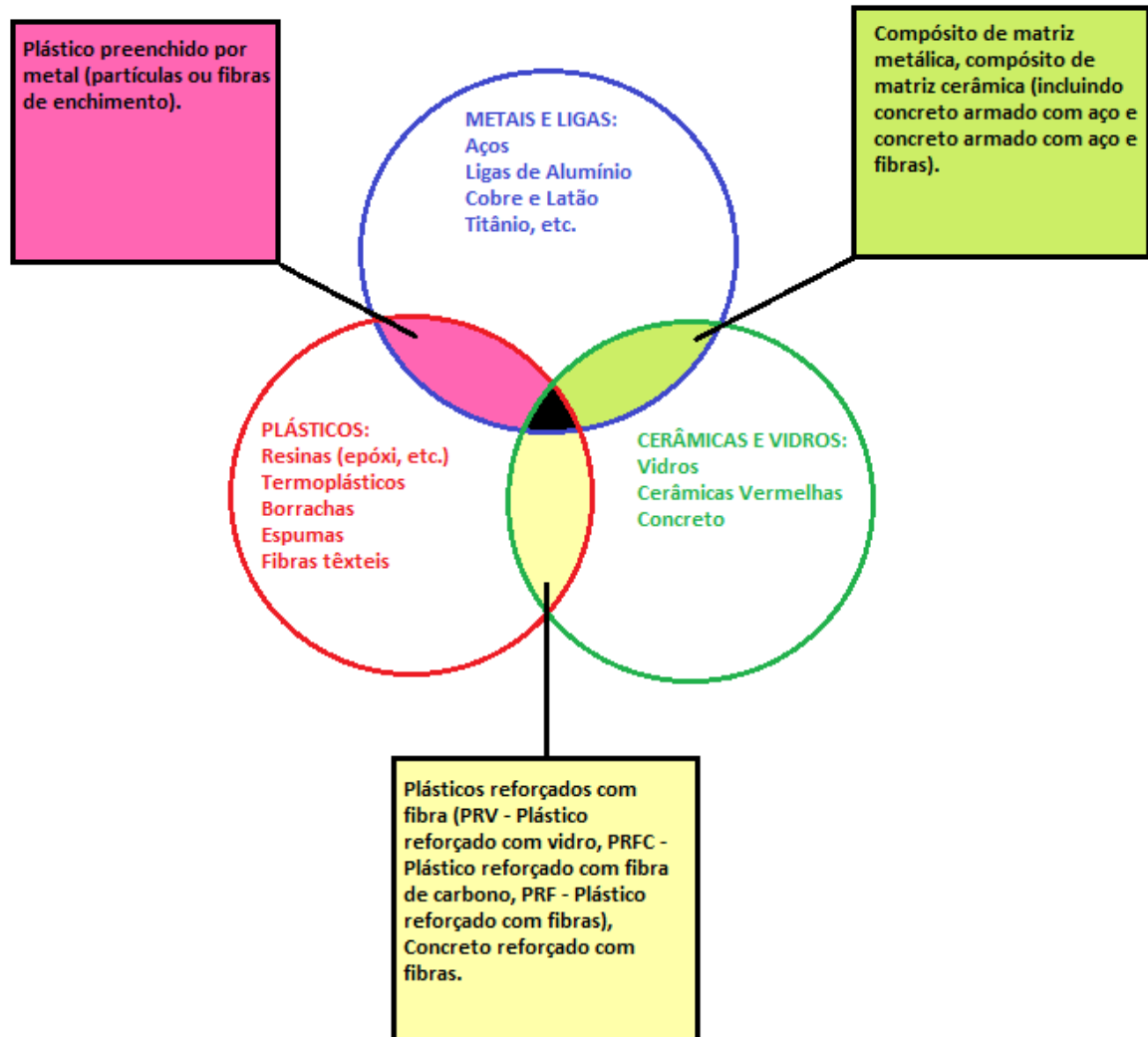


FIGURA 1 – Relação entre classes de materiais de engenharia, mostrando a evolução dos compósitos.
Fonte: Adaptado de HARRIS, 1999

Os compósitos plásticos foram desenvolvidos no início da Segunda Guerra Mundial pelo exército norte-americano, pois apresentavam várias vantagens: baixo peso, alta resistência mecânica e à corrosão. Os norte-americanos utilizaram materiais compósitos exclusivamente para o setor bélico, até que, na década de 50 estes materiais passaram a fazer parte também da produção na indústria automotiva. A partir de então conquistou um significativo espaço no mercado e passou a ser utilizado nas mais diversas aplicações, tais como tubos para construção civil e até mesmo postes de iluminação e transmissão de energia. (ANDRADE, ABMACO, 2008).

2.2 FIBRAS

As fibras, também conhecidas como reforços do material compósito, são responsáveis pela rigidez e resistência mecânica do compósito. Podem ser naturais ou sintéticas. A utilização das fibras naturais depende da sua disponibilidade na natureza. No Brasil as mais utilizadas são as fibras de curuá e cana de açúcar (ZURSTRASSEN, ABMACO, 2008). Dentre as fibras sintéticas destacam-se as de aramida, vidro e carbono (FARIA, 2007). A escolha do tipo de fibra a ser utilizada é feita baseada em várias considerações: carregamentos aos quais a estrutura estará submetida, custo do material e técnica de fabricação empregada (MARINUCCI, 2011). O autor cita ainda a possibilidade de combinação de tipos diferentes de fibra, quando as características do projeto requerem características não encontradas apenas em uma delas. São os chamados compósitos híbridos.

As fibras sintéticas em geral apresentam elevada resistência mecânica e baixo peso específico. As fibras de carbono são as que apresentam os maiores índices de rigidez dentre as anteriormente citadas (ZURSTRASSEN, ABMACO, 2008). Devido a sua baixa deformação, a fibra de carbono é o reforço predominante na fabricação de compósitos estruturais. O fato de este tipo de fibra ter um preço elevado inviabiliza a sua utilização em projetos menos complexos. (MARINUCCI, 2011).

As fibras de aramida são também conhecidas como Kevlar®, nome dado pela empresa que a desenvolveu (MARINUCCI, 2011). Marinucci (2011) descreve como principais qualidades deste tipo de fibra a resistência ao fogo, solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes. Além disso, a baixa densidade é um fator diferencial que faz com que ela seja largamente utilizada na indústria bélica e de segurança pessoal (ZURSTRASSEN, ABMACO, 2008). Segundo Marinucci (2011), as fibras de aramida custam menos do que as fibras de carbono, porém ainda são mais caras que as fibras de vidro.

As fibras de vidro são as que proporcionam a melhor relação custo/benefício dentre os reforços utilizados na fabricação de compósitos poliméricos. Parte disso se deve à facilidade em encontrar as matérias primas necessárias para a sua fabricação (MARINUCCI, 2011). Zurtrassen (ABMACO, 2008) divide as fibras de vidro em seis tipos:

- Vidro – E (*electrical glass*): boa resistência a descargas elétricas (não é condutor de corrente).

- Vidro – C (*chemical glass*): elevada resistência química tanto em meios ácidos como alcalinos. Normalmente utilizados na forma de véu como barreira protetora.

- Vidro – ECR: resistência química a meios ácidos.
- Vidro ecológico: não emprega boro e flúor na sua composição.
- Vidro – AR (*Alkali-resistant glass*): resistência química a meios básicos.
- Vidros de alto desempenho: elevadas propriedades mecânicas.

Os tipos mais utilizados na produção de compósitos são os vidros “E” e “AR”, compatíveis com vários tipos de aplicação. Os vidros de alto desempenho são utilizados na indústria aeroespacial e o tipo “C” é pouco competitivo devido ao seu alto preço (JUNIOR, 2007).

Quanto à sua forma, as fibras podem ser contínuas ou curtas e fragmentadas. No mercado as fibras são apresentadas na forma de mantas, tecidos ou *rovings*. As mantas são constituídas de fragmentos de fibra ou filamentos contínuos unidos por um material ligante. Apresentam uma distribuição relativamente uniforme da resistência e são muito utilizadas nos processos de laminação manual (MARINUCCI, 2011). Os tecidos são semelhantes às mantas em sua forma física, porém possuem características mecânicas diferenciadas, pois se tratam da trama de fibras contínuas. A fibra também é fornecida em bobinas (*Roving*) (ZURSTRASSEN, ABMACO, 2008). Os diversos tipos de fibra de vidro estão ilustrados na figura 2:



TECIDO DE FIBRA DE VIDRO



MANTA DE FIBRA DE VIDRO



ROVING DE FIBRA DE VIDRO

FIGURA 2 – Tipos de fibra de vidro
Fonte: BORPLAS

Callister (2002) considera que o tamanho e o direcionamento da fibra são fatores determinantes no desempenho estrutural do compósito. “Em relação à orientação das fibras, são possíveis dois extremos: (1) um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e (2) um alinhamento totalmente aleatório”. Já o comprimento da fibra é importante pois é responsável pela magnitude da ligação interfacial das fases reforço e matriz. É necessário um comprimento mínimo para que a matriz transfira os esforços para as fibras de modo que haja uma melhora no desempenho estrutural do compósito.

2.3 MATRIZES

A principal função da matriz em um material composto é servir como material ligante (FARIA 2007 *apud* RIBEIRO 2000). Além disso, Faria (2007) explica que a matriz é a responsável por transferir as cargas aplicadas ao composto para as fibras (responsáveis pela resistência mecânica do mesmo). O mesmo autor ressalta a importância de a ligação ser bem efetuada, de modo que não existam espaços vazios nas interfaces dos materiais para evitar a separação entre eles.

Assim como as fibras, matrizes podem ser naturais ou sintéticas. Waldomiro Moreira em sua publicação no livro *Compósitos I* da ABMACO (Associação Brasileira de Materiais Compósitos, 2008) cita como exemplo de resina natural o breu, material extraído de pinheiros. Já as sintéticas podem ser metálicas, poliméricas e cerâmicas. Segundo Callister (2002) a caracterização dos polímeros se dá da mesma forma que a dos metais. As principais propriedades analisadas são: módulo de elasticidade, limite de resistência à tração e as resistências ao impacto e à fadiga.

Os polímeros são muito sensíveis ao calor. Dependendo da forma e suas ligações químicas, os polímeros são divididos em termoplásticos ou termofixos. Ambos os tipos têm sua forma física modificada quando expostos a altas temperaturas (amolecem) e endurecem quando resfriados. A diferença entre eles é a reversibilidade do processo. Os termoplásticos podem ser amolecidos e endurecidos repetidas vezes, enquanto que os termofixos não amolecem novamente depois de resfriados (FARIA 2007). Parente (2006) cita como principais polímeros termofixos os seguintes:

- Aminoplástico: É resultado da combinação de formaldeído com uréia ou melanina. Suas aplicações usuais são como camadas de proteção superficial e adesivos para laminados.

- Epóxi: Este tipo de polímero é utilizado em várias áreas da engenharia, principalmente para plásticos e compósitos estruturais. Além de sua ótima resistência mecânica, não apresenta grande retração durante o processo de cura, o que o diferencia positivamente dos demais polímeros do grupo.

- Fenólico: Também conhecido como fenol formaldeído é utilizado em peças não tensionadas ou submetidas a leves tensões. Possui boa temperatura de serviço e bom aspecto visual, porém é frágil mecanicamente.

- Poliéster: São bastante utilizadas em compósitos com fibra de vidro (caso deste trabalho). Para que ocorra a reação de polimerização (cura) é necessário submeter a resina ou o compósito à temperaturas altas (70 a 150°C), ou adicionar algum agente catalisador.

- Silicones: São utilizados em laminados e peças elétricas submetidas a altas temperaturas.

Algumas das características dos polímeros podem ser melhoradas através da alteração das suas estruturas moleculares. Para isso são misturadas às resinas substâncias conhecidas como aditivos. Um dos aditivos mais utilizados é o retardador de chamas, já que a maioria dos polímeros são altamente inflamáveis em sua forma pura. Além deste, são comuns os aditivos de enchimento, utilizados para melhorar a resistência mecânica, e aditivos estabilizadores que diminuem a deterioração do polímero quando exposto à radiação ultra violeta e severas condições ambientais (CALLISTER, 2002).

Nas resinas poliéster é importante levar em consideração duas características fundamentais para a sua aplicação: a viscosidade e a tixotropia. A primeira determina a facilidade de impregnação das fibras de vidro e a segunda a capacidade de não escorrimento quando aplicada em superfícies verticais ou inclinadas (FORTE, 2014). Forte (2014) diz que as resinas poliéster são subdivididas em grupos conforme suas características. São estes:

- Ortoftálicas: Utilizadas em vários tipos de aplicação em meios não agressivos. São assim denominadas por possuírem como ácido saturado o ácido ortoftálico. Possuem baixo teor de glicóis livres, o que as garante boa resistência química, porém baixa resistência mecânica quando comparada a outras resinas, pois seu peso molecular é baixo.

- Isoftálicas: São as que possuem ácido isoftálico como principal componente. Diferentemente do ácido ortoftálico, o isoftálico não forma anidridos, o que propicia a geração de um produto com maior peso molecular. Portanto a resistência mecânica deste tipo de resina é considerada boa. Possuem também boa resistência térmica e podem ser utilizadas em meios levemente agressivos.

- Tereftálicas: O ácido reagente é o tereftálico. Porém possuem características químicas e térmicas muito semelhantes às resinas isoftálicas.

- Bisfenólicas: São o produto da reação simplificada do óxido de propileno e do bisfenol A. A sua estrutura possui poucas ligações ésteres, não deixando muito

espaço para ataques hidrolíticos, portanto este tipo de resina é resistente à água. Além disso, possuem boa resistência química, principalmente a meios ácidos.

- Ester-vinílicas: Assim como as bisfenólicas, as resinas éster vinílicas são produto de uma reação envolvendo o bisfenol A, porém desta vez com epícloridina. Possuem boa resistência química, principalmente a meios alcalinos. Apresentam menor rigidez quando comparadas às bisfenólicas.

2.4 MATERIAL COMPÓSITO

A definição de material compósito tem várias interpretações diferentes dentre as publicações sobre o assunto. Composto é qualquer material formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais constituintes. Faria (2007) faz uma consideração importante: “na escala microestrutural, diversos materiais podem ser considerados compósitos, uma vez que são formados por agrupamentos atômicos diferentes”. Porém, o termo compósito normalmente é utilizado para materiais que possuem fases visivelmente distintas. A definição mais compatível com o que será considerado compósito neste trabalho é a descrita por Marinucci (2011): materiais cujas fases constituintes apresentem nítida diferença nas propriedades físicas e químicas, mostrando uma fase descontínua e uma fase contínua.

“A composite material can be defined as a combination of two or more materials that results in better properties than those of the individual components used alone” (CAMPBELL, 2010).

Como já descrito anteriormente, os compósitos podem ser classificados conforme a origem da matriz que o compõe, a qual pode ser polimérica, cerâmica ou metálica. Podem também ser divididos conforme a forma do reforço: particulados, fibrados ou laminados fibra/metal. Nos compósitos particulados partículas dispersas na matriz fazem a função de reforço. Um exemplo conhecido é o concreto, onde a matriz é o cimento e as britas são o reforço. Este tipo de reforço aumenta consideravelmente a rigidez do produto final, porém não é muito significativo no aumento da resistência à tração e flexão. O compósito do tipo laminado fibra/metal é constituído por camadas alternadas de materiais fibrosos e metálicos, resultando em um material isotrópico com ótima resistência mecânica. Já o compósito fibrado

apresenta como único tipo de reforço fibras, que podem ser de diferentes materiais e variadas formas conforme descrito no item 2.2 (MARINUCCI, 2011).

2.5 POLIÉSTER REFORCADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV)

A combinação da resina poliéster com fibra de vidro resulta em um material compósito conhecido como Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV). O PRFV tem alta resistência à tração, flexão e impacto, e não conduz corrente elétrica. Por estes motivos é utilizado em aplicações estruturais, principalmente nas que exigem matéria prima isolante elétrica (FERREIRA, 2009). Além disso, a resina poliéster se combinada com diferentes tipos de plásticos possui boa resistência química quando exposta a meios corrosivos (CALLISTER, 2002). O autor aponta duas características importantes a serem observadas, pois podem tornar este tipo de compósito inviável para alguns tipos de aplicação. A primeira é a sua baixa rigidez, apesar de alta resistência mecânica. A segunda se deve ao fato de que sua resistência ao calor é consideravelmente baixa. Acima de 200°C o compósito deixa de cumprir satisfatoriamente suas funções estruturais, pois o polímero começa a se deteriorar. Callister (2002) completa ainda, que o tipo de fibra de vidro mais utilizado no PRFV é o vidro – E, pois apresenta boas propriedades mecânicas e químicas e um preço relativamente baixo quando comparado com outros tipos de fibra.

2.6 PROCESSOS DE PRODUÇÃO

O objetivo de fabricar uma peça utilizando material compósito é otimizar as características mecânicas associadas aos reforços e ao material polimérico. Portanto, a seleção dos materiais deve levar em conta além do custo e qualidade da matéria prima, o processo de produção (MARINUCCI, 2011). Marinucci (2011) explica que algumas características dependem diretamente do processo de produção, como por exemplo, a orientação do reforço, tempo de trabalho e de cura da matriz, forma do produto, entre outras.

Antes da escolha do método de produção, deve-se decidir qual será a forma em que a matriz e a fibra serão combinadas. Há duas possibilidades: o sistema pré-impregnado (*prepreg*), e o sistema de impregnação em fábrica (MARINUCCI, 2011).

No sistema *prepreg* os reforços com fibras contínuas são previamente embebidos em uma resina polimérica parcialmente curada. À temperatura ambiente a matriz termofixa entra em processo de cura, portanto este tipo de material deve ser armazenado em temperatura igual ou inferior a zero grau Celsius (CALLISTER, 2002). No sistema de impregnação em fábrica, a fibra é impregnada pela matriz apenas na hora do processo de produção. Neste sistema não é necessária infraestrutura para manter as fibras na temperatura ideal como no *prepreg*, porém exige que o fabricante tenha controle da quantidade de resina acrescentada à fibra para que o compósito esteja na proporção correta. No Brasil, a maioria dos processos de fabricação utiliza a impregnação em fábrica (MARINUCCI, 2011).

Quanto à moldagem do produto, pode-se dividir os processos de fabricação em dois tipos: processos de molde aberto e processo de molde fechado. O processo de molde aberto garante acabamento liso em apenas uma das superfícies, pois só é utilizado um molde para a fabricação. São exemplos de processos em molde aberto: laminação por contato, laminação por projeção, enrolamento filamental e pultrusão. Já no processo de molde fechado o produto final tem acabamento perfeito em ambas as faces, já que o produto é inserido entre dois moldes (macho e fêmea). Alguns processos que utilizam este tipo de molde são: moldagem por prensagem, moldagem por injeção (MARINUCCI, 2011).

2.6.1 Processo De Enrolamento Filamental (*Filament Winding*)

Este processo é o mais indicado para a produção de peças cilíndricas e esféricas, pois há um melhor aproveitamento das propriedades das fibras conforme seu ângulo de enrolamento (MARINUCCI, 2011).

No enrolamento filamental, as fibras são primeiramente embebidas em um banho de resina e em seguida enroladas ao redor de um mandril (molde) giratório. Normalmente o processo é todo automatizado. O processo de enrolamento é repetido até que a estrutura possua o número de camadas ideal (previamente calculado). O processo pode ser observado na figura 3:



FIGURA 3 – Processo de enrolamento filamentar
Fonte: Youtube

A cura pode ser executada em um forno ou temperatura ambiente. Depois de seco o material, o mandril é retirado restando a estrutura oca (CALLISTER, 2002). Na figura 4 são ilustrados os três principais tipos de enrolamento utilizados atualmente.

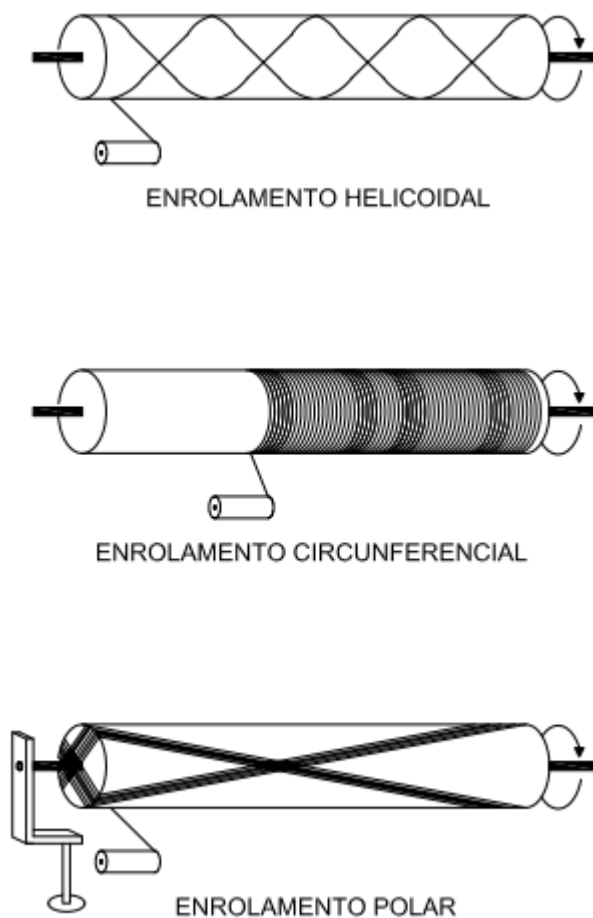


FIGURA 2 – Representação de tipos de enrolamento filamentar
Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2002

As estruturas fabricadas por *filament winding* resultam em relações resistência-peso extremamente altas. Porém é necessário garantir que a orientação das fibras esteja na direção das tensões principais e que a matriz utilizada seja compatível com a magnitude das tensões aplicadas (MARINUCCI, 2011).

2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO COMPÓSITO POLIMÉRICO

As propriedades mecânicas do compósito polimérico dependem diretamente das características da matriz e do reforço. Marinucci (2011) sugere a divisão da caracterização do compósito em duas partes: caracterização da matriz e reforços como matérias primas e caracterização do compósito por ensaios mecânicos. A ASTM – *American Society for Testing Materials* possui uma extensa lista de ensaios para

compósitos (MARINUCCI, 2011). Para a correta interpretação dos resultados dos ensaios, deve-se considerar a direção da disposição das fibras, o percentual de fibra em relação à matriz e a técnica de elaboração dos corpos de prova. Esses aspectos influenciam diretamente a resistência final do compósito (JUNIOR, 2007).

Marinucci (2011) cita como propriedades mecânicas mais importantes dos compósitos as seguintes:

- Resistência na direção normal;
- Resistência cisalhante;
- Módulo de elasticidade longitudinal;
- Módulo de elasticidade transversal;
- Módulo de cisalhamento;
- Coeficiente de Poisson;

Dispondo destes valores é possível analisar as tensões e deformações na estrutura. Estas incógnitas podem ser obtidas através da interpretação de resultados dos ensaios mecânicos.

2.8 MODELOS MATEMÁTICOS

Para o estudo do comportamento de estruturas são utilizados modelos de análise. Tais modelos podem ser físicos, empíricos ou matemáticos. Modelos físicos são representações, normalmente em escala reduzida, da situação real. Este tipo de modelo obtém resultados mais correspondentes com a realidade, enquanto os modelos empíricos e matemáticos utilizam-se de algumas aproximações (SORIANO, 2003).

Modelos empíricos dispensam a estruturação prévia de um sistema de equações. A estrutura do modelo empírico é obtida através de suposições feitas sobre dados obtidos experimentalmente (SODRÉ, 2007). Este tipo de sistema não tem base científica.

Modelos mecanísticos, também conhecidos como modelos matemáticos, consistem na descrição matemática da realidade. O sistema criado é dividido em várias componentes para que possa ser feita uma análise da interação que ocorre entre as partes (SODRÉ, 2007). Soriano (2003) explica que sistemas físicos são muito complexos para serem analisados de forma exata. Portanto, é comum adotar hipóteses simplificadoras durante a formulação do modelo matemático. Ou seja,

devem ser definidas variáveis, determinar quais delas serão consideradas e qual o comportamento esperado. Feito isso o modelo é testado por comparação com suas previsões.

2.8.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O modelo matemático denominado método dos elementos finitos foi formulado por Gauss no final do século XVIII. Porém seu maior desenvolvimento se deu na década de 50, quando surgiram tecnologias que tornaram possível a resolução de sistemas de equações complexas (LOTTI *et al.*, 2006). Este método tem por objetivo determinar o estado de tensões e as deformações sofridas pela estrutura estudada (AZEVEDO, 2003). Este método consiste na discretização do sistema, ou seja, dividi-lo em vários subdomínios. Em seguida adota-se um comportamento aproximado para cada uma das incógnitas do problema. Quanto mais dividido for o domínio, mais aproximado da realidade será o resultado obtido (ALVES, 2007). Gesualdo (2010) apresenta uma equação genérica para o método:

$$u(x) = \sum_{e=1}^m u^{(e)} \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

$u(x)$ é uma função aproximadora global;

$u^{(e)}$ são valores aproximados de u dentro de cada subdomínio.

O autor complementa ainda que, através de procedimentos matemáticos encontra-se uma expressão do tipo:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

$[K]$ é a matriz de rigidez global da estrutura;

$\{u\}$ é o vetor de incógnitas;

$\{F\}$ é o vetor de forças;

A incógnita representada por $\{u\}$ pode ser temperatura, deslocamento, velocidade, entre outros. O valor de $\{u\}$ é encontrado aplicando-se as condições de contorno. De posse do vetor $\{u\}$ é possível obter as informações internas ao elemento.

A matriz de rigidez global [K] pode ser obtida através do acoplamento de todas as matrizes de rigidez locais (GESUALDO, 2010).

2.8.2 Modelo Desenvolvido pelo *National Physical Laboratory United Kingdom* (NPL-UK) (1999)

O modelo matemático desenvolvido pelo NPL-UK (1999) tem como base vários outros sistemas de dimensionamento (ORTENZI Jr., 2007). Nele é proposto o dimensionamento das estruturas pela teoria dos estados limites. Assim sendo, propõe máximo desempenho e máxima economia, diferentemente de outros métodos, como por exemplo, o método proposto por Owens Corning (dimensionamento para placas planas) que se baseia no método da rigidez e muitas vezes resulta em um superdimensionamento da estrutura. As equações de dimensionamento são:

$$S(x_{Li}, \gamma_{FLi}) \gamma_{F3} < R(x_{Gi}, x_{Mi} / \gamma_{Mi}) \quad \text{Eq.(6)}$$

$$\gamma_m = \gamma_V + \gamma_E + \gamma_t \quad \text{Eq.(7)}$$

Onde S é o conjunto de solicitações, o qual deve ser menor do que R que representa a capacidade resistente da estrutura. Quanto às demais variáveis:

x_{Li} é a soma das ações de carregamento;

x_{Mi} é a variável dos materiais (fibra e matriz);

x_{Gi} é a variável de geometria da estrutura;

γ_{FLi} é a variável dos fatores de segurança parciais associados;

γ_{F3} é o somatório dos fatores de segurança parciais de cada eixo principal;

γ_{Mi} é o fator de segurança dos materiais;

γ_m é o fator parcial dos materiais;

γ_V é o fator de probabilidade de falha por variabilidade do material;

γ_E é o fator de efeitos higrotérmicos que afetam o material;

γ_t é o fator de probabilidade de falha por fluência e idade do material.

Pode-se perceber que este método de dimensionamento necessita de várias características do material e da estrutura, as quais devem ser determinadas e/ou pré calculadas pelo projetista (ORTENZI Jr., 2007).

2.8.3 Modelos de Análise de Falha por Ruptura

Segundo Ortenzi (2007) qualquer material compósito é anisotrópico. Porém, devido à complexidade dos cálculos envolvidos quando do cálculo de materiais compósitos considerando esta propriedade, é comum a utilização de modelos simplificados para seu pré-dimensionamento. O autor apresenta ainda outra característica complexa deste tipo de material: a mudança de comportamento quando submetido a altas temperaturas. A matriz polimérica tem comportamento visco-elástico à temperatura ambiente, porém passa a ter comportamento visco-plástico quando a temperatura ambiente se aproxima da temperatura de transição vítrea do material. No caso de elementos estruturais Ortenzi (2007) ressalta que é fundamental que o compósito permaneça no comportamento visco elástico. Para análise de falha por ruptura são utilizados principalmente dois modelos matemáticos. São estes o modelo de *Tsai-Hill* e o modelo de *Tsai-Wu*.

O modelo de *Tsai-Hill* se trata de uma adaptação de dois modelos: o de *Von Misses* e o de *Hill*. Inicialmente o modelo de *Von Misses* propunha a determinação da tensão máxima através do somatório dos mínimos quadrados dos tensores de tensão nas três direções principais. Este modelo foi desenvolvido para materiais isotrópicos, como ligas metálicas, porém sua adaptação gerou resultados satisfatórios quando aplicado em materiais compósitos. O modelo de *Hill* foi uma extensão do modelo de *Von Misses*. Por fim o modelo desenvolvido por *Tsai* (1968) propõe a análise de uma lâmina ortotrópica no estado plano de tensões, no qual a direção principal é a do sentido longitudinal das fibras. As resistências de escoamento de *Hill* são consideradas as resistências de escoamento da lâmina. A equação que rege o modelo de *Tsai-Hill* é:

$$\frac{\sigma_1^2}{s_L^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{s_L^2} - \frac{\sigma_2^2}{s_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{s_{LT}^2} = 1 \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde:

σ_1, σ_2 são as tensões atuantes nas direções x e z, respectivamente;

τ_{12} é a tensão de cisalhamento referente a xz;

s_L , s_T e s_{LT} são as resistências características longitudinal, transversal e de cisalhamento, obtidas por ensaios (ORTENZI Jr., 2007).

O mesmo autor ainda descreve o segundo modelo de análise por falha e ruptura, o modelo de *Tsai-Wu*. Diferentemente do modelo anteriormente citado, o modelo desenvolvido por *Tsai* e *Wu* prevê a influência das diversas camadas de lâminas e diferentes direções em relação à linha neutra. O equacionamento deste modelo é mais complexo do que o de *Tsai-Hill*, e pode ser observado a seguir:

$$\sigma_x \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_y \left(\frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) + \frac{\sigma_x^2}{(X_t X_c)} + \frac{\sigma_y^2}{(Y_t Y_c)} + \frac{\tau_{xz}^2}{S^2} + F_{xy} \sigma_x \sigma_y = 1 \quad \text{Eq.(9)}$$

Onde:

X_t é o tensor de tração em relação a x

X_c é o tensor de compressão em relação a x

Y_t é o tensor de tração em relação a y

Y_c é o tensor de compressão em relação a y

F_{xy} é o tensor somatório das resistências características biaxiais em x e y, obtido através de ensaios de tração biaxial em que $\sigma_x = \sigma_y$.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi dividido em cinco etapas. As primeiras etapas foram as caracterizações do material e da estrutura, seguidas pela definição de esforços

atuantes na estrutura, determinação do modelo matemático a ser utilizado e, por fim, a análise estrutural do elemento.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Primeiramente realizou-se a caracterização do material PRFV, a fim de obter todas as informações necessárias para realizar a análise estrutural.

As matérias primas utilizadas na fabricação do compósito são:

- Resina poliéster ortoftálica
- Fibra de vidro contínua do tipo "E" TEX 2200
- Promotor de cura peróxido de metil etil cetona
- Pintura externa de proteção com tinta gel coat ortoftálico 7040 PA+UV

O compósito foi fabricado com uma relação de fibra/resina de 70/30%. Além disso, foi utilizado o promotor de cura com a proporção de 1,5% da massa de resina.

Amostras de material equivalente foram submetidas a ensaios mecânicos em laboratório certificado pela fabricante da estrutura. Os ensaios, as normas de referência e os resultados estão expostos no Quadro 1:

ENSAIO	NORMA DE REFERÊNCIA	TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (MPa)		ALONGAMENTO MÉDIO (%)	
		ANTES DO ENVELHECIMENTO	APÓS ENVELHECIMENTO	ANTES DO ENVELHECIMENTO	APÓS ENVELHECIMENTO
Determinação da Resistência à tração antes e após envelhecimento em câmara de interperismo em placas de material polimérico	ASTM D 790 – Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials	321,6	355,7	4,0	4,0
Determinação da Resistência à flexão antes e após envelhecimento em câmara de interperismo em placas de material polimérico	ASTM D 638 – Standard Test Method for Tensile Properties of plastics	327,0	389,0	-	-

QUADRO 1: Ensaios de caracterização de PRFV.

FONTE: TECHNOFIX Ind. E Com. De Fibra de Vidro LTDA.

O coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade do material não foram calculados neste trabalho por falta de dados. Os valores utilizados foram compilados dos dados do programa de cálculo utilizado pelo fabricante, sendo estes de 0,32 para o coeficiente de Poisson e 27,7 GPa para o módulo de elasticidade.

3.2 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

A estrutura estudada neste trabalho é um poste para distribuição de energia. Suas dimensões estão apresentadas na Tabela 1:

TABELA 1 – DIMENSÕES DA ESTRUTURA

DIÂMETRO DO TOPO (mm)	165
DIÂMETRO DA BASE (mm)	370
COMPRIMENTO TOTAL (mm)	12000
RESISTÊNCIA NOMINAL (daN)	200
ESPESSURA DA PAREDE (mm)	5

Fonte: TECHNOFIX Ind. E Com. De Fibra de Vidro LTDA.

A resistência nominal da estrutura é a força a qual a estrutura estará submetida constantemente quando instalada. Como no Brasil ainda não existe norma regulamentadora para postes de PRFV, foram seguidas neste trabalho as diretrizes da norma ABNT NBR 8451 - Postes de concreto armado para redes de distribuição de energia elétrica. Na norma foi estabelecida a regra de que um poste, quando

solicitado à força que corresponde à sua resistência nominal, não deve apresentar deformação no topo maior do que a exigida pela concessionária de energia. Além disso, todos os postes devem resistir a uma força correspondente a duas vezes a sua resistência nominal sem romper.

A unidade de resistência utilizada na norma (e na maioria das concessionárias de energia brasileiras) é deca Newton (daN). A estrutura estudada foi projetada para que quando aplicada a força de 200 daN (resistência nominal deste poste) a 10 cm do topo do poste, a deformação do topo em relação à base do mesmo seja no máximo 4% do comprimento total do poste.

A espessura de 5 mm foi composta por camadas de fibra impregnada por resina, enroladas com ângulo de aproximadamente 23 graus. Apenas nos dois primeiros metros, a contar do ponto de engastamento, as duas primeiras e duas últimas camadas de fibra foram enroladas com ângulo de 90 graus, a fim de evitar o fenômeno de ovalização do poste.

3.3 DEFINIÇÃO DAS AÇÕES SOLICITANTES E INCÓGNITAS DE PROJETO

Nesta seção serão descritas as ações solicitantes na estrutura e as incógnitas de projeto que serão calculadas.

O objeto em análise neste trabalho é um poste de distribuição de energia. Consiste em uma estrutura cônica contínua que estará sujeita a uma força aplicada perpendicularmente ao seu comprimento a 10 cm do topo. Esta situação de esforço foi selecionada com base no método de ensaio mecânico proposto pela ABNT NBR 8451. Na figura 5 pode-se observar a estrutura submetida à força citada.



FIGURA 5 – Ensaio mecânico
Fonte: TECHNOFIX Ind. E Com. De Fibra de Vidro LTDA.

Pelo fato de a estrutura ser oca, ela tende a ovalizar quando submetida a uma força transversal. Este fenômeno é conhecido como pressão de ovalização. Quando aplicada a força no topo do poste, a face superior fica comprimida enquanto a inferior fica tracionada, fazendo com que a seção transversal ovalize. A atuação da pressão de ovalização na estrutura é ilustrada na figura 6.

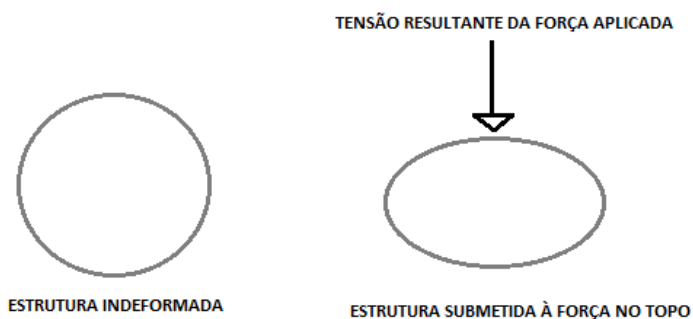


FIGURA 6 – Forças atuantes na estrutura
Fonte: Autoria Própria.

Foi considerado que 1800 mm do poste estavam enterrados. Esta medida corresponde a 10% do comprimento do poste + 600 mm, comprimento de engaste sugerido pela NBR 8451.

O objetivo da análise é medir a deformação e tensão nas seções transversais, principalmente nos três primeiros metros acima do ponto de engastamento, região onde ocorre a maior tendência a ovalização. Também será registrada a deformação no topo do poste, pois seu valor é, junto da tensão de ruptura, o principal parâmetro de ensaio para postes de distribuição de energia.

3.4 ESCOLHA DO MODELO MATEMÁTICO

Com base na geometria da estrutura, matéria-prima utilizada, e nas incógnitas de projeto, decidiu-se que, entre os modelos apresentados na revisão bibliográfica do presente trabalho, o método dos elementos finitos seria o mais adequado para a análise desejada. Portanto foi utilizado para a análise estrutural um programa que faz uso do método dos elementos finitos para a obtenção dos resultados.

3.5 ANÁLISE ESTRUTURAL

Os postes de distribuição de energia são projetados para resistir a uma determinada força, denominada pela NBR 8451 como resistência nominal, sem ultrapassar a deformação limite, conforme normas das concessionárias de energia.

O poste aqui analisado foi doado pela empresa Technofix. Segundo a empresa, ele foi dimensionado através de um programa relaciona apenas a deslocamento no topo com a força aplicada. Nele não é possível realizar uma análise detalhada de tensões. Portanto, este poste foi redesenhado em um programa de análise estrutural mais complexo, onde foi possível realizar análise das tensões normais.

A estrutura foi desenhada em um programa de análise estrutural da seguinte forma:

1º Passo: Foi desenhada uma estrutura cônica, utilizada a opção de elemento de casca, de 10,2m de altura, correspondente a altura livre do poste, com as dimensões de todo e base indicadas na Tabela 1.

2º Passo: As áreas deste elemento foram então divididas na ordem de 10º cada, totalizando 36 divisões no sentido radial, e a cada 10 cm no sentido vertical.

3º Passo: Foram inseridos os parâmetros para a definição do material PRFV, conforme as limitações do programa. Os parâmetros inseridos foram: módulo de elasticidade, com o valor de 27,7 GPa, coeficiente de Poisson de 0,32 e peso específico de 1,89 kg/m³.

4º Passo: Foi determinada a espessura do elemento de casca e aplicada a ela o material PRFV. Nesta etapa foram considerados os ângulos de enrolamento das fibras. Nos dois primeiros metros o material foi criado com dois ângulos de enrolamento diferentes, 23 e 90 graus, compondo as camadas conforme citado no item 3.2, enquanto que no restante do poste o ângulo foi considerado constante de 23 graus.

5º Passo: Por fim foram aplicadas as restrições de deslocamento da base, simulando a situação de perfeito engastamento.

A divisão da estrutura para análise de deslocamentos se deu da seguinte forma: os três primeiros metros, partindo do fim do engaste, foram divididos em seções de 500 mm. A partir daí dividiu-se o poste em seis seções de 1m cada e uma última seção de 1,20 m. A posição da força e a divisão das seções podem ser observadas na figura 7:

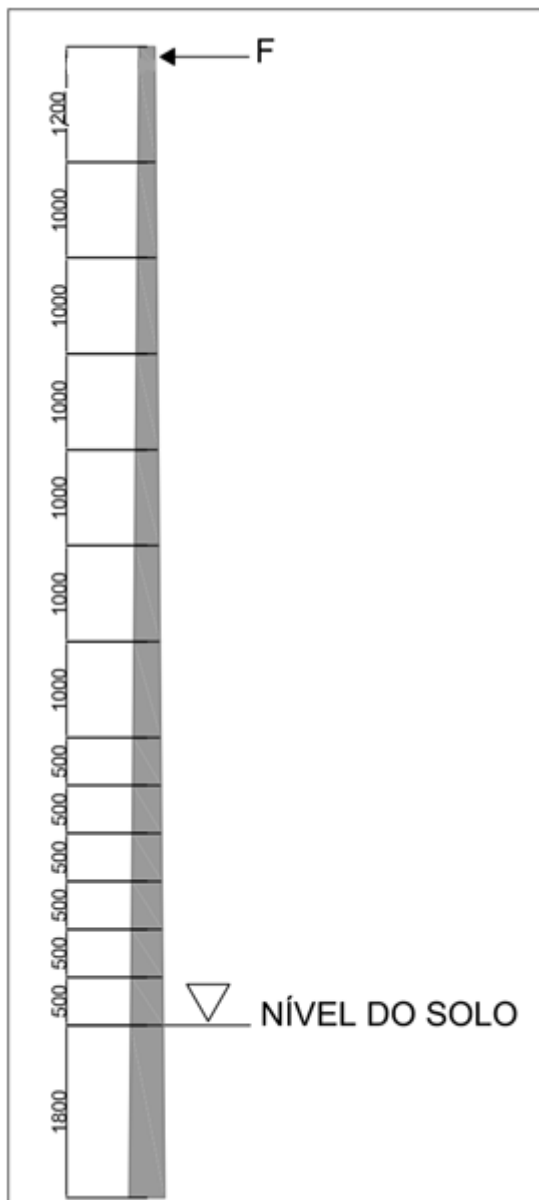


FIGURA 7: Representação das divisões da estrutura
Fonte: Autoria Própria

Já para a análise das tensões normais optou-se por realizar uma divisão mais minuciosa, de forma a propiciar uma melhor precisão na medida do local onde ocorreria a ruptura. A tensão foi determinada a cada 10 cm, porém apenas nos três primeiros metros a contar do engastamento.

Aplicou-se então uma força de 50 daN a 10 cm do topo da estrutura, conforme determinado quando da definição das ações solicitantes. Foram registradaa então as deformações e as tensões normais no poste em todas as partes previamente divididas. Repetiu-se o processo sucessivamente, aumentando-se o módulo da força

em 50 daN até atingir 500 daN. Por fim todos os dados foram expostos em tabelas relacionando a força aplicada com as deformações e tensões geradas na estrutura.

Depois de realizado o cálculo no programa, foi realizado o teste mecânico no poste, a fim de comparar os resultados e constatar a existência de correlação entre eles.

4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISE COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA

. A estrutura desenhada no programa de análise estrutural pode ser observada ainda indeformada na figura 8.

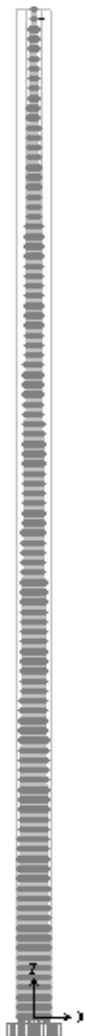


FIGURA 8: Estrutura indeformada
Fonte: Autoria própria.

Os resultados deslocamentos extraídos foram dos pontos das extremidades esquerda e direita, conforme demonstrado na figura 9, a fim de observar se houve ou não registro de ovalização na estrutura.



FIGURA 9: Vista em corte da estrutura.
Fonte: Autoria própria.

Os resultados de deslocamentos podem ser observados nas tabelas de 2 a 6:

TABELA 2 – RESULTADOS DE DESLOCAMENTO PARA CARGA DE 50 E 100 daN

	50 daN		100 daN	
	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)
TOPO	111,85716	111,85796	223,71432	223,71593
9m	85,96745	85,96746	171,93491	171,93493
8m	66,11730	66,11730	132,23461	132,23461
7m	48,63343	48,63343	97,26686	97,26686
6m	33,85247	33,85247	67,70495	67,70495
5m	21,88511	21,88511	43,77022	43,77023
4m	12,72106	12,72123	25,44211	25,44246
3m	6,28282	6,28217	12,56565	12,56434
2,5m	4,05241	4,04968	8,10483	8,09936
2m	2,46211	2,45574	4,92422	4,91148
1,5m	1,38068	1,37554	2,76137	2,75108
1m	0,60884	0,61395	1,21769	1,22789
0,5m	0,14471	0,15320	0,28943	0,30640

Fonte: Autoria própria.

TABELA 3 – RESULTADOS DE DESLOCAMENTO PARA CARGA DE 150 E 200 daN

	150 daN		200 daN	
	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)
TOPO	335,57148	335,57390	447,4286	447,4319
9m	257,90236	257,90239	343,8698	343,8699
8m	198,35192	198,35192	264,4692	264,4692
7m	145,90029	145,90029	194,5337	194,5337
6m	101,55743	101,55742	135,4099	135,4099
5m	65,65533	65,65534	87,5404	87,5405
4m	38,16317	38,16368	50,8842	50,8849
3m	18,84848	18,84651	25,1313	25,1287
2,5m	12,15724	12,14904	16,2097	16,1987
2m	7,38632	7,36723	9,8484	9,8230
1,5m	4,14205	4,12663	5,5227	5,5022
1m	1,82653	1,84184	2,4354	2,4558
0,5m	0,43414	0,45961	0,5789	0,6128

Fonte: Autoria própria.

TABELA 4 – RESULTADOS DE DESLOCAMENTO PARA CARGA DE 250 E 300 daN

	250 daN		300 daN	
	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)
TOPO	559,28581	559,28984	671,14297	671,14781
9m	429,83728	429,83733	515,80479	515,80479
8m	330,58653	330,58653	396,70384	396,70384
7m	243,16715	243,16715	291,80057	291,80058
6m	169,26238	169,26237	203,11486	203,11485
5m	109,42555	109,42557	131,31066	131,31069
4m	63,60529	63,60614	76,32634	76,32737
3m	31,41413	31,41085	37,69695	37,69302
2,5m	20,26207	20,24840	24,31448	24,29808
2m	12,31054	12,27871	14,77265	14,73445
1,5m	6,90342	6,87771	8,28410	8,25325
1m	3,04422	3,06973	3,65306	3,68367
0,5m	0,72357	0,76601	0,86829	0,91921

Fonte: Autoria própria.

TABELA 5 – RESULTADOS DE DESLOCAMENTO PARA CARGA DE 350 E 400 daN

	350 daN		400 daN	
	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)
TOPO	783,00013	783,00578	894,85729	894,86375
9m	601,77219	601,77226	687,73964	687,73973
8m	462,82115	462,82114	528,93846	528,93845
7m	340,43400	340,43401	389,06743	389,06744
6m	236,96733	236,96732	270,81981	270,81979
5m	153,19577	153,19580	175,08088	175,08092
4m	89,04740	89,04860	101,76846	101,76983
3m	43,97978	43,97519	50,26260	50,25736
2,5m	28,36689	28,34776	32,41931	32,39744
2m	17,23476	17,19019	19,69686	19,64593
1,5m	9,66479	9,62879	11,04547	11,00433
1m	4,26191	4,29762	4,87075	4,91156
0,5m	1,01300	1,07241	1,15772	1,22561

Fonte: Autoria própria.

TABELA 6 – RESULTADOS DE DESLOCAMENTO PARA CARGA DE 450 E 500 daN

	450 daN		500 daN	
	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)	DESLOCAMENTO ESQUERDA (mm)	DESLOCAMENTO DIREITA (mm)
TOPO	1006,71446	1006,72172	1118,57162	1118,57969
9m	773,70710	773,70719	859,67456	859,67466
8m	595,05576	595,05576	661,17307	661,17306
7m	437,70086	437,70087	486,33429	486,33430
6m	304,67228	304,67227	338,52476	338,52474
5m	196,96599	196,96603	218,85110	218,85115
4m	114,48952	114,49106	127,21057	127,21229
3m	56,54543	56,53953	62,82825	62,82170
2,5m	36,47172	36,44713	40,52413	40,49681
2m	22,15897	22,10168	24,62108	24,55742
1,5m	12,42616	12,37988	13,80684	13,75542
1m	5,47959	5,52551	6,08844	6,13946
0,5m	1,30243	1,37882	1,44715	1,53202

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que, os deslocamentos dos pontos da direita e da esquerda de mesma altura são muito próximos, o que significa que o programa não detectou qualquer estrangulamento na estrutura.

As curvas de deslocamento são apresentadas na figura 10.

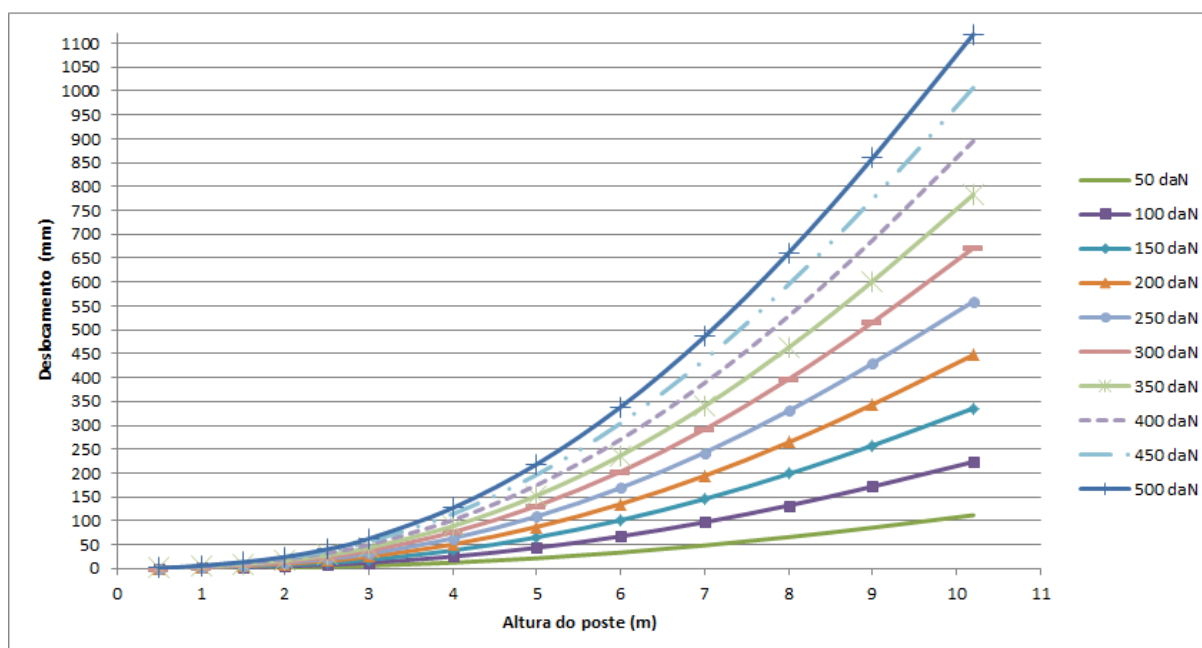


FIGURA 10: Curvas elásticas da estrutura obtidas no programa de análise estrutural.

Fonte: Autoria própria.

A determinação das tensões seguiu a mesma lógica das medidas de deslocamentos. Foi medida a face de extrema esquerda, na linha de aplicação da força, e extrema direita, oposta à aplicação da força. Os resultados de tensões obtidos do programa são explicitados nas tabelas de 7 a 12:

TABELA 7 – RESULTADOS DE TENSÃO NORMAL PARA CARGA DE 50 E 100 daN

	50 daN		100 daN	
	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)
3 m	7,934328	-7,930404	15,869637	-15,860808
2,9 m	7,948062	-7,942176	15,895143	-15,884352
2,8 m	7,958853	-7,952967	15,917706	-15,906915
2,7 m	7,970625	-7,963758	15,94125	-15,927516
2,6 m	7,977492	-7,971606	15,954984	-15,943212
2,5 m	7,990245	-7,983378	15,981471	-15,965775
2,4 m	7,991226	-7,986321	15,982452	-15,973623
2,3 m	8,020656	-8,013789	16,041312	-16,026597
2,2 m	8,507232	-8,503308	17,014464	-17,006616
2,1 m	8,553339	-8,558244	17,106678	-17,116488
2 m	8,646534	-8,629857	17,294049	-17,258733
1,9 m	4,291875	-4,302666	8,58375	-8,605332
1,8 m	4,272255	-4,230072	8,545491	-8,540586
1,7 m	4,244787	-4,273236	8,490555	-8,547453
1,6 m	4,234977	-4,244787	8,468973	-8,489574
1,5 m	4,22811	-4,275198	8,457201	-8,550396
1,4 m	4,226148	-4,248711	8,452296	-8,496441
1,3 m	4,204566	-4,269312	8,409132	-8,538624
1,2 m	4,224186	-4,240863	8,449353	-8,482707
1,1 m	4,189851	-4,255578	8,378721	-8,511156
1 m	4,239882	-4,197699	8,479764	-8,395398
0,9 m	4,2183	-4,303647	8,437581	-8,606313
0,8 m	4,287951	-3,94362	8,576883	-7,886259
0,7 m	4,285989	-3,939696	8,5724685	-7,879392
0,6 m	4,284027	-3,935772	8,568054	-7,872525
0,5 m	4,302666	-4,400766	8,605332	-8,801532
0,4 m	4,177098	-4,182003	8,21097	-8,363025
0,3 m	4,370355	-4,454721	8,74071	-8,908461
0,2 m	4,192794	-4,244787	8,385588	-8,489574
0,1 m	5,099238	-5,214015	10,199457	-10,427049

Fonte: Autoria própria.

TABELA 8 – RESULTADOS DE TENSÃO NORMAL PARA CARGA DE 150 E 200 daN

	150 daN		200 daN	
	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)
3 m	23,803965	-23,791212	31,738293	-31,721616
2,9 m	23,843205	-23,827509	31,791267	-31,769685
2,8 m	23,876559	-23,859882	31,835412	-31,812849
2,7 m	23,911875	-23,891274	29,678193	-31,855032
2,6 m	23,933457	-23,915799	31,910949	-31,887405
2,5 m	23,972697	-23,949153	31,962942	-31,932531
2,4 m	23,973678	-23,959944	31,964904	-31,946265
2,3 m	24,061968	-24,040386	32,081643	-32,053194
2,2 m	25,522677	-25,509924	34,029909	-34,013232
2,1 m	25,660017	-25,675713	34,213356	-34,233957
2 m	25,940583	-25,88859	34,588098	-34,517466
1,9 m	12,874644	-12,907998	17,166519	-17,210664
1,8 m	12,817746	-12,810879	17,090982	-17,081172
1,7 m	12,735342	-12,820689	16,981111	-17,093925
1,6 m	12,70395	-12,735342	16,938927	-16,980129
1,5 m	12,685311	-12,825594	16,914402	-17,100792
1,4 m	12,678444	-12,745152	16,904592	-16,992882
1,3 m	12,613698	-12,807936	16,818264	-17,076267
1,2 m	12,673539	-12,72357	16,898706	-16,964433
1,1 m	12,568572	-12,766734	16,757442	-17,021331
1 m	12,719646	-12,593097	16,960509	-16,790796
0,9 m	12,655881	-12,90996	16,874181	-17,213607
0,8 m	12,864834	-11,829879	17,153766	-15,772518
0,7 m	12,858948	-11,819088	17,1454275	-15,7582935
0,6 m	12,853062	-11,808297	17,137089	-15,744069
0,5 m	12,907998	-13,202298	17,211645	-17,603064
0,4 m	12,530313	-12,544047	16,707411	-16,72605
0,3 m	13,111065	-13,363182	17,482401	-17,816922
0,2 m	12,578382	-12,735342	16,772157	-16,980129
0,1 m	15,298695	-15,640083	20,398914	-20,854098

Fonte: Autoria própria.

TABELA 9 – RESULTADOS DE TENSÃO NORMAL PARA CARGA DE 250 E 300 daN

	250 daN		300 daN	
	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)
3 m	39,673602	-39,65202	47,60793	-47,582424
2,9 m	39,739329	-39,711861	47,687391	-47,654037
2,8 m	39,794265	-39,765816	47,753118	-47,718783
2,7 m	39,853125	-39,81879	47,82375	-47,782548
2,6 m	39,888441	-39,859011	47,865933	-47,830617
2,5 m	39,954168	-39,914928	47,944413	-47,898306
2,4 m	39,95613	-39,932586	47,947356	-47,919888
2,3 m	40,102299	-40,066983	48,122955	-48,079791
2,2 m	42,537141	-42,51654	50,759883	-50,700042
2,1 m	42,766695	-42,792201	51,320034	-51,350445
2 m	43,234632	-43,147323	51,881166	-51,776199
1,9 m	21,458394	-21,51333	25,750269	-25,815996
1,8 m	21,363237	-21,351465	25,636473	-25,621758
1,7 m	21,225897	-21,367161	25,470684	-25,641378
1,6 m	21,173904	-21,224916	25,4079	-25,469703
1,5 m	21,142512	-21,37599	25,370622	-25,651188
1,4 m	21,129759	-21,241593	25,355907	-25,489323
1,3 m	21,02283	-21,345579	25,227396	-25,614891
1,2 m	21,122892	-21,206277	25,347078	-25,44714
1,1 m	20,947293	-21,276909	25,137144	-25,532487
1 m	21,200391	-20,988495	25,440273	-25,186194
0,9 m	21,092481	-21,516273	25,311762	-25,81992
0,8 m	21,441717	-19,716138	25,729668	-23,658777
0,7 m	21,4314165	-19,69848	25,7174055	-23,6376855
0,6 m	21,421116	-19,680822	25,705143	-23,616594
0,5 m	21,514311	-22,004811	25,816977	-26,405577
0,4 m	20,884509	-20,907072	25,061607	-25,089075
0,3 m	21,852756	-18,616437	22,246137	-26,725383
0,2 m	20,964951	-21,224916	25,157745	-25,469703
0,1 m	25,498152	-26,067132	30,598371	-31,281147

Fonte: Autoria própria.

TABELA 10 – RESULTADOS DE TENSÃO NORMAL PARA CARGA DE 350 E 400 daN

	350 daN		400 daN	
	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)
3 m	55,542258	-55,512828	63,477567	-63,443232
2,9 m	55,634472	-55,597194	63,582534	-63,53937
2,8 m	55,711971	-55,672731	63,670824	-63,625698
2,7 m	55,794375	-55,746306	63,765	-63,710064
2,6 m	55,843425	-55,802223	63,821898	-63,77481
2,5 m	55,935639	-55,881684	63,925884	-63,864081
2,4 m	55,938582	-55,906209	63,929808	-63,89253
2,3 m	56,143611	-56,09358	64,164267	-64,106388
2,2 m	59,552586	-59,523156	68,059818	-68,026464
2,1 m	59,873373	-59,908689	68,426712	-68,466933
2 m	60,528681	-60,406056	69,175215	-69,034932
1,9 m	30,042144	-30,118662	34,333038	-34,420347
1,8 m	29,908728	-29,892051	34,180983	-34,162344
1,7 m	29,716452	-29,914614	33,961239	-34,18785
1,6 m	29,642877	-29,682117	33,877854	-33,959277
1,5 m	29,599713	-29,926386	33,827823	-34,201584
1,4 m	29,582055	-29,738034	33,808203	-33,985764
1,3 m	29,431962	-29,884203	33,636528	-34,153515
1,2 m	29,572245	-29,688003	33,796431	-33,929847
1,1 m	29,326014	-29,788065	33,515865	-34,043643
1 m	29,680155	-29,383893	33,920037	-33,580611
0,9 m	29,530062	-30,123567	33,748362	-34,426233
0,8 m	30,0186	-27,602397	34,306551	-31,545036
0,7 m	30,0043755	-27,5773815	34,2903645	-31,5170775
0,6 m	29,990151	-27,552366	34,274178	-31,489119
0,5 m	30,119643	-30,806343	34,422309	-35,207109
0,4 m	29,237724	-29,270097	33,414822	-33,451119
0,3 m	30,593466	-31,180104	34,963821	-35,634825
0,2 m	29,350539	-29,006208	33,543333	-33,960258
0,1 m	35,69859	-36,494181	40,797828	-41,708196

Fonte: Autoria própria.

TABELA 11 – RESULTADOS DE TENSÃO NORMAL PARA CARGA DE 450 E 500 daN

	450 daN		500 daN	
	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)
3 m	71,411895	-66,478446	79,346223	-79,30404
2,9 m	71,52471	-71,481546	79,478658	-79,423722
2,8 m	71,629677	-71,578665	79,58853	-79,531632
2,7 m	71,735625	-71,673822	79,70625	-79,63758
2,6 m	71,795466	-71,746416	79,776882	-79,718022
2,5 m	71,873946	-71,847459	79,907355	-79,829856
2,4 m	71,86806	-71,878851	79,91226	-79,865172
2,3 m	72,184923	-72,120177	80,205579	-80,132985
2,2 m	76,56705	-76,529772	85,075263	-85,03308
2,1 m	76,980051	-77,025177	85,53339	-85,584402
2 m	77,82273	-77,664789	86,469264	-86,293665
1,9 m	38,624913	-38,723013	42,916788	-43,025679
1,8 m	38,454219	-38,432637	42,726474	-42,70293
1,7 m	38,207007	-38,461086	42,451794	-42,735303
1,6 m	38,112831	-38,204064	42,347808	-42,449832
1,5 m	38,056914	-38,476782	42,285024	-42,75198
1,4 m	38,034351	-38,234475	42,260499	-42,482205
1,3 m	37,842075	-38,421846	42,046641	-42,691158
1,2 m	38,021598	-38,17071	42,245784	-42,412554
1,1 m	37,705716	-38,299221	41,73174	-42,553818
1 m	38,159919	-37,77831	42,400782	-41,976009
0,9 m	37,967643	-38,72988	42,185943	-43,033527
0,8 m	38,595483	-35,488656	42,883434	-39,431295
0,7 m	38,576844	-35,4567735	42,862833	-39,395979
0,6 m	38,558205	-35,424891	42,842232	-39,360663
0,5 m	38,725956	-39,607875	43,028622	-44,008641
0,4 m	37,59192	-37,633122	41,769018	-41,814144
0,3 m	39,334176	-40,088565	43,704531	-44,543286
0,2 m	37,737108	-38,205045	41,929902	-42,449832
0,1 m	45,898047	-46,92123	50,997285	-52,134264

Fonte: Autoria própria.

TABELA 12 – RESULTADOS DE TENSÃO NORMAL PARA CARGA DE 550 daN

550 daN		
	TENSAO ESQUERDA (MPa)	TENSAO DIREITA (MPa)
3 m	87,281532	-87,234444
2,9 m	87,42672	-87,365898
2,8 m	87,547383	-87,484599
2,7 m	87,676875	-87,601338
2,6 m	87,754374	-87,689628
2,5 m	87,898581	-87,813234
2,4 m	87,903486	-87,852474
2,3 m	88,226235	-88,146774
2,2 m	93,582495	-93,536388
2,1 m	94,086729	-94,142646
2 m	95,115798	-94,923522
1,9 m	47,208663	-47,328345
1,8 m	46,99971	-46,973223
1,7 m	46,697562	-47,008539
1,6 m	46,581804	-46,694619
1,5 m	46,513134	-47,027178
1,4 m	46,486647	-46,730916
1,3 m	46,251207	-46,96047
1,2 m	46,46997	-46,653417
1,1 m	46,084437	-46,809396
1 m	46,640664	-46,173708
0,9 m	46,404243	-47,336193
0,8 m	47,172366	-43,374915
0,7 m	47,149803	-43,335675
0,6 m	47,12724	-43,296435
0,5 m	47,331288	-48,409407
0,4 m	45,946116	-45,996147
0,3 m	48,075867	-48,997026
0,2 m	46,122696	-46,694619
0,1 m	56,097504	-57,348279

Fonte: Autoria própria.

Conforme esperado, o lado esquerdo do poste, na linha de ação da força aplicada, apresentou-se tracionado, e o lado oposto comprimido. Assim como os valores de deslocamento, as tensões de tração e compressão de mesma altura possuem módulos parecidos, o que não demonstra qualquer estrangulamento na estrutura.

4.2 ENSAIO MECÂNICO NA ESTRUTURA

Para que fosse possível estabelecer uma correlação entre a análise realizada no programa de cálculo e a estrutura na realidade, foi realizado o ensaio mecânico baseado no método proposto pela NBR 8451. Neste ensaio mecânico, porém, a carga não foi mantida por 5 minutos na força de 1,4 vezes a resistência nominal, conforme sugere a norma, pois o objetivo era levar o poste a ruptura com uma elevação constante de carga.

O poste foi posicionado na bancada e foi travado até o comprimento de 1800mm conforme a figura 11.



FIGURA 11: Engastamento da estrutura

Fonte: TECHNOFIX Ind. E Com. De Fibra de Vidro LTDA.

Foram efetuadas medidas verticais do diâmetro do poste em todas as seções de análise a cada aumento de força. Conforme descrito no item 3.5, foi aplicada a força de 50 daN a 10 cm do topo do poste e aumentando-a conforme as medições eram realizadas. O poste rompeu na carga de 550 daN, entre 1,5m e 2m acima do

ponto de engastamento, na face comprimida. A estrutura rompida pode ser observada na figura 12.



FIGURA 12: Estrutura rompida

Fonte: TECHNOFIX Ind. E Com. De Fibra de Vidro LTDA.

Os resultados obtidos no ensaio de campo estão apresentados nas tabelas 13 e 14:

TABELA 13 – VARIAÇÃO DO DIÂMETRO NO ENSAIO MECÂNICO

	Diâmetro (mm)										
	Medida inicial	50 daN	100 daN	150 daN	200 daN	250 daN	300 daN	350 daN	400 daN	450 daN	500 daN
9 m	171,2	171,2	171,2	171,2	170,2	170,2	170,2	170,2	170,2	170,2	170,2
8 m	193,2	192,2	192,2	192,2	192,2	192,2	192,2	192,2	192,2	192,2	192,2
7 m	212,7	212,7	212,7	212,7	212,2	212,2	212,2	212,2	212,2	212,2	212,2
6 m	239,2	239,2	239,2	239,2	238,2	238,2	238,2	238,2	238,2	238,2	238,2
5 m	258,2	258,2	258,2	258,2	258,2	258,2	257,7	257,7	256,2	256,2	256,2
4 m	282,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	279,7	278,7	278,7
3 m	298,2	298,2	298,2	298,2	297,2	297,2	295,7	294,2	294,2	292,2	290,2
2,5 m	314,7	314,7	314,7	314,7	314,7	313,2	311,7	310,2	308,2	303,2	303,7
2 m	324,7	323,2	323,2	323,2	322,2	321,7	320,7	317,7	315,2	312,2	311,2
1,5 m	333,2	333,2	333,2	333,2	333,2	330,7	330,2	327,2	325,7	324,2	322,7
1 m	343,2	343,2	343,2	343,2	342,2	341,7	341,2	338,2	337,7	335,7	334,7
0,5 m	350,2	350,2	350,2	350,2	350,2	349,2	348,2	346,2	346,2	346,2	344,7

Fonte: Autoria própria.

TABELA 14 – DESLOCAMENTO NO TOPO

Força	50 daN	100 daN	150 daN	200 daN	250 daN	300 daN	350 daN	400 daN	450 daN	500 daN
Deslocamento (mm)	115	224	343	465	593	742	870	1010	--	--

Fonte: Autoria própria

Não foi medida a deformação no topo nas forças de 450 e 500 daN pois a deformação ultrapassou o limite da régua.

4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Na tabela 15 estão dispostos os valores das deformações no topo do poste obtidas experimentalmente e as medidas arredondadas de deslocamento extraídas do programa de cálculo estrutural. Para tais, foram consideradas as medidas dos pontos da face esquerda, pois é a que corresponde à medida realizada no ensaio mecânico.

TABELA 15 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE DESLOCAMENTO

Força	50 daN	100 daN	150 daN	200 daN	250 daN	300 daN	350 daN	400 daN	450 daN	500 daN
Medida programa (mm)	112	224	336	447	559	671	783	895	1007	1119
Medida real (mm)	115	224	343	465	593	742	870	1010	--	--
DIFERENÇA (mm)	3	0	7	18	34	71	87	115	--	--
DIFERENÇA (%)	2,81%	0,13%	2,21%	3,93%	6,03%	10,56%	11,11%	12,87%	--	--

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que até o valor de 200 daN, que corresponde a resistência nominal do poste, a variação entre a medida obtida experimentalmente e a medida teórica é pequena. Porém, à medida que o valor da carga aumenta, a variação passa a ser bem maior. Também para o valor da resistência nominal é possível constatar que o deslocamento da estrutura se manteve dentro do limite estabelecido, que era de 4% conforme citado em 3.2.

Não foi possível comparar a curva elástica obtida no programa com a curva real, pois no ensaio mecânico não foi medido o deslocamento da estrutura nas várias alturas, visto que a única medida utilizada como parâmetro de aprovação no ensaio é a deslocamento no topo. Porém, é possível realizar uma comparação de valores com as curvas geradas pelo programa de dimensionamento utilizado para a produção do poste, as quais se encontram nos apêndices de A a J. É possível perceber que as curvas do programa de dimensionamento apresentam valores parecidos com as

geradas pelo programa de análise. O que permite concluir que a análise está coerente com o esperado.

Além dos deslocamentos, os principais objetivos deste trabalho eram analisar a ovalização da estrutura e a tensão de ruptura. Quanto à ovalização, o programa de modelagem não registrou valores significativos de estrangulamento no diâmetro da estrutura. A diferença entre as medidas dos deslocamentos dos lados esquerdo e direito de mesma altura do programa extraídas de análise podem ser observadas na tabela 16.

TABELA 16 – DIFERENÇA ENTRE DESLOCAMENTOS OBTIDOS NO PROGRAMA COMPUTACIONAL (mm)

	50 daN	100 daN	150 daN	200 daN	250 daN	300 daN	350 daN	400 daN	450 daN	500 daN
9 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
2,5 m	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03
2 m	-0,01	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05	-0,06
1,5 m	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,04	-0,05
1 m	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
0,5 m	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08

Fonte: Autoria própria

É possível observar uma pequena ovalização entre 1,5m e 2,5m, porém os valores são muito pequenos quando comparados com a realidade. No ensaio mecânico, a ovalização foi significativa. Na tabela 17 pode-se observar o estrangulamento da estrutura, medido pela diminuição do diâmetro, conforme o acréscimo da força aplicada na estrutura.

TABELA 17 – VARIAÇÃO DO DIÂMETRO (mm)

	50 daN	100 daN	150 daN	200 daN	250 daN	300 daN	350 daN	400 daN	450 daN	500 daN
9 m	0,00	0,00	0,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
8 m	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
7 m	0,00	0,00	0,00	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50
6 m	0,00	0,00	0,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
5 m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,50	-0,50	-2,00	-2,00	-2,00
4 m	-2,00	-2,00	-2,00	-2,00	-2,00	-2,00	-2,00	-2,50	-3,50	-3,50
3 m	0,00	0,00	0,00	-1,00	-1,00	-2,50	-4,00	-4,00	-6,00	-8,00
2,5 m	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,50	-3,00	-4,50	-6,50	-11,50	-11,00
2 m	-1,50	-1,50	-1,50	-2,50	-3,00	-4,00	-7,00	-9,50	-12,50	-13,50
1,5 m	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,50	-3,00	-6,00	-7,50	-9,00	-10,50
1 m	0,00	0,00	0,00	-1,00	-1,50	-2,00	-5,00	-5,50	-7,50	-8,50
0,5 m	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-2,00	-4,00	-4,00	-4,00	-5,50

Fonte: Autoria própria

A partir da tabela 17, estabeleceu-se a curva de ovalização da estrutura solicitada a 500 daN. No mesmo gráfico sobrepôs-se a curva de tensões de compressão, obtida pelo programa computacional, da estrutura quando solicitada a mesma carga. Esta correlação entre ovalização e tensão pode ser observada na figura 13:

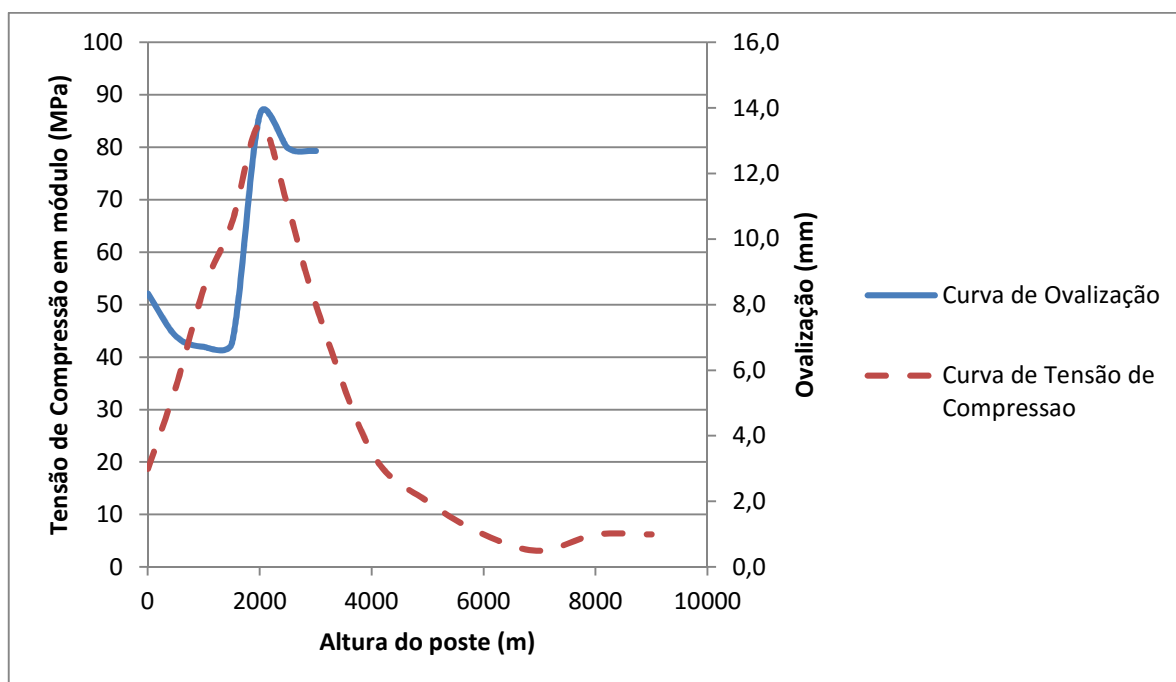


FIGURA 13 – Correlação entre ovalização e tensão.

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados e o gráfico, constata-se que a maior ovalização sofrida foi na altura de 2m a partir do engastamento, onde o diâmetro do poste diminuiu 4,16% em relação ao seu valor inicial. A segunda maior variação registrada

foi na altura de 1,5m, onde a redução foi de 3,15%. No ensaio mecânico foi registrado que o poste rompeu na face comprimida, na direção das fibras, entre 1,5m e 2m, altura esta que corresponde às maiores variações de diâmetro. A partir dos resultados de tensão apresentados nas tabelas de 7 a 12, constata-se que a maior tensão, em todas as forças aplicadas, situou-se na altura de 2m, reduzindo significativamente seu valor a partir de então. Esta altura corresponde exatamente ao fim da camada de fios a 90°, e ao ponto de maior ovalização.

5. CONCLUSÕES

Para a comparação entre deslocamentos o programa de análise estrutural foi satisfatório em seus resultados. Os deslocamentos medidos até a resistência nominal são próximos dos obtidos no ensaio de campo. À medida que a carga aumentou, os resultados do programa se afastaram dos medidos. No ensaio mecânico o poste defletiu significativamente mais do que o programa calculou. Isso pode ter ocorrido devido a dois fatores. O primeiro motivo levantado foi a possível ocorrência de microfissuras na estrutura, o que provocou alteração na curva elástica do material. A curva produzida pelo programa de análise estrutural considera o material perfeitamente elástico, portanto quando comparados seus valores com o a curva do material já fissurado, a diferença de resultados é significativa. Outro fator que pode ter influenciado nesta divergência de resultados é o engaste do material. Para pequenas cargas a estrutura se comportou praticamente como perfeitamente engastada, correspondendo ao que foi considerado na modelagem computacional. Porém, para cargas mais elevadas, pode ter ocorrido algum deslocamento nos parafusos e/ou nas chapas metálicas que realizavam o travamento da estrutura, propiciando maior deslocamento no topo da mesma.

Para a avaliação da ovalização da estrutura o programa de modelagem não pode ser considerado ideal. As curvas de deslocamentos da face tracionada e da face comprimida praticamente não explicitaram diferença entre si. A única maneira de relacionar a ovalização registrada no ensaio de campo com o programa computacional é pela análise de tensões. O programa registrou a maior tensão, tanto de tração quanto de compressão, exatamente no local onde ocorreu a maior ovalização e ruptura da estrutura. Portanto, pode-se considerar que o local onde ocorrerá a maior ovalização será onde estão indicadas as maiores tensões. Assim sendo, será o local onde ocorrerá a ruptura por compressão.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Emprego de processos de análise com formulações e/ou programas diferentes;
- Análise de postes sujeitos à ações combinadas normais e de flexão;
- Análise de postes de PRFV produzidas por outro método;
- Análise de outras estruturas produzidas pelo mesmo método.

REFERÊNCIAS

ABMACO, Associação Brasileira de Materiais Compósitos. **Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. 2008.

ALVES, Lucas Máximo. **Método dos Elementos Finitos**. 2007. 438. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 2003. 249. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2003.

CALLISTER Jr., William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMPBELL, F. C. **Structural Composite Materials**. Estados Unidos da América: ASM International®, 2010.

FARIA, Paulo Eustáquio de. **Estudo Sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro**. 2007. 231. Tese – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

FERRARI, Andressa; FLORES, Carina Z.; CASAGRANDE Jr., Eloy F.; SILVA, Maclovia C. **Sustentabilidade no Mercado da Construção de Casas de Madeira em Curitiba e Região Metropolitana**. 2009. 21. III SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA E SOCIEDADE. Curitiba, Paraná, 2009.

FERREIRA, José Carlos Lopes da Rocha. **Postes Estruturais em Sistemas Compósitos**. 2009. 99. Tese – Universidade do Porto, Porto, 2009.

FORTE, Marco Aurélio. **Plásticos Reforçados com fibra de vidro**. COOPMACO, 2014.

GESUALDO, Francisco A. R. **Método dos Elementos Finitos**. 2010. 53. Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

HARRIS, Bryan. **Engineering Composite Materials**. Londres, 1999.

HART, George. **O Egito Antigo**. São Paulo: LOYOLA, 1996.

JAIGOBIND, Allan George A.; AMARAL, Lucia do; JAISINGH, Sammay. **Dossiê Técnico: Fabricação de Peças em Fibra de Vidro**. BRT, 2007.

KAEFER, Luis Fernando. **A Evolução do Concreto Armado**. São Paulo, 1998.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha; PIOVESAN, Mauricio; BERTOLETTI, Luisa Lima; ALTMAYER, Sabrina; VORPAGEL, Tatiane Hohm. **Fibras de Vidro: Caracterização, Disposição Final e Impactos Ambientais Gerados**. 2013. v.10, n.1, p. 2112-2121, jan-abr, 2013.

LOTTI, Raquel S.; MACHADO, André W.; MAZZIEIRO, Ênio T.; LANDRE Jr., Janes. **Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos**. Maringá, v.11, n.2, p. 35-43, mar./abril 2006.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos**. São Paulo: Artliber, 2011.

ORTENZI Jr., Altibano. **A Fibra de Vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e Seu Uso Estrutural Em Construção Civil**. 2007. 228. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

PARENTE, Ricardo Alves. **Elementos Estruturais de Plástico Reciclado**. 2006. 153. Dissertação – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SORIANO, Humberto L. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

SOUZA, Rafael Alves; REIS, Jeselay H. C. **Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas**. Maringá, v. 30, n. 2, p. 161-171, 2008.

APÊNDICE A - Curvas elásticas obtidas pelo programa de dimensionamento PRFV

