

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,

Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**CALIBRAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO PARA  
SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO  
DE CABOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR  
FIBRA DE CARBONO**

**Eduardo Antonio Wink de Menezes**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2015

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**CALIBRAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO PARA  
SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DE CABOS POLIMÉRICOS  
REFORÇADOS POR FIBRA DE CARBONO**

**Eduardo Antonio Wink de Menezes**

**Engenheiro mecânico**

Trabalho realizado no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2015

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico (UFRGS)

Co-orientador: Prof. Dr. Rogério José Marczak (UFRGS)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alfredo Rocha de Faria (ITA)

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler (UFRGS)

Prof. Dr. Rodrigo Rossi (UFRGS)

---

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

*“I could be a business man,  
sign here on a dotted line,  
maybe that’s a perfect plan,  
but it isn’t mine.”*

*Smoking Popes - College*



## AGRADECIMENTOS

À Deus, minha única esperança de justiça.

Aos orientadores Sandro Amico e Rogério Marczak pelo conhecimento a mim proporcionado e por acreditarem na ideia do presente trabalho.

Aos colegas do LAPOL Laís, Fernanda e Válter pelo auxílio no preparo das amostras e execução dos ensaios, ao colega do GMAp Leonel pelo auxílio na parte numérica deste trabalho.

À melhor família do mundo, os três Menezes que sempre deram toda a força de que precisei, e à amiga, psicóloga e namorada Andrea Bercini.

Ao CNPq pela bolsa concedida durante o mestrado na mecânica, à Petrobras pela oportunidade de participação em um de seus projetos e por todo investimento na pesquisa científica que proporciona ao nosso país.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pintura datada de 2000 A.C. mostrando a produção de cabos no Egito antigo [6].	18
Figura 2- Nomenclatura comumente usada para os componentes de um cabo [7].	19
Figura 3 – a) Cabo com torção à esquerda [7] b) Cabo com torção à direita [7] c) Seis possíveis combinações considerando o sentido da torção das pernas e dos fios [9].	19
Figura 4 – Exemplo de cabo com uma (a) e com várias camadas (multicamadas) (b).	20
Figura 5 – Localização dos fios com hélice dupla e com hélice simples. Adaptado de [13].	21
Figura 6 – Ilustração do passo do cabo $p$ e do ângulo da hélice $\alpha$ .	21
Figura 7 – Exemplo de cabo modelado com elemento hexaédrico (a) e tetraédrico (b).	23
Figura 8 – Gráficos dos elementos da matriz de rigidez conforme o ângulo $\beta$ é aumentado, onde LAB representa o modelo analítico de Labrosse [28], HRU de Hruska [22], McC de McConnel et al. [24], COS de Costello [3], KUM de Kumar [25], SAT de Sathikh [27], RAM de Ramsey [26] e FEM é a solução numérica de Ghoreishi [21]. Adaptado de [21].	25
Figura 9 – Gráfico comparando propriedades específicas de diversos reforços [41].	30
Figura 10 – Cabos de aço corroídos na ponte de Brooklyn, EUA [43].	30
Figura 11- a) Ponte de Ibach (Suíça) [44] b) Ponte de Oberriet (Suíça) [5] c) Ponte de Verdasio (Suíça) [45].	31
Figura 12 – Evolução da profundidade de extração de petróleo de 1979 a 2012 [53].	33
Figura 13 – Comparação entre módulo de elasticidade e resistência mecânica específicos de cabos de diferentes materiais. Adaptado de [52].	34
Figura 14- Plataformas TLP (1 e 2) e semissubmersíveis (3 e 4) ancoradas através de cabos. Adaptado de [57].	34
Figura 15 – Seção transversal do cabo $1 \times 10$ analisado.	37
Figura 16 – (a) Ensaio de tração na alma. (b) Strain-gauge em detalhe, fixado paralelo ao cabo. (c) Alma rompida.	38
Figura 17 - Ensaio de tração em cabo $1 \times 10$ instrumentado com dois SGs.	39
Figura 18 – Ensaio de flexão em quatro pontos no cabo CFRP.	40
Figura 19 – Sistema de coordenadas local (1-2-3) vs. Sistema de coordenadas global (X-Y-Z).	42
Figura 20 – Aplicação da carga e condições de contorno simulando o ensaio de tração.	43
Figura 21 - Aplicação da carga e condições de contorno simulando ensaio de flexão em quatro pontos.	43
Figura 22 - Amostra do cabo $1 \times 10$ mostrando excesso de resina oriundo de sua fabricação.	45
Figura 23 - Fluxograma adotada para realizar a calibração dos modelos numéricos.	47
Figura 24 - Deformação (linha contínua) e Tempo (barras) para diferentes comprimentos de cabos simulados em tração.	49
Figura 25 – Simulação de tração: a) Análise de convergência de malha e b) Imagem da configuração escolhida (26908 nós).	50
Figura 26 - Simulação de dobramento: (a) Análise de convergência de malha e b) Imagem da configuração escolhida (39318 nós).	50

Figura 27 – Mudança no comportamento do cabo com a variação do módulo de elasticidade longitudinal $E_1$ em tração (a) e dobramento (b). .....	51
Figura 28 - Mudança no comportamento do cabo com a variação dos módulos de elasticidade transversais $E_2$ e $E_3$ em tração (a) e dobramento (b). .....	51
Figura 29 – Mudança no comportamento do cabo com a variação dos coeficientes de Poisson $\nu_{12}$ e $\nu_{13}$ em tração (a) e dobramento (b). .....	52
Figura 30 – Mudança no comportamento do cabo com a variação do coeficiente de Poisson $\nu_{23}$ em tração (a) e dobramento (b). .....	52
Figura 31 - Mudança no comportamento do cabo com a variação dos módulos de cisalhamento $G_{12}$ e $G_{13}$ em tração (a) e dobramento (b). .....	53
Figura 32 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do módulo de cisalhamento $G_{23}$ em tração (a) e dobramento (b). .....	53
Figura 33 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do coeficiente de atrito $\mu$ em tração (a) e dobramento (b). .....	54
Figura 34 - Pressão devido ao contato dos fios que circundam a alma do cabo após este ser tracionado (a) e penetração desenvolvida no interior do cabo (b). .....	54
Figura 35 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do inverso do passo $p$ em tração (a) e dobramento (b). .....	55
Figura 36 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do diâmetro dos fios em tração (a) e dobramento (b). .....	55
Figura 37 - Comparação das curvas experimentais e numéricas do cabo solicitado em tração. ....	57
Figura 38 - Ruptura do cabo $1 \times 10$ em tração. ....	58
Figura 39 - a) Deformação em escala de cores na seção transversal média do cabo. b) Deslocamento na direção Z do cabo após aplicação da carga. ....	58
Figura 40 - Resultados de dobramento do cabo $1 \times 10$ . ....	59
Figura 41 - a) Seção transversal onde o deslocamento é máximo. b) Cabo com deslocamento em escala de cores. ....	60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação entre cabos de aço e cabos de fibra de carbono. Adaptado de [48]. .....	32
Tabela 2 - Resultado dos ensaios de tração executados na alma dos cabos.....	48
Tabela 3 - Propriedades da fibra, matriz e do compósito resultante.....	48
Tabela 4 - Força e deformação de ruptura dos cabos ensaiados e simulado.....	57
Tabela 5 - Comparação entre os deslocamentos experimentados pelo modelo numérico e os valores obtidos em ensaio experimental.....	59
Tabela 6 - Comparação entre os resultados originais e após o processo de calibração. .	61

# LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

**C** – Matriz constitutiva

$C$  – Constante elástica

CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (polímero reforçado por fibra de carbono)

CTE – *Coefficient of Thermal Expansion* (coeficiente de expansão térmica)

$D$  – Diâmetro da alma do cabo

$d$  – Diâmetro dos fios do cabo

$E$  – Módulo de elasticidade

$E_i$  – Módulo de elasticidade na direção  $i$

$E_{f,11}$  – Módulo de elasticidade longitudinal da fibra

$E_{f,22}$  – Módulo de elasticidade transversal da fibra

$E_m$  – Módulo de elasticidade da matriz

FE – *Finite element* (elementos finitos)

FEM – *Finite element method* (método dos elementos finitos)

$f^a$  – Força adimensional

$f$  – Função objetivo

$G$  – Módulo de cisalhamento

$G_{ij}$  – Módulo de cisalhamento no plano  $i$ - $j$

$G_{f,12}$  – Módulo de cisalhamento da fibra no plano 1-2

$G_{f,23}$  – Módulo de cisalhamento da fibra no plano 2-3

$G_m$  – Módulo de cisalhamento da matriz

**H** – Matriz Hessiana

$k$  – Rigidez do cabo

$K_1$  – Coeficiente que atribui “peso” ao erro observado em tração

$K_2$  – Coeficiente que atribui “peso” ao erro observado em flexão

$L$  – Comprimento do cabo

$lb$  – *Lower bound* (limite inferior)

$m^a$  – Momento adimensional

$N_1$  – Número de fios acrescido da alma

$N_2$  – Número de pernas

$N_3$  – Número de fios envolvendo cada perna

$p$  – Passo do cabo  
 $q$  – Divisão da função objetivo  $f$   
 $R_2$  – Distância do centro do fio externo até o centro do cabo  
 $R_e$  – Relaxação  
 $R_h$  – Distância de uma posição genérica até o centro da alma do cabo  
 $s$  – Incremento dentro da região de confiança  
SG – *Strain-gauge* (extensômetro)  
TLP – *Tension leg platform* (plataforma de pernas atirantadas)  
 $u$  – Deslocamento vertical  
 $ub$  – *Upper bound* (limite superior)  
 $x_i$  –  $i$ -ésima variável do processo de otimização

#### Caracteres Gregos

$\alpha$  – Ângulo da hélice do cabo  
 $\beta$  – Complementar do ângulo da hélice  
 $\Delta$  – Raio da região de confiança  
 $\varepsilon$  – Deformação  
 $\varepsilon_u$  – Deformação de ruptura  
 $\theta$  – Ângulo de rotação em torno do eixo especificado pelo índice subscrito  
 $\mu$  – Coeficiente de atrito  
 $\nu$  – Coeficiente de Poisson  
 $\nu_{ij}$  – Coeficiente de Poisson no plano  $i$ - $j$   
 $\nu_{f,12}$  – Coeficiente de Poisson da fibra no plano 1-2  
 $\nu_{f,23}$  – Coeficiente de Poisson da fibra no plano 2-3  
 $\nu_m$  – Coeficiente de Poisson da matriz  
 $\rho$  – Densidade mássica  
 $\sigma_u$  – Tensão de ruptura

## RESUMO

Cabos são componentes estruturais utilizados desde a antiguidade, principalmente em aplicações onde o carregamento axial é elevado, enquanto a flexão e torção são relativamente baixos. Exemplos de aplicação atuais incluem sustentação de pontes, ancoragem de plataformas *offshore*, elevadores, transporte em minas, guindastes, entre outros. O estudo de seu comportamento mecânico envolve fatores que agregam considerável complexidade na elaboração de modelos numéricos ou analíticos que representem seu comportamento. Dentre esses fatores se destacam as tensões de contato que surgem entre as pernas do cabo à medida que deslizam em relação às outras, a geometria helicoidal, a rotação das pernas em torno da alma do cabo ao ser estendido (i.e., variação do ângulo da hélice do cabo) além de, no caso de cabos compósitos, um comportamento anisotrópico. Tendo em vista a indisponibilidade de uma solução analítica completa para cabos compósitos, buscou-se através do presente trabalho calibrar um modelo numérico elaborado em *software* comercial de elementos finitos, contemplando fatores comumente desprezados pelos modelos analíticos simplificados. Foram executados ensaios de tração na alma de cabos de compósitos com fibras de carbono de geometria  $1 \times 10$  (nove fios envolvendo a alma) para determinar o módulo de elasticidade longitudinal e utilizada a teoria da micromecânica para avaliar as demais constantes de engenharia. O cabo foi modelado em tração, onde uma extremidade foi engastada e a outra teve rotação restrita e deslocamento longitudinal livre, e também em flexão em quatro pontos, deixando uma das extremidades com rotação livre e a outra com rotação e deslocamento longitudinal livre, com os demais graus de liberdade restritos. Em seguida foi conduzida uma análise de sensibilidade das principais variáveis que governam o problema, de onde se concluiu que o passo do cabo, o diâmetro de seus fios e o módulo de elasticidade longitudinal são as mais relevantes. O desvio da deformação de ruptura em tração e do deslocamento em flexão obtidos numericamente em relação aos dados experimentais obtidos foi de 10,8 % e 14,6 %, respectivamente. Após o processo de calibração, que fez uso do método de Programação Linear Sequencial para buscar o valor das variáveis de projeto que minimizassem o erro entre os dados experimentais e numéricos, o desvio encontrado reduziu para 2,4 % e 0,1 %, respectivamente.

**Palavras-chave:** Cabos compósitos, calibração, elementos finitos, tração, dobramento.

## ABSTRACT

Wire ropes have been used since ancient times, especially in applications where the axial stress is high and flexural and torsional stresses are relatively low. Current applications include bridges, *offshore* platforms, elevators, mine hoisting, cranes, among others. Study of their mechanical behavior encompasses many factors, bringing considerable complexity in the construction of numerical or analytical models that represent their behavior, including contact stresses between rods as they slide past one another, helical geometry, rotation of wires around the core when in extension (i.e. variation in helix angle) and also, for composite cables, the anisotropic behavior. In view of the unavailability of a comprehensive analytical solution, this work focuses on the calibration of a numerical model built on a finite element software incorporating factors commonly neglected by simplified analytical approaches. Tensile tests were performed on the core of carbon fiber composite cables, 1×10 geometry (nine rods surrounding the core), to evaluate its longitudinal elastic modulus and employed micromechanics theory to obtain the remaining engineering constants. The cable was then modeled under tensile stress, where one end was fully constrained and the other could not rotate but was free to move in the longitudinal direction. Under 4-point bending, where one end was free only to rotate, while the other was free to move in longitudinal direction and to rotate, whereas the remaining degrees of freedom were constrained. After that, sensitivity analysis of the main variables governing the problem was conducted, concluding that cable pitch, rod diameter and longitudinal elastic modulus of the rods are the most relevant parameters. Deviation between ultimate strain under tensile stress and displacement under bending numerically obtained with those from experiments were 10.8 % and 14.6 %, respectively. After the calibration process, which used Sequential Linear Programming to search for the design variables values that minimized error between numerical and experimental data, the finite element model could reproduce the tensile stress and bending behavior with deviations of 2.4 % and 0.1 %, respectively.

**Keywords:** Composite cables, calibration, finite elements, tensile stress, bending.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Objetivo geral.....	16
1.2 Objetivos específicos.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1 Cabos .....	18
2.2 Método dos Elementos Finitos e sua aplicação em cabos .....	22
2.3 Calibração de modelos numéricos.....	26
2.4 Cabos Compósitos.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 Materiais .....	37
3.2 Ensaio de tração na alma e no cabo .....	38
3.3 Ensaio de dobramento no cabo .....	39
3.4 Modelo numérico via FEM.....	40
3.5 Calibração do modelo numérico .....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1 Resultados experimentais.....	48
4.2 Análise de sensibilidade.....	48
4.3 Calibração .....	56
5. CONCLUSÕES .....	62
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
7. REFERÊNCIAS.....	65

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao recente avanço na pesquisa em materiais compósitos, inserção de novas técnicas para sua fabricação e melhor compreensão de seu comportamento térmico e mecânico, surgiu uma tendência global de substituir materiais tradicionais por materiais compósitos. No mercado norte-americano, por exemplo, o uso de tais materiais vem crescendo a uma taxa constante de 10 % ao ano [1], principalmente na indústria aeroespacial e outras aplicações de elevada responsabilidade estrutural. O uso desses materiais é feito em busca da redução no peso, sendo hoje produzidas aeronaves com percentual de material compósito em massa de até 50 % [2].

Dentre as possíveis aplicações, a utilização de materiais compósitos na fabricação de cabos vem sendo amplamente estudada. Cabos são importantes elementos estruturais com resistência a cargas axiais relativamente altas em comparação à torção e ao dobramento [3], são tradicionalmente manufaturados em metais ou em polímeros (e.g. poliéster), e sua substituição por compósitos vem sendo proposta. Cabos de materiais compósitos podem ser empregados em diferentes setores, como na construção civil, onde são utilizados na construção de pontes, permitindo a projeção de pontes de maior *span* (distância entre suportes) e diminuindo o custo com manutenção devido à sua durabilidade e resistência à fadiga, muito superiores à do aço [4]. Essa aplicação teve início na década de 90, tendo sido constatado por Meyer [5] a ausência de qualquer rompimento ou sinais de degradação no material. Cabos compósitos despertaram também o interesse da indústria *offshore*, uma vez que plataformas ancoradas por cabos metálicos não podem ser empregadas em águas ultra profundas (acima de 1500 m) devido ao seu elevado peso. Cabos poliméricos, por serem flexíveis, também não são muito indicados nesses casos por permitirem um deslocamento considerável da plataforma devido à ação das ondas do mar.

Cabos de materiais compósitos consistem geralmente de matriz termorrígida reforçada por fibras de vidro, aramida ou carbono. No caso de ser utilizada fibra de carbono, os cabos CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) possuem resistência mecânica e rigidez específica superiores a de cabos metálicos ou poliméricos, além de excelente resistência à fadiga e à corrosão, apresentando também bom comportamento em relaxação e fluência, tendo como desvantagem em relação a cabos poliméricos apenas a dificuldade de manuseio e comportamento em dobramento devido à elevada rigidez que apresenta, razão pela qual cabos

CFRP são normalmente construídos de forma helicoidal, com uma alma circundada por pernas torcidas em um determinado ângulo de inclinação ao seu redor.

Para aumentar a aplicabilidade de cabos compósitos, no entanto, é necessária uma melhor compreensão de seu comportamento mecânico, pois as soluções analíticas atualmente disponíveis assumem hipóteses inviáveis para o estudo desses cabos, mesmo quando solicitados em condições de carregamento simples (tração, flexão ou torção). Por mais que existam na literatura diversas abordagens para cabos isotrópicos, onde grande parte acaba também desconsiderando a influência do atrito entre os fios do cabo, materiais compósitos apresentam comportamento ortotrópico, geralmente simplificado para transversalmente isotrópico, com propriedades mecânicas superiores na direção de orientação da fibra e idênticas nas outras duas.

Uma estratégia comumente adotada na ausência de soluções analíticas é a modelagem do problema mecânico através de um método numérico, como o *Finite Element Method* (FEM). No entanto, modelos construídos via FEM apresentam uma variedade de erros, sejam eles na malha, nas distorções nos elementos, erros numéricos de truncamento, entre outros, o que acaba gerando divergências entre a realidade e o modelo numérico idealizado. No caso de cabos CFRP se deve considerar ainda a dificuldade de capturar o efeito do atrito entre os fios do cabo, a imprecisão das propriedades mecânicas do compósito, algumas de difícil obtenção experimental, além da presença de vazios gerados na fabricação. Surge então a necessidade de criar um modelo numérico capaz de prever com acurácia os resultados experimentais, o que pode ser feito por meio da calibração do modelo numérico. Para tanto, são feitas análises de sensibilidade afim de analisar as variáveis de projeto que mais influenciam o comportamento do cabo. Em seguida é utilizado um algoritmo de minimização de funções que busque determinar os parâmetros das variáveis relevantes que gerem o menor erro na comparação entre os resultados experimentais e numéricos, possibilitando assim que os novos parâmetros sejam utilizados em outras geometrias e em outros casos de carregamento, e de forma irrestrita para os carregamentos utilizados na calibração.

## **1.1 Objetivo geral**

Desenvolver uma metodologia que permita a calibração do comportamento mecânico de cabos poliméricos reforçados por fibra de carbono (CFRP) de geometria  $1 \times 10$  (nove fios circundantes à alma) a partir de resultados experimentais de tração e dobramento. A



metodologia deve se estender para cabos compósitos de outros materiais e, no caso de CFRP, não só a metodologia como os valores das variáveis de projeto calibradas.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar a caracterização mecânica dos cabos de CFRP, em tração e em dobramento, através de ensaios experimentais.
- Reproduzir os resultados experimentais através de modelo numérico criado pelo FEM.
- Realizar análise de sensibilidade do modelo criado para as principais variáveis envolvidas a fim de determinar as mais relevantes e que serão incluídas na calibração posterior.
- Construir um algoritmo capaz de extrair os resultados gerados numericamente, compará-los com os experimentais e calcular seu erro relativo.
- Empregar um algoritmo que minimize o desvio entre os modelos numéricos e experimentais a partir de ajuste nos valores das variáveis de projeto para a reprodução do comportamento mecânico do cabo compósito.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cabos

Uma propriedade comum de elementos estruturais como cordas, fios, cabos e cordões é sua habilidade em resistir a cargas axiais relativamente altas comparadas a torção e dobramento [3]. Embora não se saiba ao certo quando os cabos começaram a ser utilizados pela civilização, pinturas de mais de 4.000 A.C. feitas em murais com pessoas utilizando cabos foram encontradas no Egito [6]. A Figura 1 ilustra a produção de cabos no Egito antigo.

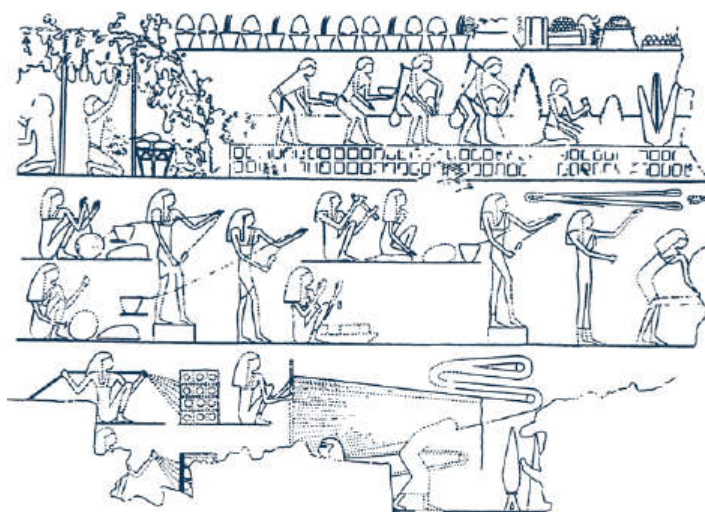


Figura 1 – Pintura datada de 2000 A.C. mostrando a produção de cabos no Egito antigo [6].

O processo de fabricação de cabos permaneceu inalterado até o século XIX, onde surgiu a estrutura helicoidal visando aumentar a flexibilidade dos cabos e melhorar seu comportamento em dobramento. Um importante marco da história dos cabos ocorreu em 1883, quando foi inaugurada a primeira ponte sustentada por cabos em Nova York, ligando os distritos de Manhattan e Brooklyn.

Na geometria helicoidal, os fios circundantes giram em torno da alma, dando origem a diversas arquiteturas de cabos (*seale*, *spiral*, *stranded*, entre outras). A Figura 2 ilustra a nomenclatura dos componentes de um cabo, enquanto a Figura 3 mostra suas possíveis construções. Observa-se que a construção do tipo *Ordinary* (ou *regular*) *lay* possui fios torcidos em direção oposta às pernas, enquanto na construção *Lang lay* ambas giram no mesmo sentido.

No caso do tipo alternado, os fios internos às pernas têm sentido de torção alternado, fazendo com que as pernas se revezem entre *Lang* e *Ordinary* ao longo do comprimento.

O tipo de construção a ser adotado dependerá do que se espera do cabo a ser construído. Uma construção *Ordinary lay* minimiza o desgaste e gera um torque balanceado, evitando problemas de torção. Já a construção *Lang lay* aumenta a vida em fadiga e torna o cabo mais flexível, beneficiando o comportamento em dobramento [7] e [8]. Em termos do comportamento em tração a diferença no desempenho é insignificante [9] e [10].

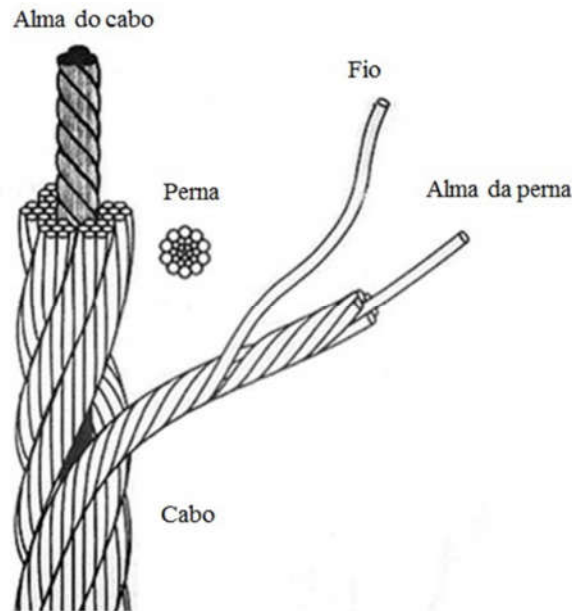


Figura 2- Nomenclatura comumente usada para os componentes de um cabo [7].

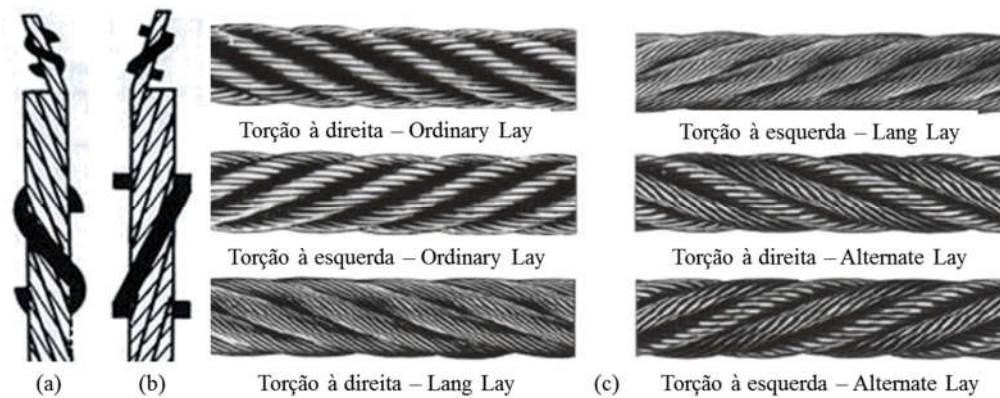


Figura 3 – a) Cabo com torção à esquerda [7] b) Cabo com torção à direita [7] c) Seis possíveis combinações considerando o sentido da torção das pernas e dos fios [9].

A construção de modelos analíticos para a predição do comportamento mecânico de cabos helicoidais é uma tarefa desafiadora, pois envolve a complexa geometria espiral dos fios ao redor da alma, o atrito entre fios adjacentes, a rotação dos fios ao redor do núcleo e a variação no passo (distância longitudinal percorrida pelos fios até completar uma volta em torno da alma) quando solicitado axialmente. Costello [3] reuniu soluções analíticas para cabos com uma ou mais camadas, solicitados em tração, dobramento e fadiga. A Figura 4 ilustra um exemplo de cabo de camada única e outro de várias camadas. No entanto a solução apresentada por Costello [3] despreza o atrito entre os fios, bem como o deslocamento relativo entre eles, a rotação em torno da alma e também assume o material como isotrópico.

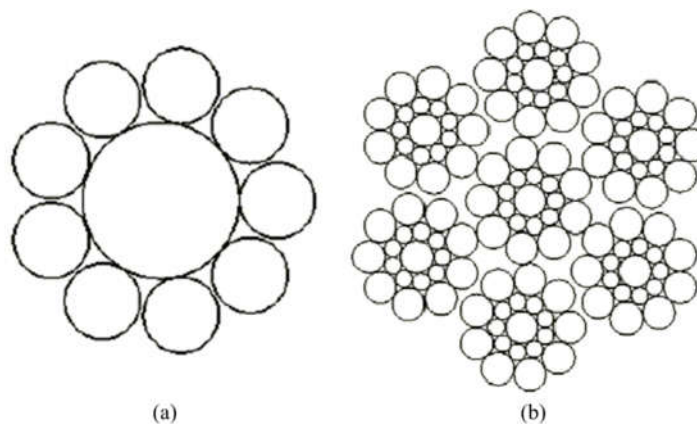


Figura 4 – Exemplo de cabo com uma (a) e com várias camadas (multicamadas) (b).

Usabiaga e Pagalday [11] propuseram um modelo analítico baseado na teoria de vigas, validado com o modelo de Costello, que despreza o efeito de Poisson. Seu modelo baseia-se na teoria de barras proposto por Love [12], mas ao contrário da maioria dos modelos anteriores trata os fios das pernas externas, que percorrem uma hélice dupla (uma em torno da alma da perna e outra em torno da alma do cabo) com igual severidade, evitando simplificações em torno destes. Isso causa uma diferença significativa em relação ao de Costello para o caso de torque induzido nas extremidades do cabo. Usabiaga e Pagalday [11] também verificaram um maior torque gerado na construção do tipo *Lang lay*, uma vez que não utilizaram a simplificação de rotação desprezível nos fios do cabo.

A Figura 5 mostra a diferença entre a hélice simples e dupla. A nomenclatura de cabos de uma camada proposta pela norma ISO17893 expressa o nome no formato  $1 \times N_1$ , onde  $N_1$  é o número de fios acrescido da alma. Para o cabo da Figura 4(a), por exemplo, a nomenclatura

seria  $1 \times 10$ . Já em cabos de multicamadas contendo hélices duplas o nome é expresso na forma de  $N_2 \times N_3$ , onde  $N_2$  é o número de pernas e  $N_3$  o número de fios envolvendo cada perna. Por exemplo, Figura 4(b) apresenta um cabo  $6 \times 19$ .

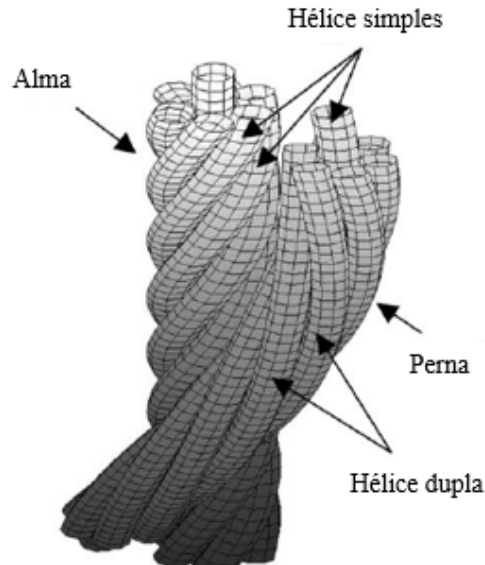


Figura 5 – Localização dos fios com hélice dupla e com hélice simples. Adaptado de [13].

Utting e Jones [14,15] compararam seu modelo analítico com resultados experimentais para tração, obtendo razoável coerência. Embora seu modelo inclua o efeito do atrito, a variação na área de contato e a localização dos pontos onde o contato ocorre à medida em que o cabo vai sendo axialmente solicitado, fazem com que seu modelo de atrito seja uma simplificação exagerada da realidade. Os autores também puderam observar perda de resistência mecânica e aumento do torque na extremidade do cabo com a redução do ângulo da hélice, ou seja, a redução do passo do cabo. A Figura 6 ilustra a definição de passo e de ângulo da hélice do cabo, que estão relacionados através da Equação (1).

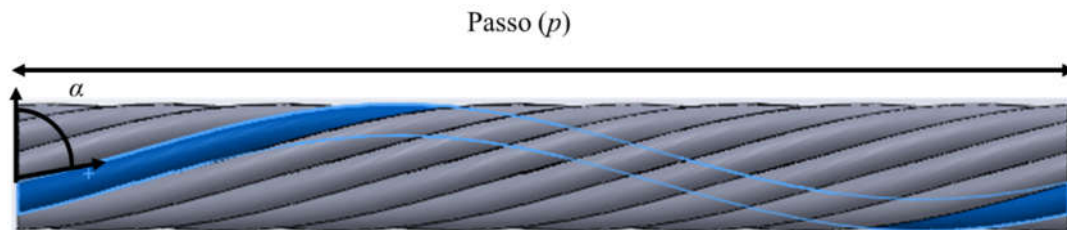


Figura 6 – Ilustração do passo do cabo  $p$  e do ângulo da hélice  $\alpha$ .

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P}{2\pi R_2}\right), \quad (1)$$

onde  $R_2$  é a distância do centro dos fios externos até o centro do cabo.

Equipando os fios do cabo com diversos *strain-gauges*, Utting e Jones [14,15] também puderam concluir que nos fios externos a tensão é consideravelmente maior perto dos engastes. Cabos engastados em ambas as extremidades apresentaram menor extensão que cabos engastados em apenas uma extremidade e com a outra com rotação livre.

Elata *et al.* [13] elaboraram um modelo analítico utilizando o teorema da reciprocidade de Betti e o validaram experimentalmente. Foi observada uma função harmônica de amplitude constante na localização da máxima deformação nos fios externos das pernas externas ao longo do comprimento do cabo, onde a deformação máxima ocorreu em posições radiais afastadas da alma na construção *Regular lay* e próximas da alma na *Lang lay*. Elata *et al.* [13] analisaram também a importância do atrito no comportamento simultâneo em tração e torque através de dois casos extremos, o primeiro considerando fios idealmente lubrificados (atrito nulo) e outro considerando fios rugosos (atrito infinito). Foi observada diferença expressiva (em torno de 7 %) apenas nos casos onde uma das extremidades do cabo possuía rotação livre.

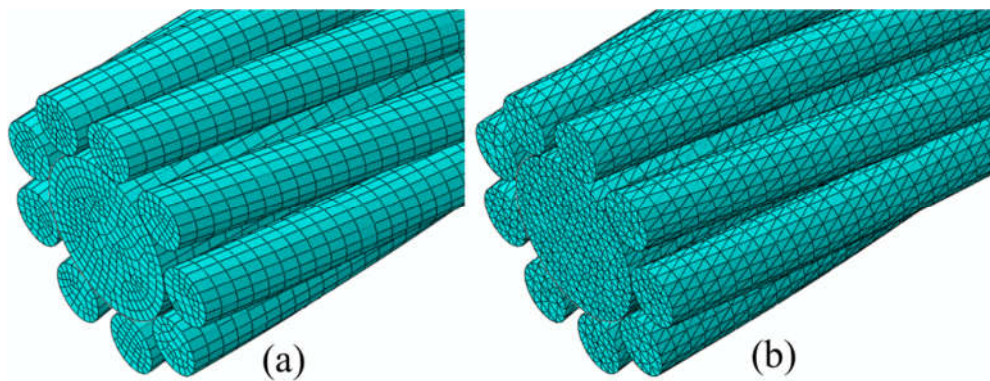
## 2.2 Método dos Elementos Finitos e sua aplicação em cabos

O objetivo geral de simulações numéricas é realizar predições capazes de reproduzir o comportamento físico de um sistema exposto a vários tipos de excitações e, baseado nessas predições, permitir que sejam tomadas decisões pertinentes. Estes modelos matemáticos são representações idealizadas da realidade, não devendo ser confundidos com a realidade física [16].

Dentre os métodos numéricos pode-se destacar o método das diferenças finitas, método de Newton-Raphson, método de Runge-Kutta, método dos elementos de contorno e o método dos elementos finitos (FEM). Tais métodos são muito utilizados em casos onde soluções analíticas não estão disponíveis e, ao contrário destas, fornecem normalmente uma aproximação da solução, além de possuírem geralmente elevado tempo computacional de execução.

Em tempos modernos, o FEM se destacou como método de análise universalmente aceito para projetos estruturais [17]. A obtenção de soluções aproximadas para modelos matemáticos

com precisão é um dos principais objetivos do FEM, que consiste de um método numérico utilizado em diversas áreas da engenharia mecânica, tanto na mecânica dos sólidos quanto em acústica, transferência de calor e massa, mecânica dos fluidos e biomecânica [16]. A partir das equações diferenciais e das condições de contorno essenciais e naturais que regem determinado problema, o problema é primeiramente transformado da forma diferencial (forma forte) para a forma integral (forma fraca). Em seguida, o problema é discretizado espacialmente em subdomínios, e em cada subdomínio é adotada uma função de interpolação buscando aproximar-se da solução exata, onde a precisão do modelo criado dependerá da função de interpolação e do número de partições do domínio. Estas subdivisões são os elementos, suas extremidades são chamadas de nós e, seu conjunto, de malha. Em problemas 2D, os elementos normalmente assumem a forma de triângulos ou retângulos, já em 3D, são hexaedros ou tetraedros, como ilustrado na Figura 7.



*Figura 7 – Exemplo de cabo modelado com elemento hexaédrico (a) e tetraédrico (b).*

Desde os primeiros desenvolvimentos que deram origem ao FEM em 1909 por Walter Ritz (embora o termo elemento finito tenha sido empregado somente em 1960 por Clough) [18], muitos modelos numéricos foram criados para reproduzir o comportamento de cabos. Erdomnez e Imrak [19,20] analisaram via FEM, com elementos hexaédricos tridimensionais, cabos multicamadas submetidos à tração pura e à tração acrescida de força vertical, de forma a causar dobramento em torno de uma polia. O modelo criado não contemplava atrito nem plasticidade, e foi comparado com a solução analítica de Costello [3], obtendo comportamento similar. Os autores compararam outro modelo, incluindo comportamento plástico, com os resultados experimentais de Utting e Jones [14,15], porém obtiveram diferença considerável nos resultados.



Somente após considerar contato normal, o modelo proposto por Erdomnez e Imrak [19] foi capaz de reproduzir corretamente o comportamento de um cabo, não gerando diferenças significativas ao se adicionar ainda o contato tangencial na comparação com dados experimentais de Utting e Jones [14,15]. Conforme previsto por Usabiaga e Pagalday [11], o erro entre o modelo numérico de Erdomnez e Imrak [19] foi maior nos fios externos quando comparado ao modelo analítico de Costello [3]. Também foi analisado o comprimento do cabo a ser simulado para que o efeito das pontas (erros na modelagem numérica nas extremidades de cabo oriundos de concentrações de tensões, entre outros) não exercesse influência nos resultados numéricos, e concluiu-se que entre 3 % e 9% do passo do cabo já existe o contato entre fios. Embora um comprimento menor acelere a convergência, comprimentos muito curtos podem fazer com que o efeito do contato não seja corretamente capturado na seção transversal do cabo [19].

Ghoreishi *et al.* [21] utilizou o método dos elementos finitos e validou seus resultados em tração com os ensaios de Utting e Jones [14,15] para cabos 1×7 de diversos passos. Também os comparou com as soluções analíticas clássicas de Costello [3], Hruska [22], Machida e Durelli [23], McConnell e Zemeke [24], Kumar e Cochran [25], Ramsey [26], Sathikh *et al.* [27] e Labrosse [28]. Foram comparados os elementos da matriz de rigidez expressos na forma não-dimensional, mostrados na Equação (2), e plotados em função do ângulo  $\beta$  na Figura 8.

$$\begin{bmatrix} f_Z^a \\ m_Z^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\varepsilon\varepsilon} & k_{\varepsilon\theta} \\ k_{\varepsilon\theta} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_Z \\ \theta_{Z,Z} \cdot R_h \end{bmatrix}, \quad (2)$$

onde a direção  $Z$  é a longitudinal,  $f^a$  e  $m^a$  são força e momento adimensionais,  $\theta$  a rotação e  $R_h$  a distância radial.

Como  $\beta$  é o ângulo complementar a  $\alpha$ , um aumento em seu valor implica na diminuição no passo do cabo, conforme mostra a Equação (1). Ghoreishi *et al.* [21] concluiu que para valores de  $\beta$  menores que  $10^\circ$  as soluções analíticas divergem do modelo numérico em menos de 10 %. No entanto, essa diferença acentua rapidamente ao aumentar o valor de  $\beta$ , fornecendo valores de rigidez acima do previsto em todos os casos.

Argatov [29] desenvolveu um modelo assintótico baseado na teoria de vigas no espaço para predição da contração e forças de contato entre os fios do cabo, e entre estes e a alma. Nesse trabalho, foi comparada a solução analítica com a solução numérica de Ghoreishi [21] e os resultados experimentais de Utting e Jones [14,15]. Embora a solução numérica tenha se aproximado mais dos experimentos, Argatov apresentou resultados consideravelmente



melhores em relação aos modelos analíticos testados por Ghoreishi [21], que divergiam significativamente da solução numérica com a redução do passo do cabo.

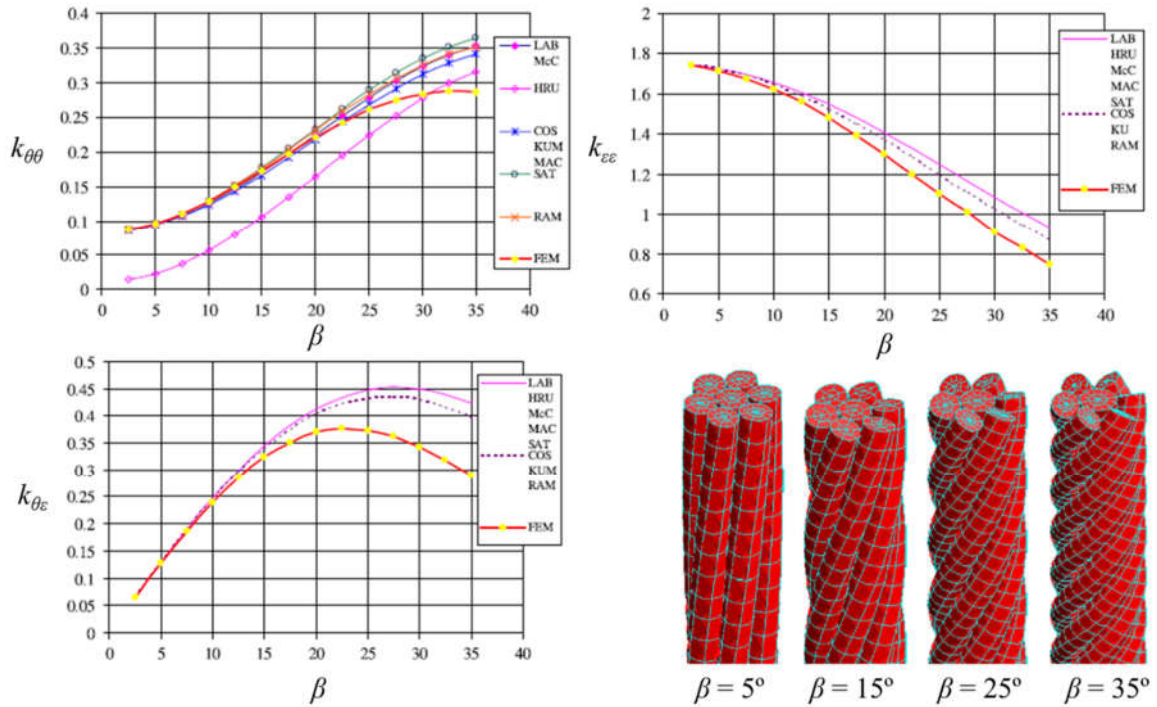


Figura 8 – Gráficos dos elementos da matriz de rigidez conforme o ângulo  $\beta$  é aumentado, onde LAB representa o modelo analítico de Labrosse [28], HRU de Hruska [22], McC de McConnell et al. [24], COS de Costello [3], KUM de Kumar [25], SAT de Sathikh [27], RAM de Ramsey [26] e FEM é a solução numérica de Ghoreishi [21]. Adaptado de [21].

Em relação ao estudo de dobramento, Jiang [30] analisou um cabo simples de geometria  $1 \times 7$  em flexão pura via FEM, obtendo resultados semelhantes a Costello [3]. Ao introduzir plasticidade em seu modelo, entretanto, os resultados divergiram consideravelmente do modelo elástico de Costello [3]. Embora tenha feito seu estudo em um cabo de camada única, afirmou que seu trabalho poderia ser estendido a cabos multicamadas, o que foi feito por Erdomnez [20], que simulou numericamente o comportamento de um cabo  $6 \times 7$  fletindo em torno de uma polia, modelada como corpo rígido. O cabo simulado por ele foi primeiramente submetido a uma deformação axial, e em seguida a um deslocamento vertical na extremidade livre, mantendo-se no regime elástico de pequenas deformações. Nesse trabalho, as forças de reação

foram reportadas em cada um dos 42 fios das sete pernas, e os maiores valores foram encontrados nos fios da perna central, sendo o maior de todos aquele atuante na alma do cabo.

Experimentos com diversas geometrias foram ensaiadas em flexão em três pontos por Chen *et al.* [31]. A resposta da curva de carga *vs* deslocamento se mostrou elasto-plástica para cabos sem pré-tensionamento e com extremidades soldadas, e linear elástica para cabos pré-tensionados, constatando ainda que o pré-tensionamento tornou o cabo mais rígido em flexão.

### **2.3 Calibração de modelos numéricos**

A representação idealizada de um problema mecânico costuma envolver diversas simplificações, fazendo com que os modelos numéricos constantemente necessitem de ajustes, como sua calibração, baseadas em resultados experimentais. Na calibração, os parâmetros que caracterizam o modelo numérico são selecionados de forma que os dados medidos experimentalmente coincidam com os simulados [16]. Devido às variações nas propriedades geométricas e dos materiais, bem como às incertezas nas condições de contorno, Ribeiro *et al.* [32] calibraram, através do uso de algoritmos genéticos, os modos de vibração de uma ponte em arco, fazendo com que o erro numérico passasse de 4,7 % para 1,9 % após a calibração. Foi realizada previamente uma análise de sensibilidade das 15 variáveis que apresentavam incerteza em seus valores, como pré-tensionamentos, densidade e módulo de elasticidade do concreto, entre outras. A calibração posterior foi construída a partir de uma função objetivo que somava a parcela correspondente ao erro entre os modos de vibração globais e outra parcela relativa ao erro dos modos locais. Para inserir “pesos” em sua função, foram inseridos coeficientes em cada parcela, cujo valor foi assumido como 1.

Calibrações também são frequentemente utilizadas na construção de modelos empíricos ou semi-empíricos. Viñuela e Castellanos [33], por exemplo, adaptaram o critério de falha proposto por von Mises em 1928, usando calibração para materiais ortotrópicos. Para tanto foram utilizados compósitos particulados a fim de verificar a eficiência da calibração. Foram obtidas, após nove casos de carregamento estudados, ótimas predições em relação ao instante inicial de escoamento, tendo sido ressaltado, no entanto, a limitação em casos onde o compósito é submetido a elevados carregamentos triaxiais.

Mishra e Chakraborty [34] utilizaram o método da calibração para determinar as constantes de engenharia  $E$  e  $\nu$  de placas de compósitos. Através de ensaios experimentais

foram analisados os modos de vibração, e a placa foi modelada via FEM para comparação. Em seguida, as propriedades de fibra e matriz de seu compósito eram atualizadas a fim de minimizar o erro observado entre os experimentos e a modelagem numérica, o que resultou em excelentes estimativas das propriedades individuais da matriz e fibra. Devido à difícil execução de ensaios para a determinação das constantes elásticas, principalmente da fibra, sua metodologia propôs uma maneira não-destrutiva e relativamente simples para sua determinação.

Para realizar uma calibração de parâmetros de um determinado problema, é necessário primeiramente avaliar as variáveis de projeto relevantes. Isso pode ser feito através de uma análise de sensibilidade, onde cada variável pode ter sua influência verificada individualmente. De acordo com Friswell e Mottershead [17], essa escolha não deve incluir um número de variáveis muito grande, que poderia ocasionar problemas de condicionamento, e o problema deve ainda ser sensível às mudanças nessas variáveis. No caso de uma calibração onde se deseja minimizar o erro entre valores calculados e observados, as variáveis relevantes devem ter seu efeito estudado simultaneamente, com o objetivo de descobrir quais valores minimizam o erro. Como nem sempre é possível avaliar todas as configurações possíveis, é necessário utilizar algoritmos de otimização que busquem o ponto ótimo de forma mais eficiente. Parte-se de um objetivo, uma grandeza que deve ser otimizada, como por exemplo, energia potencial. Essa grandeza dependerá de certas características do sistema, chamadas de variáveis de projeto, onde o objetivo é determinar quais variáveis resultarão no valor ótimo da função objetivo. Frequentemente, essas variáveis estarão sujeitas a restrições, como limites inferiores ou superiores [35].

Uma técnica de otimização comumente empregada para a determinação dos parâmetros que irão minimizar o erro em simulações de FE é o método da programação linear sequencial (SLP). Esta é uma técnica simples e de baixo custo computacional em programas com diversas variáveis [36]. A partir de um dado valor inicial, minimiza-se uma dada função objetivo sujeita a funções de restrição, que são linearizadas geralmente através da expansão em séries de Taylor [36]. Obtém-se uma direção de busca pelo ótimo em cada iteração, e então busca-se nessa direção pelo melhor ponto [37]. Como a linearização reproduz com precisão o comportamento de uma dada função somente em pequenos intervalos, utilizam-se limites móveis que são atualizados ao longo do processo, que restringem a mudança nas variáveis de projeto [38].

Algoritmos de SLP em conjunto com o FEM foram utilizados por Cheu *et al.* [39] para minimizar o peso no projeto de pás de turbinas a gás, com restrições em sua geometria e nos

valores de frequência natural, e por Gomes e Senne [40], na otimização topológica de vigas, onde foi ressaltada a rápida convergência do método. Embora SLP seja restrita a problemas de função convexa, ou seja, seu domínio é convexo e, para quaisquer dois pontos em seu domínio, o gráfico da função pertence à linha que conecta esses dois pontos [35], problemas não-convexos podem ter seu domínio dividido em subdomínios convexos.

Dentro das técnicas utilizadas para a obtenção de mínimos locais com o uso de SLP, encontra-se o método da região de confiança. De acordo com Nocedal [35], tal técnica define uma região em volta da iteração em questão, confiando que essa região represente adequadamente a função objetivo, para então definir o passo da iteração, onde o tamanho da região escolhida é crítico, pois caso seja pequeno o algoritmo perde a chance de se aproximar do ponto de mínimo da função, e caso seja grande o minimizador do modelo pode estar longe do ponto de mínimo. Ainda segundo o autor, na prática costuma-se variar o tamanho da região de acordo com o desempenho do algoritmo nas iterações anteriores. É justamente a divisão em sub-regiões e a linearização delas que faz com que tal método possa ser empregado em problemas não convexos, forçando-o a ser convexo em cada sub-região, sendo esta uma importante vantagem dele em relação a outros métodos de busca linear [37].

## **2.4 Cabos Compósitos**

Materiais compósitos são definidos por Daniel e Ishai [41] como sendo um sistema material que consiste de duas ou mais fases macroscópicas, cuja performance mecânica e propriedades são projetadas para serem superiores àquelas dos materiais constituintes agindo de forma isolada. Esta classe de material vem conquistando cada vez mais espaço na indústria brasileira e mundial, seu mercado nos E.U.A., por exemplo, cresceu a uma taxa de 10 % ao ano de 1991 a 1995 [1].

Embora esta classe de material seja aplicada nos mais diversos setores da indústria, como em raquetes de tênis, piscinas, botes e até cadeiras, existe um grupo classificado por Kaw [1] como compósitos avançados, onde fibras longas de pequeno diâmetro são empregadas como reforço em matrizes poliméricas visando baixo peso e elevada resistência mecânica.

Um importante diferencial no estudo do comportamento mecânico de compósitos está no fato deste ser ortotrópico (três planos perpendiculares entre si, com propriedades distintas), necessitando de 9 constantes de engenharia em sua matriz constitutiva, ao contrário de aço e

polímeros puros, geralmente considerados isotrópicos, necessitando apenas de duas constantes de engenharia.

No entanto, frequentemente esses materiais são simplificados como transversalmente isotrópicos, inserindo-se um plano de simetria (2-3) sobre a premissa de fibras igualmente espaçadas nas direções 2 e 3 (arranjo quadrado), com propriedades mecânicas diferenciadas apenas no sentido de orientação das fibras (1), normal aos outros dois [1]. A Equação (5) expressa a equação constitutiva de tais materiais através de cinco elementos  $C$  compondo a matriz constitutiva  $\mathbf{C}$ .

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Devido a suas propriedades mecânicas, compósitos de carbono/epóxi vêm ganhando espaço em diversos setores da indústria, principalmente em setores de alta responsabilidade estrutural como óleo & gás e indústria aeroespacial. Suas temperaturas máximas de operação são superiores a maioria dos compósitos poliméricos, variando entre 300 °C e 500 °C, tendo alta resistência química e à fadiga, porém elevado custo (superior a \$20/kg) [42]. Possuem resistência mecânica específica (razão entre resistência e peso) até cinco vezes superior ao aço e módulo de elasticidade longitudinal de aproximadamente 181 GPa [1]. Seu desempenho mecânico é comparado com outras fibras na Figura 9. As desvantagens comumente encontradas em compósitos avançados incluem as baixas temperaturas de operação e altos coeficientes de expansão térmica e higroscópica [1].

Uma importante aplicação para esse material foi proposta por Meyer [4]. Ele analisou o máximo *span* suportado por uma ponte sustentada por cabos de tal material e sugeriu que cabos de CFRP podiam ser empregados em pontes suspensas devido à sua elevada resistência mecânica e à corrosão. Para exemplificar, a Figura 10 mostra cabos de aço em estado avançado de corrosão na ponte do Brooklyn, EUA.

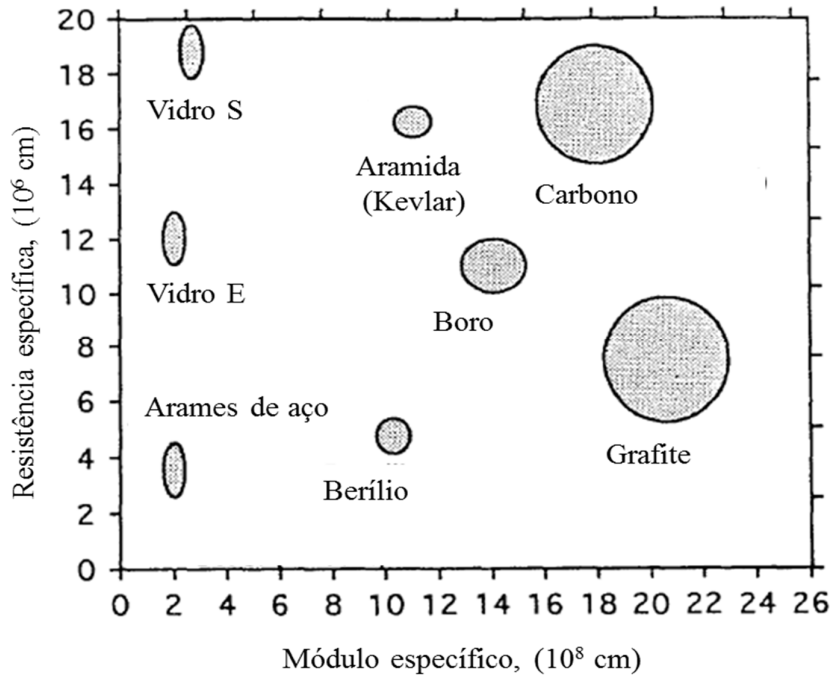


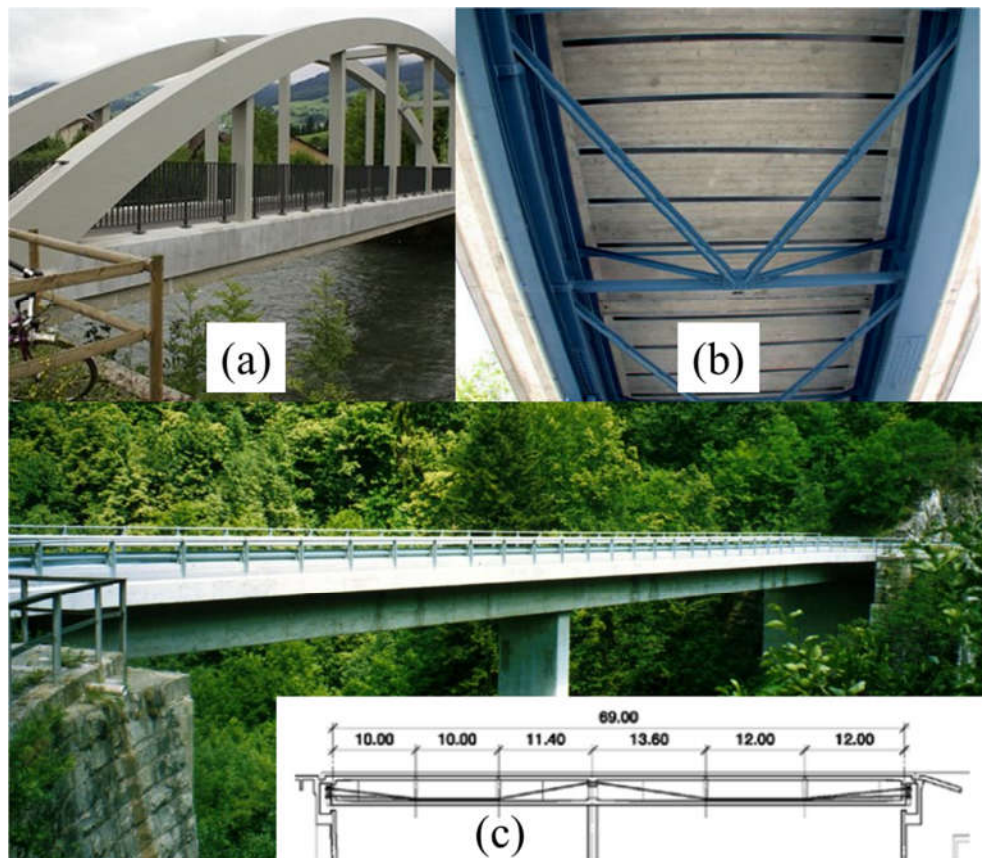
Figura 9 – Gráfico comparando propriedades específicas de diversos reforços [41].



Figura 10 – Cabos de aço corroídos na ponte de Brooklyn, EUA [43].

Meyer [4] conclui que, enquanto uma ponte de aço suportaria um *span* de 7,7 km, a mesma ponte se construída com cabos de CFRP suportaria 37,5 km. Outra importante característica estrutural é a velocidade de propagação de trincas, que é consideravelmente inferior em materiais compósitos quando comparada com aços. No entanto, cabos de CFRP são

menos resistentes às erosões oriundas do vento e aos ataques por radiação ultravioleta, o que poderia ser resolvido encobrendo-se o material com uma camada protetora de polietileno. Seu custo inicial de implantação seria consideravelmente maior, mesmo assim, a partir de 1991, cabos de aço deteriorados começaram a ser substituídos por cabos de CFRP, como nas pontes de Ibach, Oberriet e Verdasio, mostradas na Figura 11(a) e (c) [5].



*Figura 11- a) Ponte de Ibach (Suiça) [44] b) Ponte de Oberriet (Suiça) [5] c) Ponte de Verdasio (Suiça) [45]*

Na reforma da ponte de Ibach, foi usado um cabo de 6,5 kg, enquanto o equivalente em aço pesaria 175 kg [5]. Em 1997, foi inaugurada a primeira ponte inteiramente feita de material compósito, em Kolding, na Dinamarca, estando até hoje sem sofrer manutenções [46]. As pontes da Figura 11 não apresentam qualquer sinal de degradação nos CFRPs empregados, sendo que no caso da ponte de Oberriet esses materiais foram empregados na forma de vigas, trazendo grande facilidade na montagem devido à redução do peso.



Meyer [5] analisa também o uso de compósitos nos tendões das pontes, propondo o uso de resinas distribuídas conicamente, de forma a minimizar a tensão cisalhante. Meyer [47] também aponta para vantagens logísticas na construção de pontes com tiras de CFRP substituindo vigas de concreto armado. Além de seu peso aproximadamente 30 vezes menor, o manuseio destas tiras durante a construção é consideravelmente facilitado, podendo ser carregadas com a mão. Também estão disponíveis em tamanho ilimitado, não sendo necessárias juntas, e possuem instalação mais rápida, justificando sua escolha na ponte de Oberriet.

Xie *et al.* [48] focou na análise das propriedades dinâmicas de CFRP para aplicação em pontes. Além das vantagens citadas por Meyer [4,47,5], também justificou sua escolha devido à superioridade em relação a aços em aspectos como relaxação e fluência, ressaltando, porém, a dificuldade em formar juntas e sua suscetibilidade ao impacto. A Tabela 1 compara as propriedades mecânicas dos cabos analisados por Xie *et al.* [48].

Tabela 1- Comparação entre cabos de aço e cabos de fibra de carbono. Adaptado de [48].

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_u/\rho$ (Nm/kg)	$E_u$ (GPa)	$E/\rho$ (Nm/kg)	$\sigma_u/E_u$	$R_e$ (%)*	$\epsilon_u$ (%)	CTE (10 <sup>-6</sup> /°C)
CFRP	1,63	2141	1,31×10 <sup>9</sup>	145	8,89×10 <sup>9</sup>	0,016	0,3	1,7	0,6
Aço	7,85	1570	2×10 <sup>8</sup>	196	2,50×10 <sup>9</sup>	0,008	<2,5	>4	12

\* após 1000 horas

Cai e Aref [49] apresentaram um algoritmo genético para otimização de uma ponte híbrida com cabos de aço e de carbono visando maximizar a resistência ao *flutter*. Foi sugerido pelos pesquisadores o uso de CFRP nos cabos mais longos e aço nos mais curtos, já em relação à tensão, o aço foi preferido nos cabos que suportavam maior carga.

Motoyama *et al.* [50] também destacou as propriedades mecânicas, baixo peso e resistência à corrosão de cabos CFRP, além de ser não-magnético, visando aplicação na indústria aeroespacial para lançamento de satélites. Eles analisaram cabos compósitos helicoidais 1×7 de 3 mm de diâmetro por fio, com 68 % de fração volumétrica de fibras de carbono inseridas em resina epóxi. Através de ensaios de tração em diferentes velocidades de carregamento, foi constatado que o comportamento era aproximadamente linear para baixas velocidades (0,0001 m/s), o que não ocorreu em taxas de deslocamento elevadas (4 m/s). Embora a deformação na ruptura de 1,35 % no teste estático e a absorção de energia tenham



aumentado com o aumento na taxa de deslocamento, a carga de ruptura, que era de 114,5 kN caiu aproximadamente 15 %. O valor da deformação de ruptura obtido no cabo 1×7 assemelha-se ao reportado por Motoyama [51] ao tracionar somente a alma dos cabos. Foi também observado que todos os fios do cabo rompiam de forma quase instantânea ao atingir-se a carga de ruptura. Para a soquetagem dos cabos, foi utilizado um cimento expansivo nas extremidades, comumente empregado na engenharia civil no ensaio de rochas [50].

Jackson *et al.* [52] analisaram resistência e módulo de elasticidade de cabos compósitos comerciais reforçados por diversos tipos de fibra, focando na aplicação para ancoragem de unidades para perfuração de poços de petróleo em alto mar. A viabilidade da aplicação de cabos compósitos em estruturas *offshore* como plataformas petrolíferas vem crescendo nos últimos anos devido ao aumento na profundidade dos novos poços de petróleo, cuja evolução ao longo dos anos é ilustrada na Figura 12. A Figura 13 mostra o resultado da análise de Jackson *et al.* [52], onde os três cabos reforçados por fibras de carbono, Leadline e NACC da empresa Mitsubishi Plastics e CFCC da Tokyo Rope apresentaram melhor desempenho.

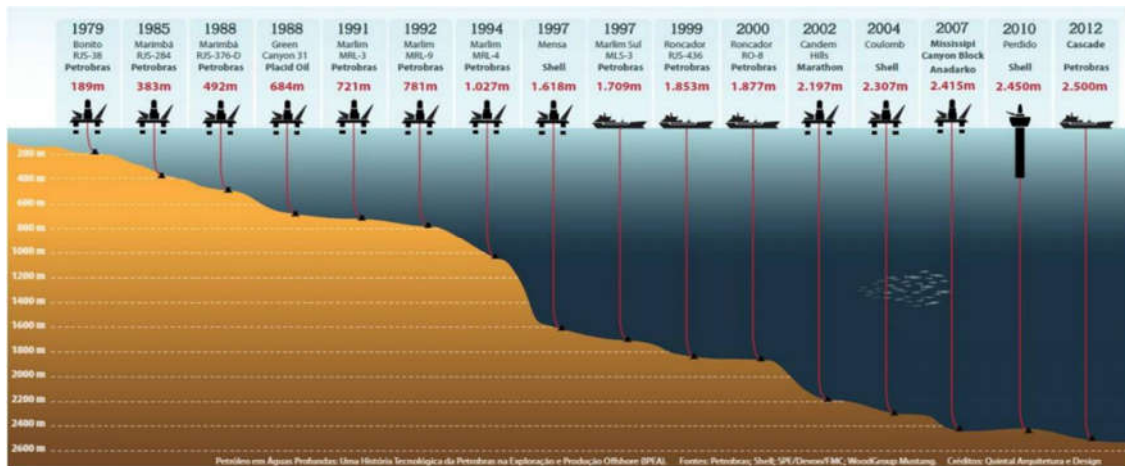


Figura 12 – Evolução da profundidade de extração de petróleo de 1979 a 2012 [53]

Ainda focando em aplicações em estruturas *offshore*, Odrú e Geffroy [54] analisaram o uso de cabos pultrudados em plataformas do tipo TLP (*Tension Leg Platform*), comumente empregada em águas ultra-profundas e ancorada através de cabos, como mostra a Figura 14. Foram executados testes de fadiga, onde após 2,1 milhões de ciclos a 45 % da carga de ruptura em tração, nenhum defeito pode ser visualmente detectado. Sparks *et al.* [55] também executou testes de fadiga em cabos CFRP a 17 %, 25 % e 45 % da carga de ruptura e constatou que a carga de ruptura se manteve inalterada após a ciclagem.

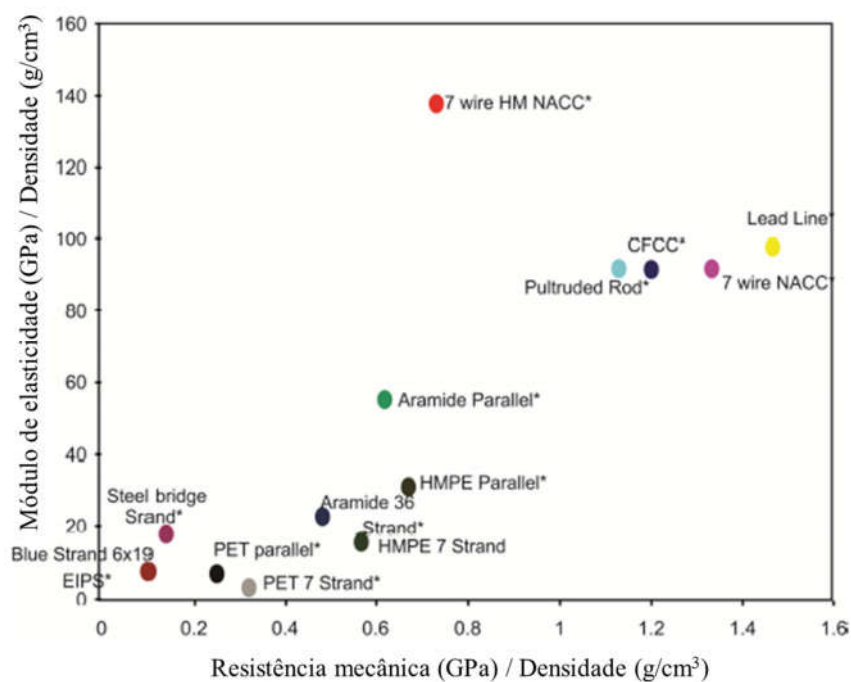


Figura 13 – Comparação entre módulo de elasticidade e resistência mecânica específicos de cabos de diferentes materiais. Adaptado de [52].

Outro fator que qualifica cabos CFRP para aplicações *offshore* é sua lenta degradação em águas salobras. Ali *et al.* [56] analisou o envelhecimento desse material quando submerso em soluções contendo hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e hidróxido de cálcio por 7000 h e obtiveram perda de apenas 7 % na resistência mecânica em tração.

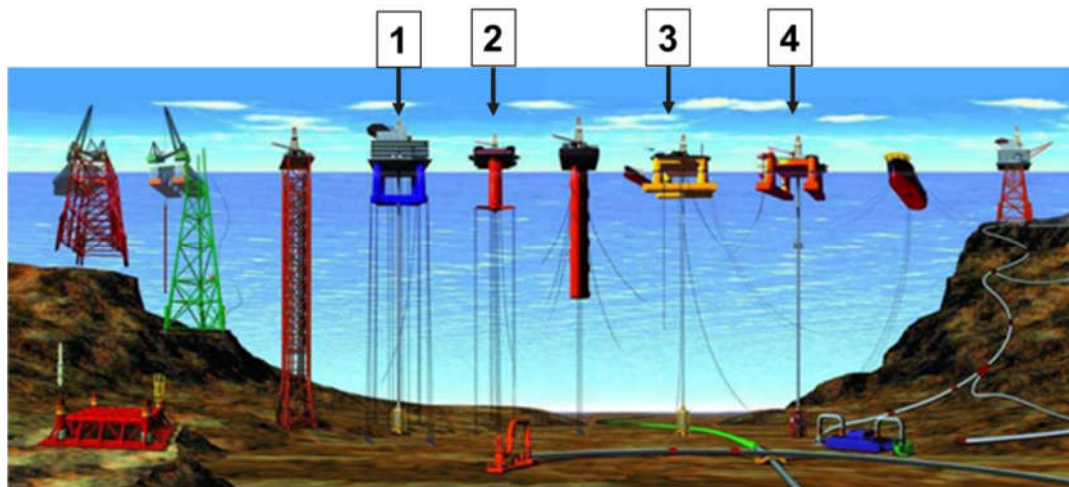


Figura 14- Plataformas TLP (1 e 2) e semissubmersíveis (3 e 4) ancoradas através de cabos. Adaptado de [57].

Em relação à fixação de cabos CFRP, a baixa resistência mecânica transversal limita sua aplicação em ambientes de alto pré-tensionamento [58]. Para corrigir tal problema, Jung e Park [59] compararam a tensão de ruptura de cabos CFRP sem tratamento superficial com a de cabos que sofreram tratamento superficial, onde a resina foi deteriorada na extremidade e as fibras abertas, de forma a aumentar a superfície de contato entre o cimento de soquetagem e o cabo. Como resultado, foi obtido um aumento na tensão de ruptura de 349 MPa para 1022 MPa, e o cabo deixou de falhar na extremidade e falhou no seu comprimento. Wang *et al.* [58] validou seu modelo em FE da interface entre o cabo e o componente da transferência de carga, para em seguida otimizar a geometria do soquete, chegando a uma forma cônica afunilando-se com ângulo de 7°. Dessa forma, foi possível minimizar o esforço da tensão compressiva transversal, aumentando assim a eficiência de ancoragem.

Outra interessante aplicação para cabos CFRP é proposta por Santos *et al.* [60], que analisaram diferentes resinas reforçadas por fibras de carbono para aplicação em cabos condutores de corrente elétrica para propiciar um considerável incremento na separação de postes proporcionada pelo uso de cabos mais leves. Pode-se concluir que, das resinas analisadas, a de epóxi foi a única capaz de prevenir a corrosão galvânica devido ao contato com o alumínio, mantendo a estabilidade térmica em 200 °C.

Uma importante propriedade de cabos CFRP foi constatada por McNally e Pötschke [61], que buscavam projetar um cabo retardante de chama alternativo aos tradicionais polímeros reforçados com alumínio, principalmente por este segundo tipo exigir uma fração mássica acima de 60 % de alumínio. Os pesquisadores verificaram um retardo significativo na propagação de chamas em cabos reforçados com 2-6 % (fração mássica) de MWCNT (nanotubos de carbono de paredes múltiplas) em conjunto com EVA (acetato-vinilo de etileno).

Embora haja uma infinidade de soluções analíticas para cabos helicoidais, não existem hoje soluções analíticas disponíveis para cabos anisotrópicos na literatura. Pan [62] apresentou uma abordagem para fibras curtas transversalmente isotrópicas, que embora careça de validação experimental e despreze o atrito, é um bom começo para a construção de uma solução para compósitos. Em relação ao comportamento em flexão um importante passo foi dado por Crossley *et al.* [63], que elaborou um modelo analítico para materiais transversalmente isotrópicos com a intenção de aplicá-lo a materiais compósitos, considerando passo constante, fios perfeitamente unidos ou sem atrito e fios comportando-se como cascas cilíndricas. Ainda, segundo o princípio de Saint-Venant, a solução foi aplicável somente longe das extremidades

do cabo, sendo uma delas engastada e a outra submetida a um esforço cortante ou momento. Foi determinada pelos autores a solução analítica para os problemas de flexão simples e flexão sobre carregamento uniforme, não apresentando, entretanto, qualquer comparação com resultados experimentais ou numéricos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Cabos compósitos helicoidais de geometria  $1 \times 10$ , cuja seção transversal é mostrada na Figura 15, foram adquiridos de um fabricante nacional, que os produziu com fibras de carbono Toray T300 embebidas em resina epóxi MY750. O diâmetro  $D$  da alma é 3,66 mm, o diâmetro  $d$  dos fios é 1,82 mm, e o passo  $p$  é de 84 mm.

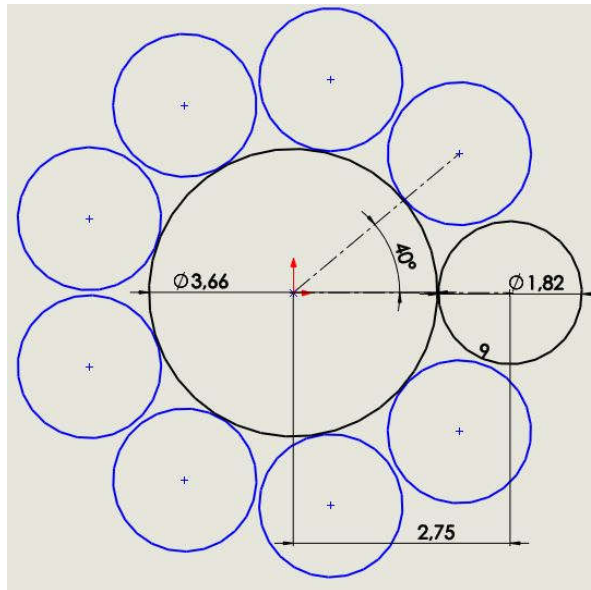


Figura 15 – Seção transversal do cabo  $1 \times 10$  analisado.

Foram ensaiados três grupos de amostras, em um deles, com cinco amostras, a alma foi retirada dos cabos e tracionada, em outro grupo de cinco amostras, o cabo inteiro foi tracionado e o último grupo, também de cinco amostras, foi submetido ao ensaio de flexão em quatro pontos. As amostras tracionadas foram soquetadas utilizando o cimento expansivo Bristar 150 (tensão expansiva superior a 30 MPa), evitando rupturas precoces próximas à região de fixação. Todos os fios foram revestidos com uma camada de PET para proteção, e os ensaios foram realizados com esse revestimento.

### 3.2 Ensaios de tração na alma e no cabo

Amostras das almas dos cabos com 505 mm de comprimento (sendo 100 mm soquetado em cada extremidade) e 3,54 mm de diâmetro médio foram ensaiadas em tração segundo a norma ASTM D7205, tendo sido instrumentadas com *Strain-gauges* (SGs) da marca KYOWA, modelo KFG-2-120-C1-11, com Gauge Factor de  $2,13 \pm 1 \%$ , deformação máxima de 5 %, comprimento de 2 mm e resistência de  $120,2 \pm 0,2 \Omega$ , a fim de mensurar a deformação. As amostras foram primeiramente lixadas e limpas com álcool, para então ser fixado o SG com uma cola fornecida pelo fabricante. Foram coletados dados de carga e deformação a uma taxa de 10 Hz, e foi adotada uma velocidade de ensaio de 5 mm/min.

A partir dos valores da deformação em função da carga, foi avaliado o módulo de elasticidade longitudinal do material ( $E_1$ ), onde, para este fim, foram utilizados apenas dados coletados no “terço médio” da curva de Força vs. deformação, evitando assim a influência de perturbações iniciais oriundas da fixação, bem como de distorções próximo à ruptura. A Figura 16 ilustra o ensaio realizado na máquina MTS 370.10, onde o SG foi fixado paralelamente ao fio, de forma a capturar sua deformação longitudinal. Como mencionado por Motoyama *et al.* [50], os fios ensaiados individualmente exibem a mesma deformação que a alma dos cabos, o que sugere que o critério de falha da máxima deformação possa ser utilizado para a predição da ruptura do cabo completo a partir de ensaios na alma.

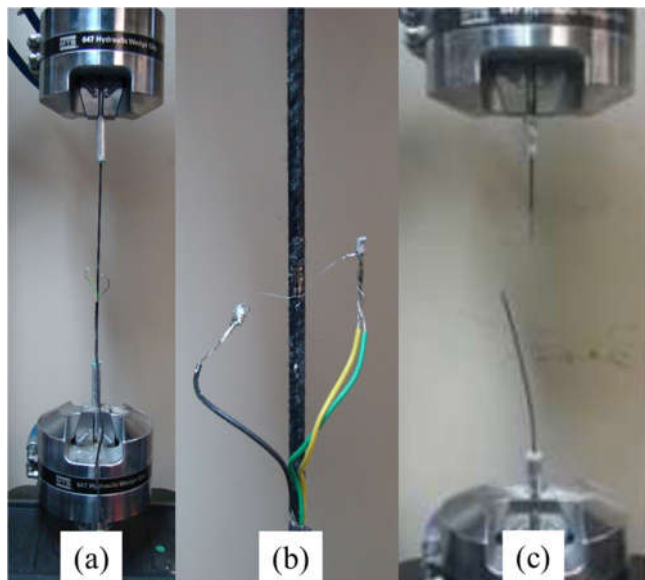


Figura 16 – (a) Ensaio de tração na alma. (b) Strain-gauge em detalhe, fixado paralelo ao cabo. (c) Alma rompida.

Em seguida foram executados os ensaios de tração no cabo em equipamento Instron 3382, seguindo a norma JSCE-E 531-1995, específica para cabos reforçados por fibras de carbono em tração soqueteados com cimento. Foram utilizados dois SGs por amostra, fixados novamente na alma, próximo do centro do cabo, obtendo-se novamente a deformação em função da carga aplicada a uma taxa de aquisição de 10 Hz. O comprimento dos cabos foi superior a 40 vezes o diâmetro nominal (280 mm livre e mais 250 mm em cada soquete), e a carga foi aplicada a uma taxa de 1,2 mm/min com pre-carga de 100 N. A Figura 17 mostra o arranjo deste ensaio.



*Figura 17 - Ensaio de tração em cabo 1×10 instrumentado com dois SGs.*

### **3.3 Ensaio de dobramento no cabo**

Para a caracterização do comportamento mecânico do cabo CFRP em dobramento foi utilizado o ensaio de flexão em quatro pontos baseado na norma ASTM D6272-10, que engloba polímeros reforçados por fibras em flexão de quatro pontos. A distância entre os dois apoios inferiores é estipulada pela norma de, no mínimo, 16 vezes o diâmetro nominal, então adotou-se o valor de 110 mm, onde a distância entre os pontos de aplicação da força utilizada equivale à metade do comprimento do cabo, distante de  $L/4$  das extremidades, onde  $L$  é o comprimento

do cabo entre os apoios (110 mm), sendo o comprimento total acrescido de aproximadamente 20 mm em cada lado.

O deslocamento foi medido no ponto de maior valor, ou seja, no centro do cabo, pelo equipamento Micro-Epsilon Messtechnik através da emissão de raio laser posicionado abaixo deste, como mostra a Figura 18. O ensaio foi realizado no equipamento Instron 3382 a uma velocidade de 2,92 mm/min, sendo o cabo flexionado até que o deslocamento vertical ultrapassasse o valor de seu diâmetro nominal (7 mm).



*Figura 18 – Ensaio de flexão em quatro pontos no cabo CFRP.*

### **3.4 Modelo numérico via FEM**

O cabo foi modelado, tanto em tração quanto em dobramento, com auxílio do *software* Abaqus®, utilizando o método de Newton para buscar a convergência. Por apresentar maior manutenção de sua orientação inicial e menores distorções, foi utilizado o elemento hexaédrico linear elástico anisotrópico para as simulações, cujo nome no programa é C3D8R, de integração reduzida (um ponto de integração apenas). Embora houvesse a não-linearidade oriunda do atrito entre os fios do cabo, empregou-se elementos de primeira ordem por terem apresentado convergência mais rápida nos dois casos analisados neste trabalho.

O modelo foi alimentado com  $E_1$  obtido experimentalmente, onde o subscrito 1 se refere à direção paralela ao cabo, enquanto as direções 2 e 3 fazem referência às direções transversais



a ele. Porém, devido à anisotropia do material analisado, uma vez que as fibras no interior dos fios estão orientadas longitudinalmente e ligeiramente torcidas, é necessário obter mais constantes de engenharia. Sobre a premissa de isotropia entre os planos perpendiculares à orientação da fibra (planos 1-2 e 1-3), o material pode ser idealizado como transversalmente isotrópico, fazendo-se uso da teoria micromecânica proposta por Chamis, que contempla fibras anisotrópicas, como a de carbono, fornecendo também os valores de  $G_{23}$  e  $\nu_{23}$ . As Equações (5-9) propostas por Chamis [64] permitem a determinação das outras constantes de engenharia necessárias para a modelagem do cabo, onde o  $V_f$  utilizado foi de 57,5 %, determinado a partir do valor de  $E_1$ , utilizando a lei das misturas mostrada na Equação (4). Tais equações partem da premissa de comportamento elástico do compósito, matriz isotrópica, perfeita adesão entre fibra e matriz, fibras perfeitamente alinhadas e isotropia nas direções transversais à orientação da fibra, assumida como perfeitamente alinhada e contínua. As propriedades da fibra foram obtidas do fabricante e de Kaddour e Hinton [65], e as da matriz a partir de Barbero [42] e Kaddour e Hinton [65].

$$E_1 = E_{f,11}V_f + E_mV_m \quad (4)$$

$$E_2 = E_3 = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \left( 1 - \frac{E_m}{E_{f,22}} \right)} \quad (5)$$

$$G_{12} = G_{13} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left( 1 - \frac{G_m}{G_{f,12}} \right)} \quad (6)$$

$$G_{23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left( 1 - \frac{G_m}{G_{f,23}} \right)} \quad (7)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{12,f}V_f + \nu_mV_m \quad (8)$$

$$\nu_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1 \quad (9)$$

Para que as constantes elásticas permanecessem orientadas ao longo do comprimento do cabo, foi inserido um sistema de coordenadas local 1-2-3 para cada elemento da malha, mostrado na Figura 19, que exibe também o sistema de coordenadas global X-Y-Z. Este sistema permitiu que as propriedades variassem à medida que os fios giravam ao redor do núcleo, o que não aconteceria se fosse utilizado o sistema de coordenadas global.

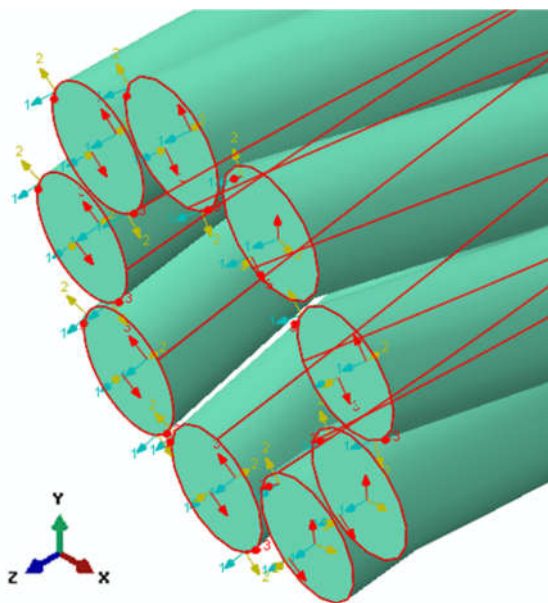


Figura 19 – Sistema de coordenadas local (1-2-3) vs. Sistema de coordenadas global (X-Y-Z).

Para modelagem do atrito entre fios adjacentes e entre os fios e a alma foi inserido contato na direção normal através do método de penalidade, que causa um aumento no trabalho virtual no caso de violação nas condições de contato. O valor da penalidade foi calculado pelo programa, cujo valor normalmente é uma ordem de grandeza superior à deformação do elemento em contato. Um *gap* de 0,01 mm foi inserido entre os fios e a alma, como mostra a Figura 15, de forma a evitar penetrações logo nos primeiros incrementos das simulações, garantindo também fechamento do contato e travamento na malha, já que o contato foi inserido área-área. Para o coeficiente de atrito tangencial, foi inserido o valor determinado por Luz *et al.* [66] através de teste de rampa, sendo 0,6 para fibras de carbono.

Em relação às condições de contorno no caso de tração do cabo, uma extremidade foi engastada e a outra permitia apenas o deslocamento na direção Z livre, sendo a rotação do cabo restrita em todos os três eixos, como ocorre no experimento. A força foi aplicada na extremidade com deslocamento longitudinal livre, e distribuída na face do cabo, onde é medido o deslocamento durante a simulação, conforme mostra a Figura 20(a).

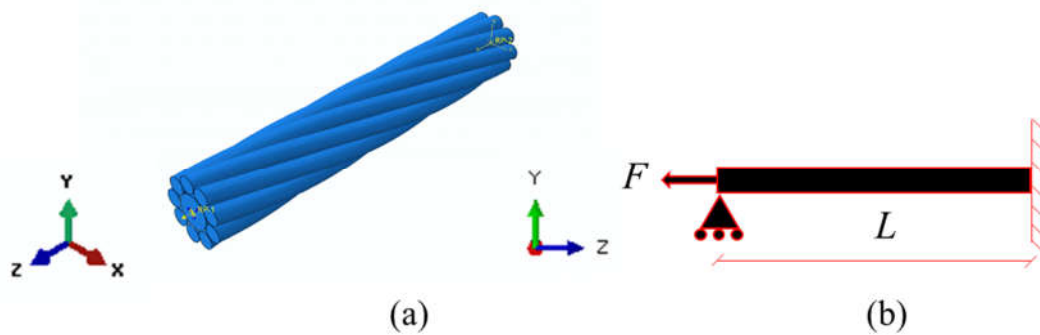


Figura 20 – Aplicação da carga e condições de contorno simulando o ensaio de tração.

Nas simulações de dobramento, o deslocamento em Z também foi restrito apenas em uma extremidade, mas a rotação em torno do eixo X era livre em ambas as extremidades, enquanto os demais graus de liberdade eram restritos. A força foi aplicada diretamente nos nós, sendo distribuída entre vários deles para evitar concentração de tensões, como apresentado na Figura 21(a). O deslocamento vertical nesta simulação é medido na alma do cabo em um ponto distante 55 mm dos apoios. Embora não seja nos fios externos, como no experimento, a escolha desse ponto deve-se à ausência de rotação, que poderia alterar esse valor.

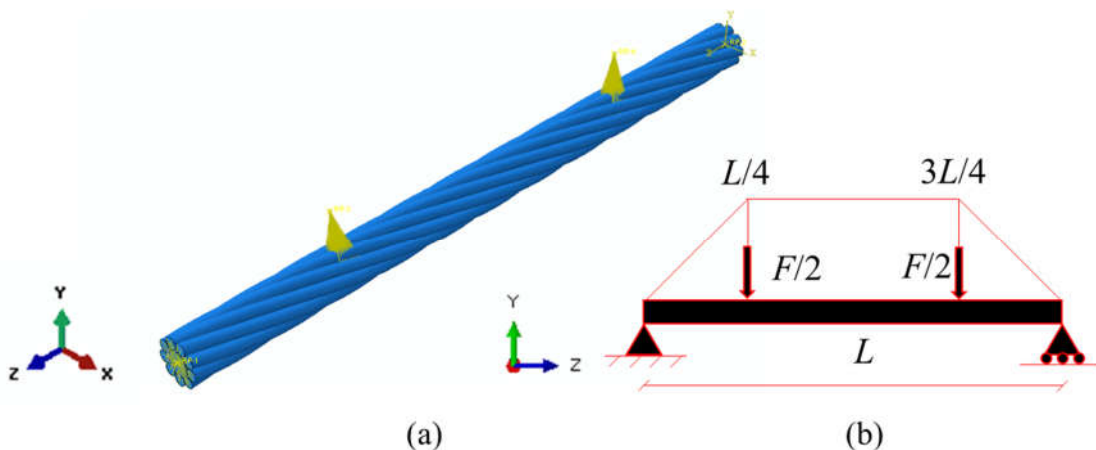


Figura 21 - Aplicação da carga e condições de contorno simulando ensaio de flexão em quatro pontos.

O modelo numérico foi submetido à carga de ruptura obtida experimentalmente, para então ter sua deformação confrontada com a medida pelos SGs. A semelhança entre a deformação da alma isolada e a dos cabos foi observada por Motoyama [50], e devido à ausência

de tensões significativas nas direções transversais e de cisalhamento, o critério da máxima deformação se torna adequado para o problema em análise. No caso das simulações em dobramento, foram comparados os valores do carregamento quando o deslocamento na direção Y atinge um valor igual ao diâmetro nominal do cabo.

Foi feita uma análise de sensibilidade para determinar o número de elementos necessários para a correta reprodução do comportamento do cabo, visando manter um tempo computacional baixo para que o processo iterativo da posterior calibração não fosse demasiadamente longo. No caso das simulações em tração, foi investigado também o comprimento do cabo a ser simulado de forma a evitar o efeito das pontas, conforme alertado por Erdomez *et al.* [19].

### **3.5 Calibração do modelo numérico**

A necessidade de calibrar o modelo numérico criado surge devido a diversos fatores que acabam por torná-lo impreciso, como o já citado efeito das pontas. Também, o cabo foi considerado homogêneo, negligenciando-se as relações entre a interface fibra-matriz em seu interior. As equações da micromecânica propostas por Chamis [67], assim como as demais teorias micromecânicas, costumam diferir dos valores obtidos experimentalmente, mesmo algumas delas sendo semi-empíricas, onde parte disso se deve à imprecisão nas propriedades individuais da fibra e matriz utilizadas nos cálculos. Mikkelsen *et al.* [68] analisou o erro proveniente da mensuração de deformações em materiais compósitos poliméricos através de SGs, e concluiu que, para baixos módulos de elasticidade (5 GPa), pode-se chegar a um erro de até 10 %, que diminui conforme aumenta a rigidez do material.

Embora o coeficiente de atrito entre carbono provenha de análises experimentais, uma camada de PET reveste os cabos, o que altera esse valor. Este coeficiente também é de difícil predição devido ao pré-tensionamento entre os fios oriundos de seu processo de fabricação, a pultrusão, que como qualquer outro processo de fabricação de materiais compósitos, acaba deixando um certo teor de vazios no interior do cabo, impactando assim suas propriedades mecânicas. Quaisquer outros defeitos provenientes da manufatura do cabo também são invisíveis ao modelo numérico, como o excesso de resina observado na Figura 22



*Figura 22 - Amostra do cabo 1×10 mostrando excesso de resina oriundo de sua fabricação.*

A premissa de comportamento elástico também agrega erros, uma vez que, ao contrário da fibra de carbono, a resina epóxi apresenta deformação plástica próximo de sua ruptura [69]. No entanto, como a deformação de ruptura da fibra é inferior à da resina, espera-se que tal influência não seja significativa. No caso particular do ensaio de flexão em quatro pontos, há uma variação na posição e no ângulo de contato entre os apoios inferiores não contempladas pelo modelo numérico, pois a inserção de dois pares de contatos adicionais gerados pelo acréscimo do dispositivo de flexão dificultaria consideravelmente a convergência.

Por fim, conforme explicado anteriormente, métodos numéricos consistem de aproximações idealizadas do problema real, gerando erros numéricos, como truncamento, e erros na malha. Os erros na malha ocorrem principalmente devido a distorções nos elementos e a efeitos não-lineares presentes nas simulações, como o contato entre os fios, pois polinômios de primeiro grau foram utilizados para reproduzir efeitos de comportamento de ordem desconhecida.

Para determinação das variáveis que seriam incluídas no processo de calibração, foi realizada uma análise de sensibilidade com o objetivo de determinar quais eram as variáveis relevantes, para em seguida implementar o algoritmo de minimização da função erro variando-se conjuntamente as variáveis escolhidas através da análise de sensibilidade. Em relação ao algoritmo de minimização, foi utilizada a função *fmincon* no programa Matlab<sup>®</sup>, que minimiza a função erro, expressa pela Equação (10), onde  $u$  refere-se ao deslocamento na direção  $Y$  do ensaio de dobramento, e  $\varepsilon$  à deformação no caso da tração. Trata-se portanto de um processo de otimização multiobjetivo escalonado, podendo-se atribuir “pesos” à parcela que corresponde à diferença entre valores medidos e simulados em tração através de  $K_1$  (adimensional), e à

parcela correspondente à diferença entre valores observada em flexão através de  $K_2$  (adimensional).

$$Erro = K_1 \frac{(\varepsilon_{numérico} - \varepsilon_{experimental})^2}{(\varepsilon_{experimental})^2} + K_2 \frac{(u_{numérico} - u_{experimental})^2}{(u_{experimental})^2} \quad (10)$$

Mediante esta equação é possível obter valores normalizados para o erro nos dois casos, e assim o erro em tração e dobramento terão o mesmo peso na função objetivo. O algoritmo utiliza o já descrito método da região de confiança, onde em cada região a função objetivo é aproximada por uma função quadrática  $q(s)$  definida pelos três primeiros termos da série de Taylor [70], mostrada na Equação (11), como utilizado por Nocedal e Wright [35].

$$\min q(s) = s^T \nabla f + \frac{1}{2} s^T H s \quad \text{tal que} \quad \|s\| \leq \Delta \quad (11)$$

Onde  $H$  é a Hessiana de  $f$  (derivadas parciais de segunda ordem),  $s$  é o incremento dentro da região e  $\Delta$  é o raio da região. Um algoritmo para a determinação do raio escolhido é proposto por Nocedal e Wright [35], de forma que ele aumente somente quando  $s$  atingir o contorno da região. Como no caso aqui analisado a dependência da função objetivo não é expressa em função das variáveis de projeto, o algoritmo estima a derivada da função objetivo para calcular os próximos incrementos, não calculando o terceiro termo da série por exigir a derivada segunda, tornando então a Equação (11) linear

O fluxograma mostrado na Figura 23 ilustra o procedimento adotado no processo de calibração. Primeiramente é escrita uma rotina em Matlab<sup>®</sup> responsável por escrever o arquivo a ser lido pelo Abaqus<sup>®</sup> com as variáveis de entrada, que consistirão na estimativa inicial para o processo de otimização. Em seguida, o arquivo com os dados de entrada é lido pelo Abaqus<sup>®</sup>, que a partir deles modela via FEM o cabo solicitado em tração, produzindo posteriormente um arquivo de saída com o deslocamento mensurado na extremidade livre. Após isso, o programa é executado novamente, mas desta vez com a simulação de dobramento, escrevendo um arquivo de saída com o deslocamento vertical mensurado no ponto central da alma do cabo em seu comprimento médio.

Calculando-se então a deformação em tração a partir do deslocamento, pode-se utilizar a Equação (10) para determinar o erro, função objetivo do processo de otimização, o que é feito pelo Matlab<sup>®</sup> após ler os outputs gerados pelo Abaqus<sup>®</sup>. Caso o algoritmo detecte a presença de um mínimo local, ou caso a perturbação nas variáveis de entrada gere uma diferença na

função objetivo inferior à tolerância ( $1 \times 10^{-6}$ ), ele é encerrado. Caso contrário, os dados de entrada sofrem atualizações determinados pelo algoritmo e iniciam uma nova iteração.

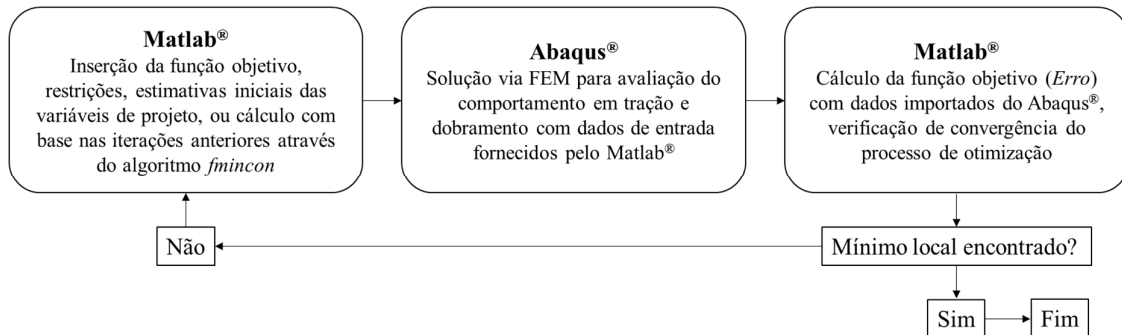


Figura 23 - Fluxograma adotada para realizar a calibração dos modelos numéricos.

Com a finalidade de não destoar significativamente da realidade, os *inputs* eram modificados em no máximo  $\pm 5\%$ , em passos de no mínimo  $0,1\%$  por iteração. Tais restrições eram inseridas no algoritmo na forma de limites inferiores e superiores, sendo elas normalizadas para evitar problemas de condicionamento, uma vez que se trata de um problema de múltiplas variáveis com diferentes ordens de grandeza.

Dessa forma, o procedimento de otimização pode ser resumido de acordo com as Equações (14-15).

$$\min \text{ Erro}(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (12)$$

sujeito a

$$lb \leq x_i \leq ub \quad (13)$$

onde  $x_i$  são as variáveis cujo valor será ajustado para que a deformação de tração e deslocamento de dobramento reproduzam com acurácia os resultados experimentais,  $lb$  é o limite inferior ( $-5\%$ ) e  $ub$  o limite superior ( $+5\%$ ).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados experimentais

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de tração das cinco amostras de alma analisadas, reportando o valor de  $E_1$  e  $\epsilon_u$ . A partir de  $E_1$ , foram determinadas as demais constantes de engenharia com auxílio das Equações (6-10) para uso nas simulações, sendo essas reportadas na Tabela 3 juntamente com as propriedades da fibra e da matriz utilizadas.

*Tabela 2 - Resultado dos ensaios de tração executados na alma dos cabos.*

	<b>Força de ruptura (kN)</b>	<b><math>\epsilon_u</math> (%)</b>	<b><math>D</math> (mm)</b>	<b><math>E_1</math> (MPa)</b>
<b>Amostra 1</b>	19,9	1,73	3,33	149800
<b>Amostra 2</b>	19,7	1,47	3,76	116400
<b>Amostra 3</b>	18,0	1,75	3,50	140600
<b>Amostra 4</b>	17,0	1,65	3,63	135300
<b>Amostra 5</b>	18,6	1,43	3,47	140600
<b>Média</b>	18,6	1,61	3,54	136500
<b>Desvio padrão</b>	1,2	0,13	0,16	12600

*Tabela 3 - Propriedades da fibra, matriz e do compósito resultante.*

	<b>Fibra de carbono Toray T700</b>	<b>Epóxi MY750</b>	<b>Compósito resultante</b>
<b><math>E_1</math> (MPa)</b>	234500	3350	136500
<b><math>E_2=E_3</math> (MPa)</b>	14120	3350	7946
<b><math>G_{12} = G_{13}</math> (MPa)</b>	14700	1240	4057
<b><math>G_{23}</math> (MPa)</b>	6418	1240	3194
<b><math>\nu_{12} = \nu_{13}</math></b>	0,246	0,350	0,290
<b><math>\nu_{23}</math></b>	0,100	0,350	0,244

### 4.2 Análise de sensibilidade

A Figura 24 mostra, para quatro diferentes comprimentos de cabo, o valor da deformação obtido e o tempo computacional de cada simulação. Verifica-se que, para um comprimento igual à metade do passo do cabo, é possível obter um resultado satisfatório com baixo tempo computacional.



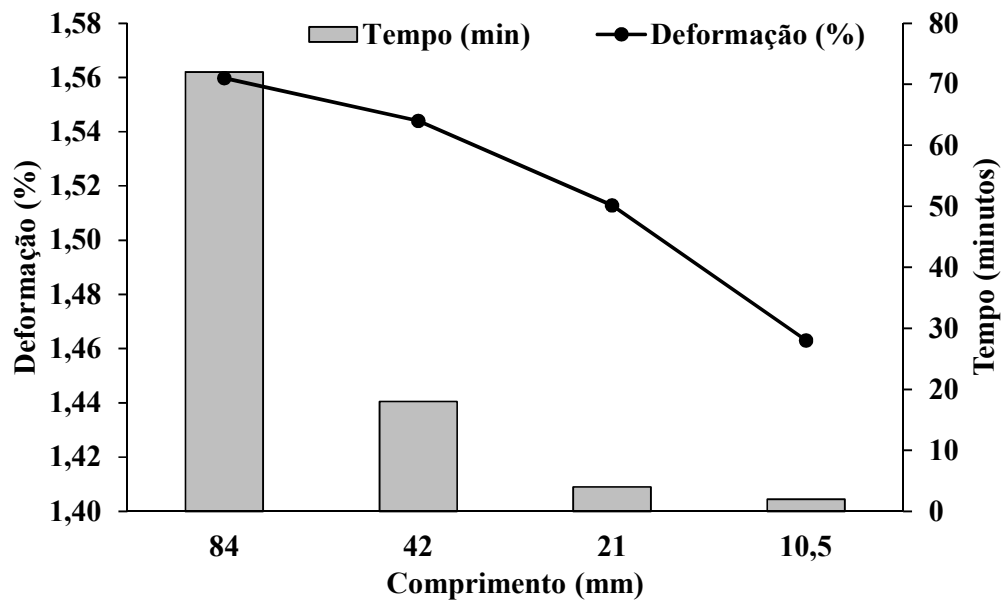


Figura 24 - Deformação (linha contínua) e Tempo (barras) para diferentes comprimentos de cabos simulados em tração.

Prosseguiu-se então para uma análise de convergência de malha a fim de verificar a convergência do modelo e minimizar o custo computacional. A Figura 25 e a Figura 26 mostram o resultado das análises para tração e dobramento, respectivamente, bem como uma ilustração das malhas. No caso da tração, uma malha de 26908 nós (20327 elementos hexaédricos lineares) foi adotada, já no dobramento, a malha escolhida possuía 39318 nós (27103 elementos hexaédricos lineares). Os refinamentos foram feitos até que a diferença entre o resultado apresentasse divergência inferior a 1 %, optando-se por utilizar uma configuração mais refinada para evitar problemas de convergência na etapa de calibração posterior.

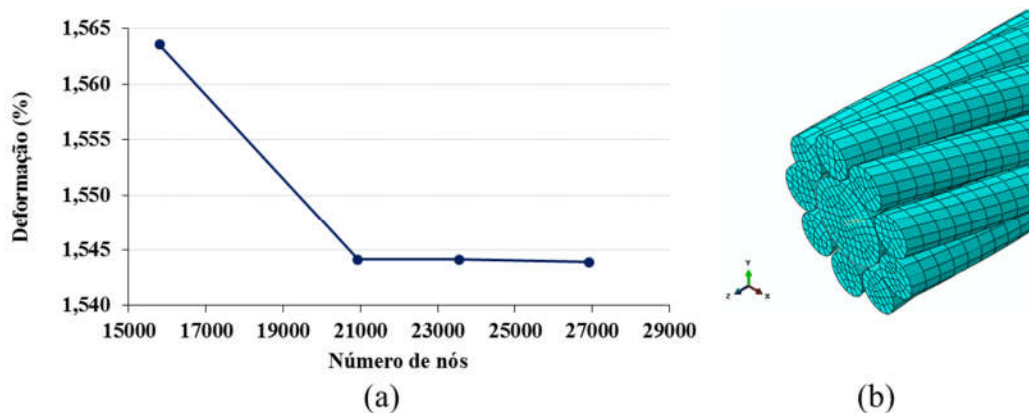


Figura 25 – Simulação de tração: a) Análise de convergência de malha e b) Imagem da configuração escolhida (26908 nós).

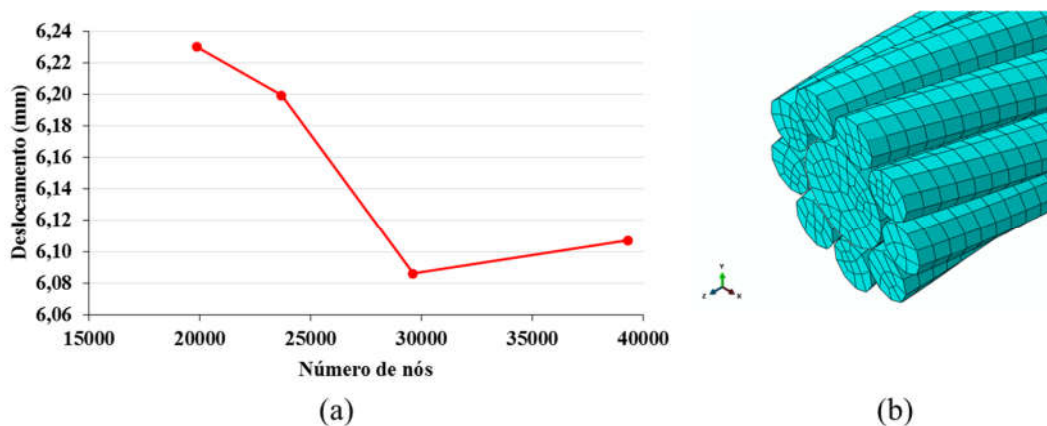


Figura 26 - Simulação de dobramento: (a) Análise de convergência de malha e b) Imagem da configuração escolhida (39318 nós).

A partir do comprimento e das malhas escolhidos, deu-se início ao processo de análise de sensibilidade, onde as variáveis foram testadas individualmente, cujo valor de variação dependeu do grau de influência apresentado. Os gráficos a seguir mostram, no eixo X, a alteração no valor da variável, e no Y o valor simulado. A Figura 27 mostra os resultados obtidos para variação de  $\pm 20\%$  no valor de  $E_1$ , que apresentou influência semelhante nos dois casos, fazendo a resposta em tração variar de  $19,1\%$  para  $-18,7\%$ , e em dobramento de  $18,9\%$  para  $-18,7\%$  em relação ao valor inicial de deformação e deslocamento, respectivamente.

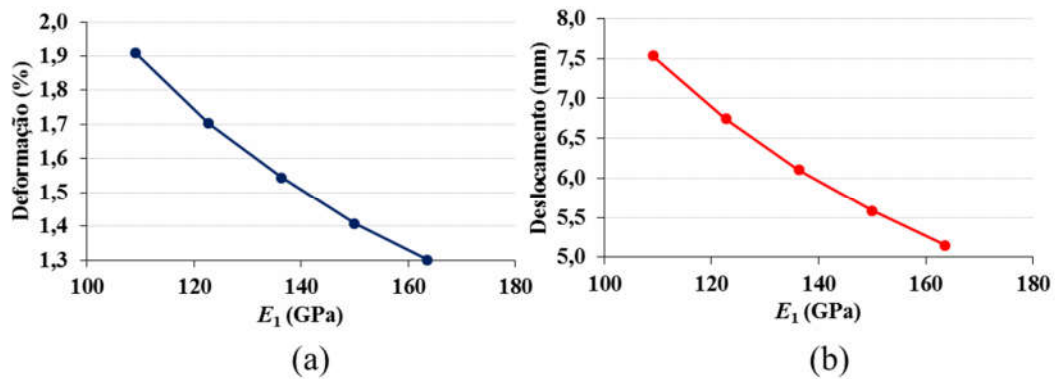


Figura 27 – Mudança no comportamento do cabo com a variação do módulo de elasticidade longitudinal  $E_1$  em tração (a) e dobramento (b).

A influência apresentada pelos módulos de elasticidade transversais mostrada na Figura 28 foi bem mais discreta. O comportamento variou menos de 2 % para uma variação do valor desses módulos de -50 % a 50 % do valor inicial em ambos os casos.

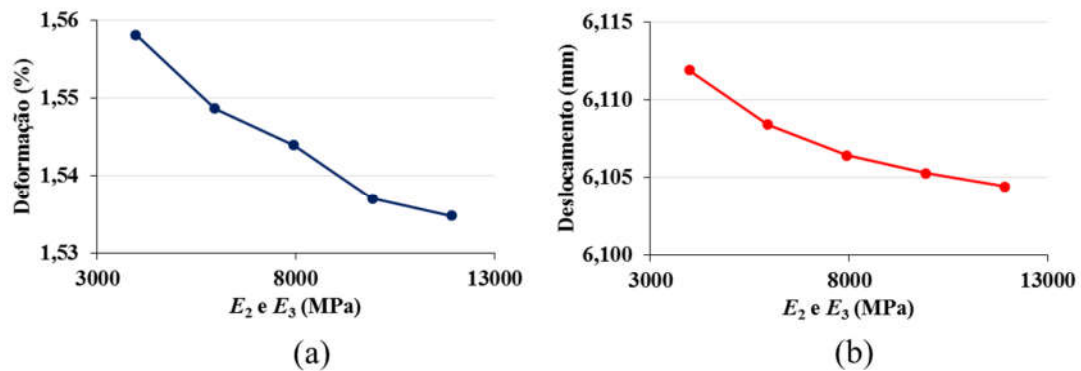


Figura 28 - Mudança no comportamento do cabo com a variação dos módulos de elasticidade transversais  $E_2$  e  $E_3$  em tração (a) e dobramento (b).

Os coeficientes de Poisson foram variados de 0,0 a 0,9, como mostram as Figura 29- Figura 30. Também se observou uma influência discreta por parte de  $\nu_{12}$  e  $\nu_{13}$ , principalmente em dobramento, onde a influência dentro do espaço analisado foi inferior a 1 %, enquanto que em tração foi de 5,6 %. O valor de  $\nu_{23}$  alterou em menos de 1 % a resposta do cabo para ambos os casos, tornando o cabo mais rígido em tração, ao contrário do que aconteceu com  $\nu_{12}$  e  $\nu_{13}$ .

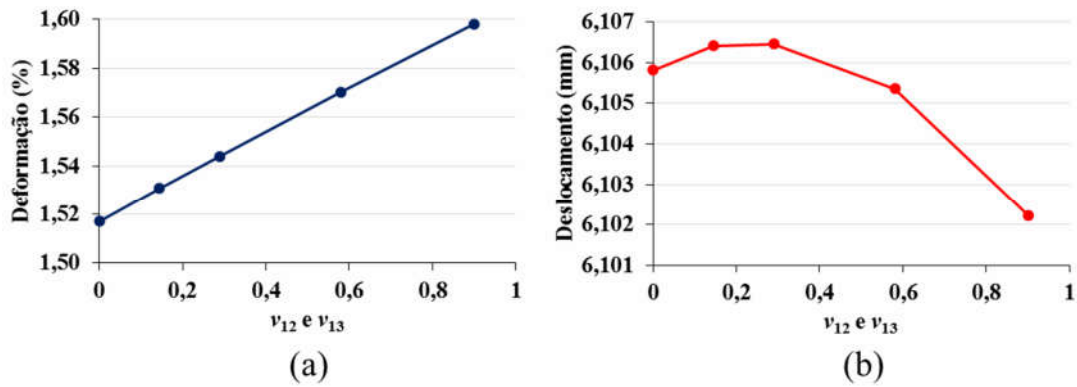


Figura 29 – Mudança no comportamento do cabo com a variação dos coeficientes de Poisson  $\nu_{12}$  e  $\nu_{13}$  em tração (a) e dobramento (b).

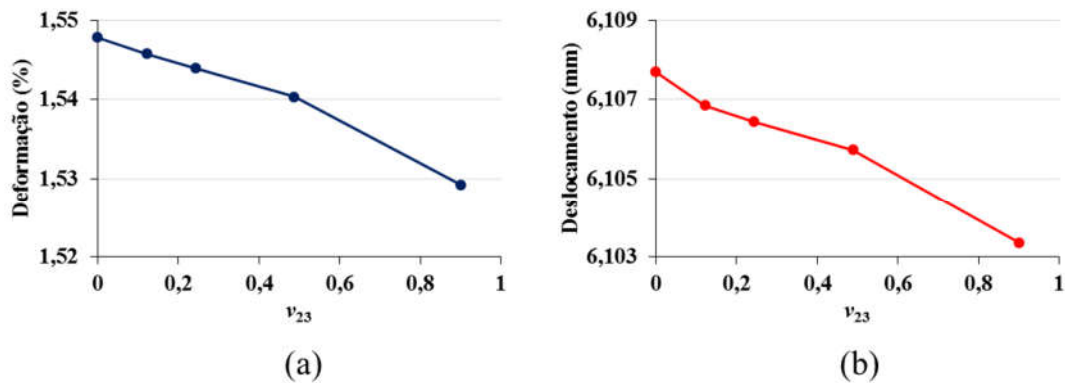


Figura 30 – Mudança no comportamento do cabo com a variação do coeficiente de Poisson  $\nu_{23}$  em tração (a) e dobramento (b).

A Figura 31 mostra a mudança na resposta do cabo ao sofrer variação de  $\pm 50\%$  no módulo de cisalhamento  $G_{12}$  e  $G_{13}$ , e nota-se uma influência expressiva apenas se seu valor é demasiadamente reduzido, alterando a deformação em 12,8 % no modelo de tração e 4,0 % no modelo de dobramento. Considerando a divergência em seu valor através das teorias da micromecânica (2619 MPa pela lei das misturas, 3707 segundo solução proposta por Halpin e Tsai descrita em [1] e 3581 segundo Kaw [1]), seu valor, ao contrário das demais constantes de engenharia, pode ter agregado um erro não desprezível à solução. O valor de  $G_{23}$  também sofreu variação de  $\pm 50\%$ , como mostra a Figura 32, sendo a alteração inferior a 1 % em ambos os casos.

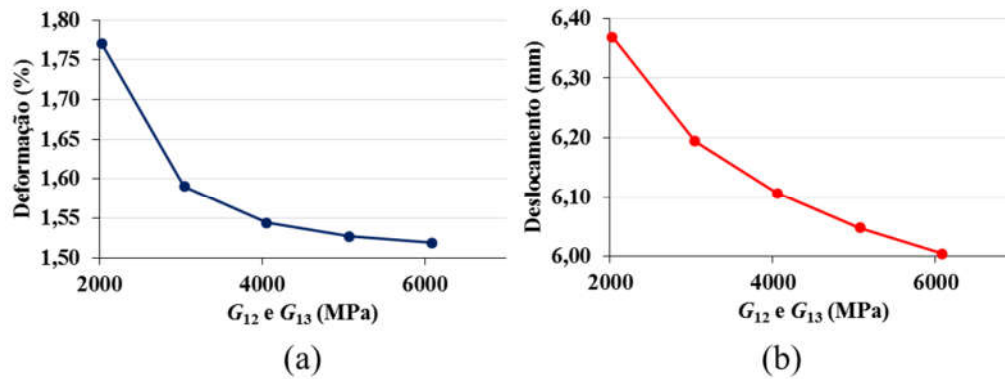


Figura 31 - Mudança no comportamento do cabo com a variação dos módulos de cisalhamento  $G_{12}$  e  $G_{13}$  em tração (a) e dobramento (b).

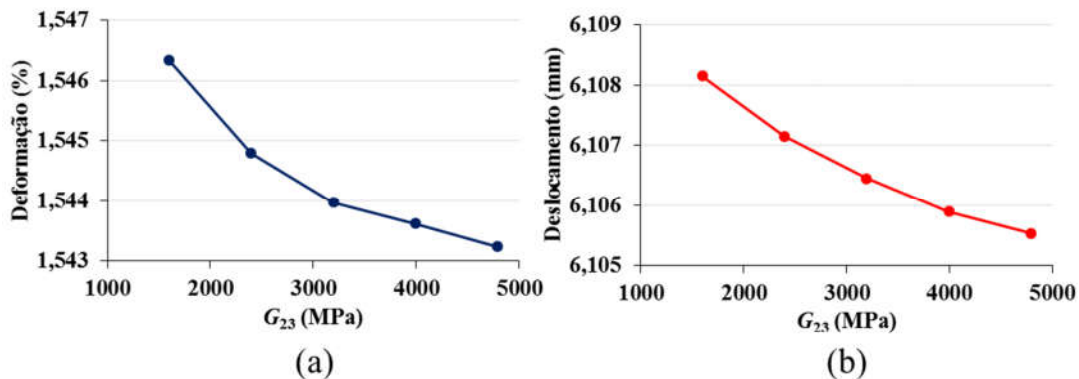


Figura 32 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do módulo de cisalhamento  $G_{23}$  em tração (a) e dobramento (b).

A influência do coeficiente de atrito foi avaliada variando-o de 0,0 a 1,0, e foi verificada uma alteração linear no deslocamento no caso do dobramento. Para o caso de tração, sua influência foi desprezível para valores acima de 0,3, como mostra a Figura 33, o que está de acordo com a análise feita por Erdomnez e Imrak [19].

Foi também simulada a condição de fios “colados” uns aos outros, hipótese assumida por diversas soluções analíticas. Foi determinado um valor de deformação de 1,47 % em tração (4,8 % inferior ao valor avaliado para um coeficiente de atrito de 0,6), enquanto que na simulação de dobramento, devido à expressiva diferença no momento de inércia ocasionada pela união dos fios, o valor obtido para o deslocamento foi de apenas 1,26 mm (386,4 % inferior ao valor avaliado para um coeficiente de atrito de 0,6). Na condição onde não foi inserido qualquer tipo

de contato entre os fios a deformação em tração foi 26,4% superior ao valor do modelo original, enquanto que o deslocamento na simulação em dobramento destoou em apenas 2,86%.

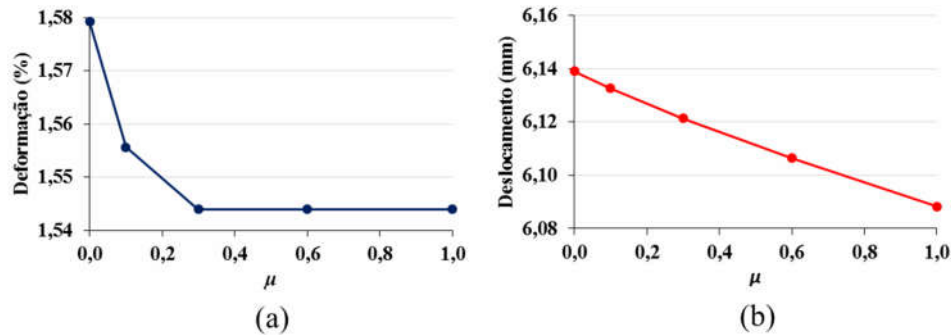


Figura 33 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do coeficiente de atrito  $\mu$  em tração (a) e dobramento (b).

A Figura 34 (a) mostra, em escala de cores, a pressão provocada, em MPa, pelos fios sobre a alma no ensaio de tração, enquanto a Figura 34 (b) mostra a seção transversal do comprimento médio do cabo submetido à tração, onde observa-se o pequeno grau de penetração gerado entre os fios, constatando-se assim o uso de um fator de penalidade adequado para as simulações aqui realizadas. Um acréscimo em seu valor geraria menores penetrações, porém dificultaria o processo de convergência do modelo. A influência do passo foi marcante em ambos os casos, tendo este variado de -50 % até uma configuração de perfil reto (fios não mais torcidos em torno da alma, e sim extrudados de forma retilínea).

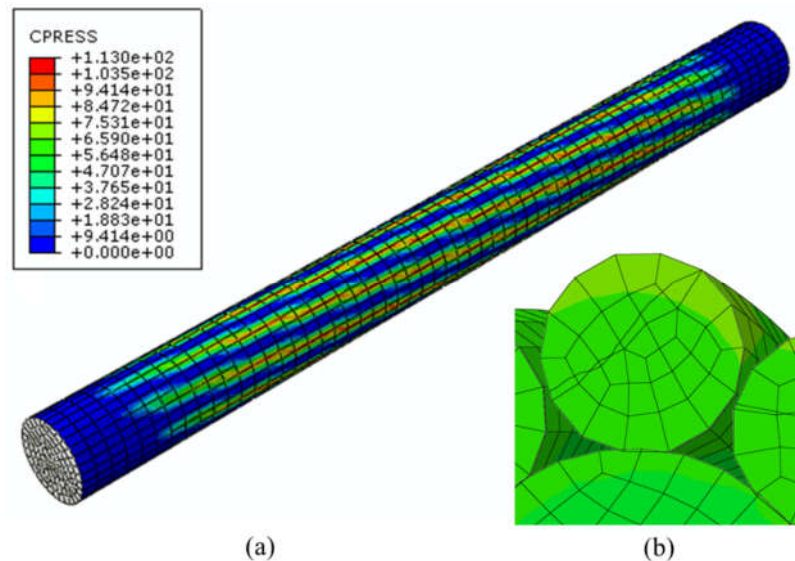


Figura 34 - Pressão devido ao contato dos fios que circundam a alma do cabo após este ser tracionado (a) e penetração desenvolvida no interior do cabo (b).

No entanto, como mostra a Figura 35, onde são plotadas as deformações (caso de tração) e deslocamentos (caso de dobramento) em função do inverso do passo, a influência é bastante não-linear. No caso da tração, a redução de 50 % em seu valor fez com que o cabo deformasse 29,7 % mais, enquanto que na configuração reta houve redução na deformação de 16,3 %. No dobramento, a região de maior variação é oposta, o deslocamento aumentou 10,1 % e diminuiu 231,9 % na hipótese de fios retos. Em termos da relação passo/diâmetro, o comportamento em tração cai drasticamente para valores abaixo de 9, enquanto em dobramento perdas de flexibilidade significativas ocorrem para relações acima de 15.

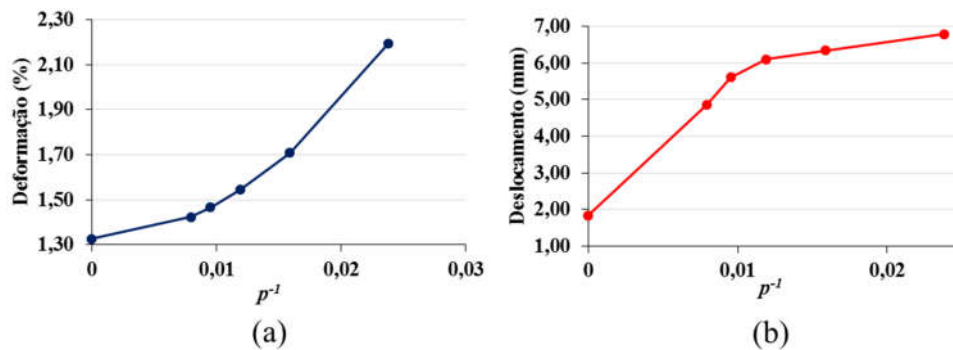


Figura 35 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do inverso do passo  $p$  em tração (a) e dobramento (b).

O diâmetro dos fios e da alma foi variado em  $\pm 10\%$ , sendo bem acentuada a alteração provocada no comportamento em tração e dobramento, como mostra a Figura 36. No caso da tração, a deformação variou de 16,9 % para -17,4 % de seu valor inicial. Já no caso do dobramento, a diferença foi mais expressiva devido à relação da flexão com o momento de inércia, passando de 33,6 % para -48,8 %.

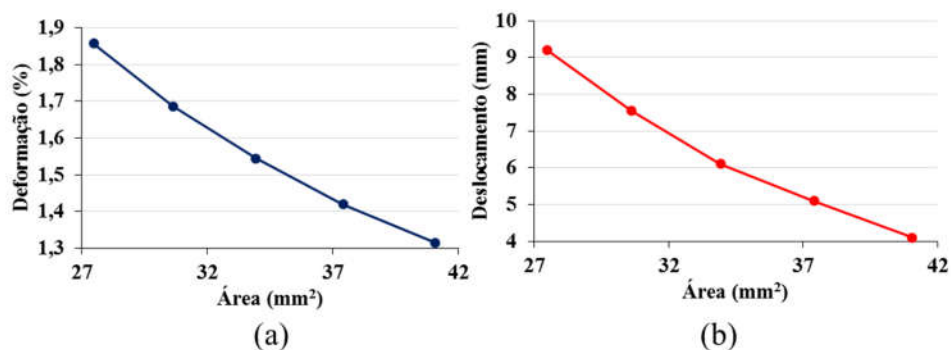


Figura 36 - Mudança no comportamento do cabo com a variação do diâmetro dos fios em tração (a) e dobramento (b).

Analisando os gráficos mostrados nas Figura 27-Figura 33, Figura 35 e Figura 36 observa-se que, tanto no caso de tração quanto para dobramento, o problema mostrou-se muito sensível a alterações nos valores de  $E_1$ ,  $p$ ,  $D$  e  $d$ . As constantes  $G_{12}$  e  $G_{13}$  mostraram-se relevantes apenas após expressiva redução em seu valor no caso da tração, e o coeficiente de atrito e as demais constantes de engenharia pouco afetaram o comportamento mecânico do cabo nos casos analisados. Sendo assim, optou-se por incluir no processo de calibração apenas as variáveis de projeto  $E_1$ ,  $p$  e os diâmetros  $D$  e  $d$ . Os diâmetros dos fios foram acoplados em uma única variável no interior do algoritmo, que variava de 0,95 a 1,05 ( $\pm 5\%$ ), e multiplicava os valores de  $D$  e  $d$ , possibilitando uma variação conjunta e proporcional entre eles e evitando colisões entre fios externos. A escolha de apenas três variáveis se deve às razões apontadas por Friswell e Mottershead [17] citadas anteriormente e ao elevado custo computacional que teria a adição de mais variáveis.

### 4.3 Calibração

Para a comparação entre resultados numéricos e experimentais no procedimento de calibração foi considerado apenas o valor final por ser o ponto de maior diferença entre as duas abordagens, o que se deve ao reduzido nível de não-linearidade nos modelos. A Figura 37 mostra os resultados obtidos em tração para o cabo  $1 \times 10$  com as simulações numéricas, onde os valores das cargas e deformações na ruptura são comparados na Tabela 4, com um erro na deformação de ruptura média de  $-9,9\%$ . É possível observar que a não-linearidade inicial, presente possivelmente devido à acomodação da região de contato, se faz presente de forma mais acentuada no modelo numérico, fato observado também nos ensaios experimentais de Utting e Jones [14].

Os ensaios experimentais dos cabos evidenciaram ruptura frágil, ilustrada pela Figura 38, rompendo na alma e em diversos fios de forma quase simultânea, como relatado por Motoyama *et al.* [50]. A semelhança entre a deformação de ruptura na alma ensaiada individualmente e entre o cabo também foi observada, sendo de  $1,61\%$  e  $1,71\%$ , respectivamente.



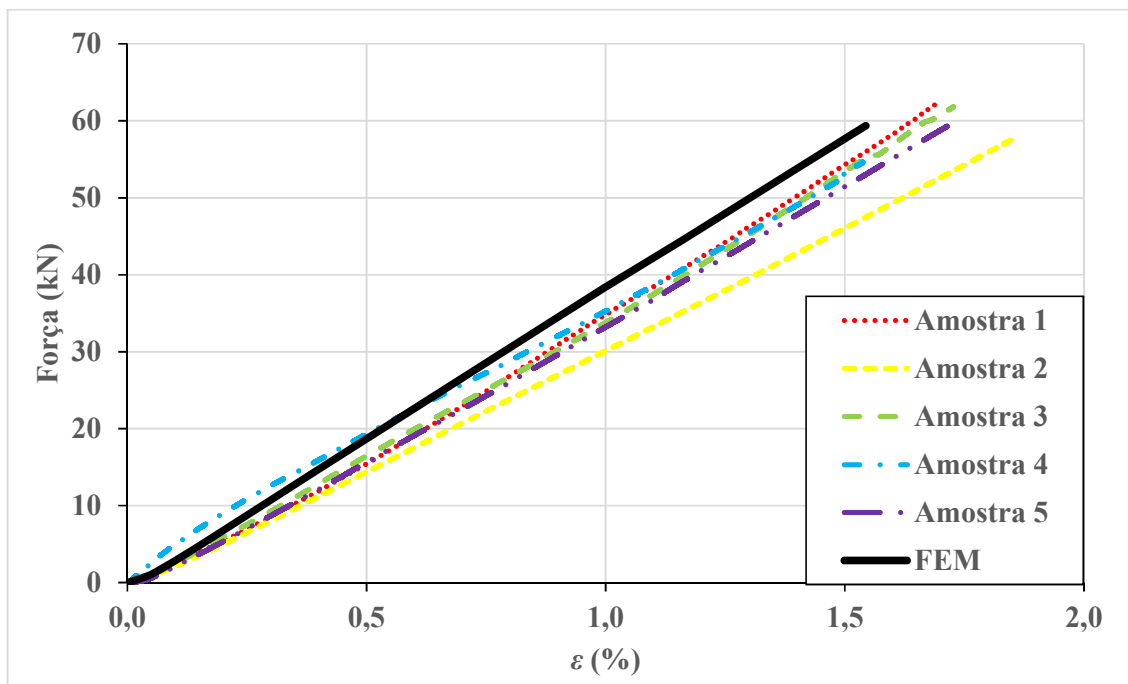


Figura 37 - Comparação das curvas experimentais e numéricas do cabo solicitado em tração.

Tabela 4 - Força e deformação de ruptura dos cabos ensaiados e simulado.

	Força de ruptura (kN)	$\epsilon_u$ (%)
<b>Amostra 1</b>	62,19	1,69
<b>Amostra 2</b>	57,88	1,86
<b>Amostra 3</b>	61,85	1,73
<b>Amostra 4</b>	55,42	1,54
<b>Amostra 5</b>	59,50	1,72
<b>Média</b>	59,37	1,71
<b>Desvio padrão</b>	2,83	0,11
<b>Numérico</b>	59,37	1,54

O comportamento aproximadamente linear em tração apresentado por Motoyama [50], que ensaiou amostras de cabos CFRP de geometria  $1 \times 7$ , foi também observado no presente estudo. No entanto, a deformação de ruptura apresentada pelo autor (1,35 %) foi consideravelmente mais baixa quando comparada com o cabo  $1 \times 10$  aqui analisado, possivelmente devido ao uso de uma diferente fibra de carbono e um menor volume de fibra no compósito.



Figura 38 - Ruptura do cabo 1×10 em tração.

De fato, o modelo numérico apresentou uma maior deformação na alma, como mostrado na escala de cores da Figura 39.

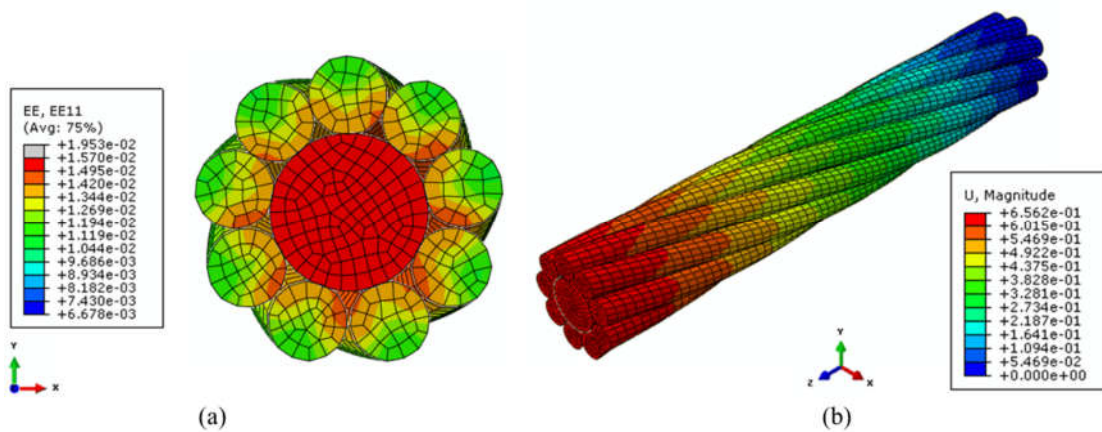


Figura 39 - a) Deformação em escala de cores na seção transversal média do cabo. b) Deslocamento na direção Z do cabo após aplicação da carga.

Os resultados dos ensaios de dobramento, confrontados com as simulações, são mostrados na Figura 40. O valor da força total aplicada no cabo e o deslocamento ao final do ensaio é mostrado na Tabela 5, onde um desvio de -12,7 % no deslocamento após aplicação dessa carga é observado entre os resultados experimentais e o simulado. Uma resposta linear em flexão de cabos foi constatada também nos ensaios de Chen *et al.* [31] de amostra de cabos de aço pré-tensionados, e no modelo numérico de flexão pura de Jiang [30].

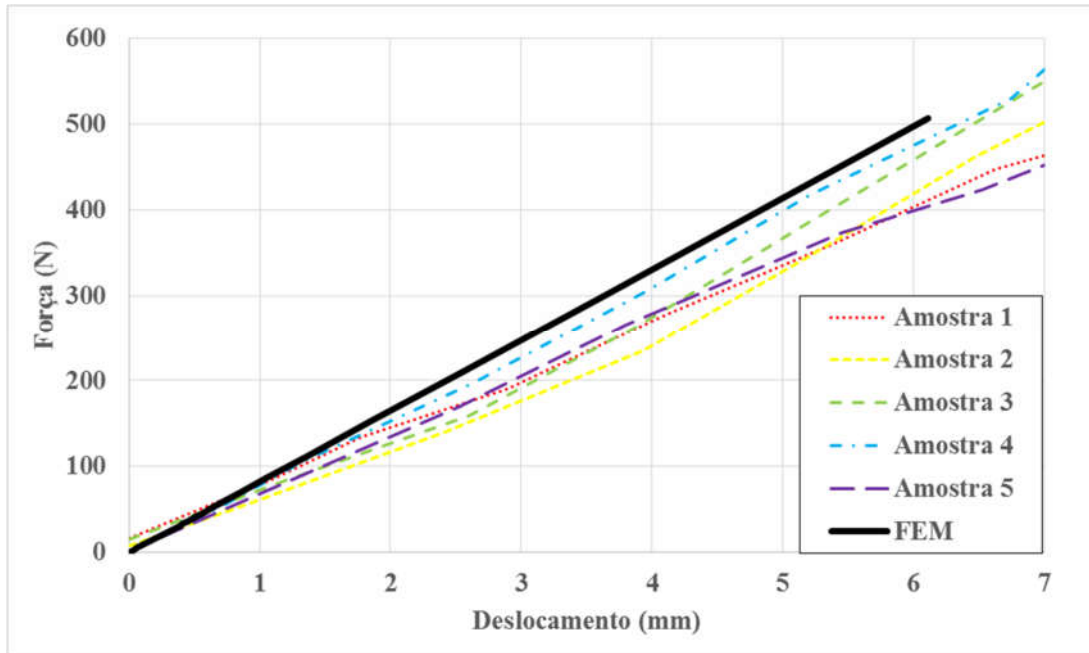


Figura 40 - Resultados de dobramento do cabo 1×10.

Tabela 5 - Comparação entre os deslocamentos experimentados pelo modelo numérico e os valores obtidos em ensaio experimental.

	Força total (N)	Deslocamento vertical (mm)
Amostra 1	464,24	7
Amostra 2	503,12	7
Amostra 3	550,54	7
Amostra 4	563,66	7
Amostra 5	453,11	7
Média	506,94	-
Desvio padrão	49,63	-
Numérico	506,94	6,11

A Figura 41 mostra pequenas penetrações na parte inferior da seção transversal do cabo em flexão, bem como o deslocamento ao longo de seu comprimento, em escala de cores. Pelas razões previamente citadas, o modelo computacional se comportou de forma mais rígida em ambas as simulações, mantendo o erro dentro da faixa esperada. Dessa forma, o processo de calibração deixará o cabo mais flexível alterando as variáveis  $E_1$ ,  $p$  e o diâmetro dos fios.

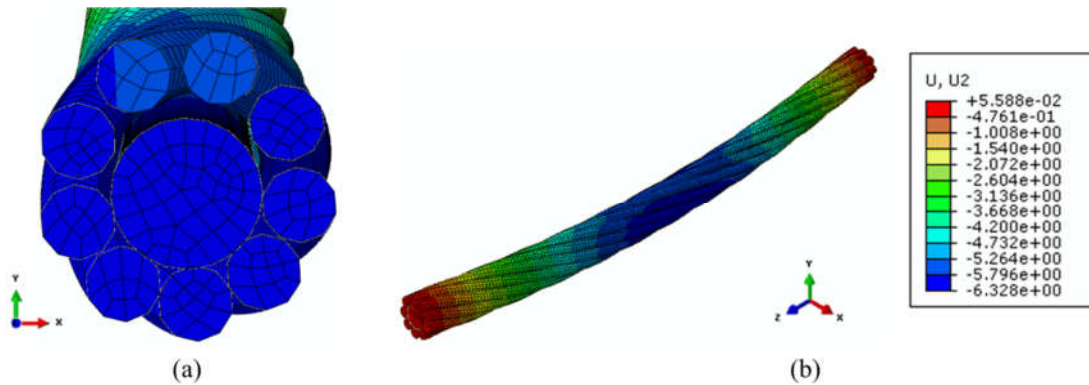


Figura 41 - a) Seção transversal onde o deslocamento é máximo. b) Cabo com deslocamento em escala de cores.

Logo nas primeiras iterações, o valor dos diâmetros foi ajustado para o limite inferior (-5 %), enquanto os valores atualizados de  $E_1$  e  $p$  apresentaram alterações menos expressivas em relação ao seu valor inicial. Não houve violação nas restrições de  $\pm 5$  % durante o processo. A Tabela 6 mostra os valores das variáveis de projeto, bem como de deformação e deslocamento antes e após a calibração, cujo valor final obtido para a função objetivo mostrada na Equação (11) foi de  $8,99 \times 10^{-6}$ , o que é um valor muito pequeno comparado aos  $4,13 \times 10^{-2}$  apresentado na primeira iteração, com os valores originais das variáveis. Assim, pode-se observar a expressiva redução no erro em ambos os casos após o mínimo local determinado pelo processo de otimização, que para problemas convexos coincide com o mínimo global [71].

Tabela 6 - Comparação entre os resultados originais e após o processo de calibração.

	Valor original	Após calibração
$E_1$ (MPa)	136500	132446
$p$ (mm)	84,00	88,00
$D$ (mm)	3,66	3,49
$d$ (mm)	1,82	1,74
$\varepsilon$ (%) - Tração	1,54	1,70
$u$ (mm) - Dobramento	6,11	7,02
Erro tração (%)	-9,9	-0,6
Erro dobramento (%)	-12,7	0,3
Função objetivo ( <i>Erro</i> )	$4,13 \times 10^{-2}$	$8,99 \times 10^{-6}$

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou o comportamento mecânico de cabos CFRP flexão, experimentalmente e numericamente, encontrando divergências de -9,9 % para tração e -12,7 % para flexão. Os erros encontrados foram atribuídos à imprecisão no atrito e ao pré-tensionamento dos fios ao redor do cabo, à estimativa nas constantes de engenharia, ao desconhecimento da relação interface do material e a defeitos de fabricação, já que a resposta numérica se portou de forma mais rígida em ambos os casos. Erros numéricos e de malha no modelo numérico também foram apontados como causa das divergências.

Através da análise de sensibilidade realizada, pode-se notar que as constantes de engenharia,  $\nu_{23}$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  e  $G_{23}$  exercem influência desprezível no comportamento em tração e dobramento do cabo, pois mesmo sofrendo grandes variações em seus valores, pouca foi a diferença experimentada pelo cabo na deformação, no caso da tração, ou no deslocamento, no caso da flexão. Os coeficientes de Poisson  $\nu_{12}$  e  $\nu_{13}$  exerceram influência um pouco mais expressiva, mas dentre as estimativas da micromecânica seu valor varia pouco, de forma que as equações da micromecânica puderam ser usadas para estas seis constantes. Já com relação a  $G_{12}$  e  $G_{13}$ , diferenças significativas, principalmente no comportamento em tração, foram encontradas ao se reduzir pela metade o seu valor, sendo constatado, para esses parâmetros, a importância das estimativas da micromecânica.

O coeficiente de atrito exerce pequena influência em dobramento em uma ampla faixa de valores. Porém, abaixo de 0,1, sua influência em tração causa considerável decréscimo de rigidez, o que desfavorece o uso das soluções analíticas descritas na literatura que consideram fios perfeitamente lubrificados. No entanto, o uso de uma estimativa experimental do seu valor correto, como feito neste trabalho, já é suficiente para eliminar erros significativos.

O módulo de elasticidade longitudinal  $E_1$  foi determinado experimentalmente e exerceu influência expressiva e aproximadamente linear na resposta do cabo em ambos os casos. Já o passo do cabo apresentou derivada consideravelmente diferente nos dois casos, causando uma queda brusca no comportamento em tração quando simulado com valor 50 % menor, e uma perda significativa de flexibilidade nas simulações de dobramento para valor 50 % superior. As dimensões dos fios do cabo foram os parâmetros que mais exerceram influência, tanto em tração quanto em dobramento, devido à sua influência direta na área da seção transversal no caso da tração e ainda no momento de inércia, no caso do dobramento.

Sendo assim, o módulo de elasticidade  $E_1$ , o passo  $p$  e os diâmetros da alma  $D$  e dos fios  $d$  foram as variáveis incorporadas ao processo de calibração que tiveram por objetivo determinar a correção necessária nessas variáveis de entrada para minimizar o erro entre os valores calculados e observados, utilizando para isso um algoritmo de otimização de SLP baseado no método da região de confiança. Após o processo de calibração das simulações de cabos compósitos com comportamento anisotrópico, com incorporação de contato normal e tangencial entre os 10 fios que o cabo possui e aplicação de elemento hexaédrico 3D, foi possível reduzir os erros de tração e de dobramento para -0,6 % e 0,3 %, respectivamente. A função objetivo, que era o quadrado da soma, em tração e dobramento, das diferenças experimentais e numéricas normalizadas, teve seu valor reduzido de  $4,13 \times 10^{-2}$  para  $8,99 \times 10^{-6}$  após o processo de otimização, tornando assim o modelo numérico apto para a predição do comportamento mecânico de CPRFC.

Assim, foi apresentada aqui uma metodologia que permitiu a calibração do modelo numérico para um cabo compósito solicitado em tração e flexão de quatro pontos, dispensando a necessidade de ensaios experimentais caso o cabo sofra alterações geométricas (passo, diâmetro e número de fios). A metodologia aqui proposta pode ser usada no caso de alterações no teor de fibra ou tipo de fibra/resina empregados na construção do cabo, por exemplo, sendo capaz de fornecer valores calibrados para as variáveis relevantes que permitam a coerência entre os valores ensaiados e simulados.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Mensurar experimental através de ensaios de *short-beam* os valores de  $G_{12}$  e  $G_{13}$ , já que estes apresentam efeito não desprezível no comportamento do cabo e as abordagens da micromecânica divergem em relação ao seu valor no compósito estudado.
- Verificar um terceiro caso, utilizando os valores corrigidos pelo processo de calibração, a fim de verificar a consistência da metodologia.
- Aplicar a presente metodologia a cabos isotrópicos metálicos ou poliméricos.
- Usar funções objetivo que apresentem um valor mais balanceado entre o erro em tração e dobramento.



## 7. REFERÊNCIAS

1. KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. 2ª. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
2. BOEING. **BOEING Aeromagazine**, 2006. Disponível em: <[http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html)>. Acesso em: 8 Novembro 2015.
3. COSTELLO, G. A. **Theory of wire rope**. 1ª. ed. New York: Springer-Verlag, 1990.
4. MEIER, U. Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What if? **Arabian Journal for Science Engineering**, v. 37, p. 399-411, 2012.
5. MEIER, U.; BRÖNNIMANN, R.; ANDEREGG, P. Long Term Reliability of CFRPs in Bridge Engineering. **ICCM20**, Copenhagen, 2015.
6. VERREET, R. **A short history of wire rope**. 1ª. ed. Aachen: PR Gmbh, 2002.
7. CABLEMAX - CABOS DE AÇO. Disponível em: <<http://www.cabosdeacocablemax.com.br/cabo-de-aco.html>>. Acesso em: 20 agosto 2015.
8. SLOAN, F.; NYE, R.; LIGGET, T. Improving bend-over sheave fatigue in fiber ropes. **OCEANS 2003 Proceedings**, v. 2, p. 1054-1057, 2003.
9. SHAW'S WIRE ROPES. Disponível em: <<http://www.wireropes.co.nz/wire-rope/wire-information.htm>>. Acesso em: 20 agosto 2015.
10. LUZ, F. F. et al. Analysis of bending and tensile behavior of CFRP stranded and spiral cables using numeric model. **ICCM20**, Copenhagen, 2015.
11. USABIAGA, H.; PAGALDAY, J. M. Analytical procedure for modelling recursively and wire by wire stranded ropes subjected to traction and torsion loads. **International Journal of Solids and Structures**, v. 45, p. 5503-5520, 2008.
12. LOVE, A. **Mathematical Theory of Elasticity**. 1ª. ed. New York: Dover Pub, 1944.
13. ELATA, D.; R. ESHKENAZY, M. W. The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core. **International Journal of Solids and Structures**, v. 41, p. 1157-1172, 2004.
14. UTTING, W. S.; JONES, N. The response of a wire rope strand to axial tensile loads - Part I. Experimental results and theoretical predictions. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 29, p. 605-619, 1987.

15. UTTING, W. S.; JONES, N. The response of wire rope strand to axial tensile loads - Part II. Comparison of experimental results and theoretical predictions. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 29, p. 621-636, 1987.
16. SZABÓ, B.; BABUSKA, I. **Introduction to Finite Element Analysis**. 1<sup>a</sup>. ed. Chichester: Wiley Series on Computational Mechanics, 2011.
17. FRISWELL, M. I.; MOTTERSHEAD, J. E. **Finite Element Model Updating in Structural Dynamics**. Waterloo: Springer, 1996.
18. CAMPOS, M. D. O método dos elementos finitos aplicado à simulação numérica de escoamentos fluidos. **III Bienal da SBM**, 2006.
19. ERDOMNEZ, C.; IMRAK, C. A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads. **Sadhana**, v. 36, p. 995-1008, 2011.
20. ERDOMNEZ, C.; IMRAK, C. Numerical model for an IWRC bending over sheave problem and its finite element solution. **Recent Advances in Computers, Communications, Applied Social Science and Mathematics**, 2011.
21. GHOREISHI, S. R. et al. Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 49, p. 1251-1261, 2007.
22. HRUSKA, F. H. Radial forces in wire ropes. **Wire and wire products**, v. 5, p. 459-463, 1952.
23. MACHIDA, S.; , A. J. D. Response of a strand to axial and torsional displacements. **Journal of Mechanical Engineering science**, v. 15, p. 241-251, 1973.
24. MCCONNELL, K. G.; ZEMEKE, W. P. A model to predict the coupled axial torsion properties of ACSR electrical conductors. **Journal of Experimental Mechanics**, v. 22, p. 237-244, 1982.
25. KUMAR, K.; JR, J. E. C. Closed-form analysis for elastic deformations of multilayered strand. **ASME Journal of Applied Mechanics**, v. 54, p. 898-903, 1987.
26. RAMSEY, H. A theory of thin rods with application to helical constituent wires in cables. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 30, p. 559-570, 1988.
27. SATHIKH, S.; MOORTHY, M. B. K.; KRISHNAN, M. A symmetric linear elastic model for helical wire strands under axisymmetric loads. **Journal of Strain Analysis**, v. 31, p. 389-399, 1996.
28. LABROSSE, M. Contribution à l'étude du rôle du frottement sur le comportement et la durée de vie des câbles monocouches. **Ecole Centrale de Nantes, France**, 1998.

29. ARGATOV, I. Response of a wire rope strand to axial and torsional loads: Asymptotic modeling of the effect of interwire contact deformations. **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, p. 1413-1423, 2011.
30. JIANG, W. A concise finite element model for pure bending analysis of simple wire strand. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 54, p. 69-73, 2011.
31. CHEN, Z. et al. Experimental research on bending performance of structural cable. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 279-288, 2015.
32. RIBEIRO, D. et al. Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. **Engineering Structures**, v. 40, p. 413-435, 2012.
33. VIÑUELA, J. Z.; CASTELLANOS, J. L. P. The anisotropic criterion of von Mises (1928) as a yield condition for PMMCs. A calibration procedure based on numerical cell-analysis. **Composite Structures**, v. 134, p. 613-632, 2015.
34. MISHRA, A. K.; CHAKRABORTY, S. Development of a finite element model updating technique for estimation of constituent level elastic parameters of FRP plates. **Applied Mathematics and Computation**, v. 258, p. 84-94, 2015.
35. NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization**. New York: Springer, 1999.
36. HAFTKA, R. T.; GURDAL, Z. **Elements of Structural Optimization**. 3<sup>a</sup>. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992.
37. YUAN, Y. A review of trust region algorithms for optimization. **Proceedings of the Fourth International Congress on Industrial and Applied Mathematics**, p. 1-12, 1999.
38. CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **An Introduction to Structural Optimization**. Waterloo: Springer, 2009.
39. CHEU, T.; WANG, B. P.; CHEN, T. Design Optimization of Gas Turbine Blades with Geometry and Natural Frequency Constraints. **The American Society of Mechanical Engineers**, p. 1-6, 1988.
40. GOMES, F. A. M.; SENNE, T. A. An SLP algorithm and its application to topology optimization. **Computational & Applied Mechanics**, v. 30, p. 53-89, 2011.
41. DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 1<sup>a</sup>. ed. New York: Oxford University Press, 1994.
42. BARBERO, E. J. **Introduction to Composite Material Design**. 1<sup>a</sup>. ed. New York: Taylor & Francis, 1999.
43. SMITH, G. B. **Daily News**, 2007. Disponível em: <<http://www.nydailynews.com/news/brooklyn-bridge-ain-article-1.240415>>. Acesso em: 9 Novembro 2015.

44. STRUCTURAE. Disponível em: <<http://structurae.net/structures/hinteribach-bridge>>. Acesso em: 17 set. 2015.
45. COMPOSITE Construction Laboratory CCLAB. Disponível em: <<http://cclab.epfl.ch/page-13730-en.html>>. Acesso em: 17 set. 2015.
46. FIBERLINE composites. Disponível em: <<http://fiberline.com/fiberline-bridge>>. Acesso em: 17 set. 2015.
47. MEIER, U. Composite Materials in Bridge Repair. **Applied Composite Materials**, v. 7, p. 75-94, 2000.
48. XIE, X.; LI, X.; SHEN, Y. Static and Dynamic Characteristics of a Long-Span Cable-Stayed Bridge with CFRP Cables. **Materials**, v. 7, p. 4854-4877, 2014.
49. CAI, H.; AREF, A. J. On the design and optimization of hybrid carbon fiber reinforced polymer-steel cable system for cable-stayed bridges. **Composites: Part B**, v. 68, p. 146-152, 2015.
50. MOTOYAMA, H. et al. Dynamic Tensile Properties of CFRP Cables subjected to High-speed Loads. **Memoirsof theFaculty of Engineering, Kyushu University**, v. 62, p. 113-127, 2002.
51. MOTOYAMA, H. et al. Tensile Tests of Carbon Fiber Composite Cables and Health Monitoring by Electrical Resistance Method. **Journal of the Japan Society for Composite Material**, v. 28, p. 196-203, 2002.
52. JACKSON, D. et al. CFRP Mooring Lines for MODU Applications. **Offshore Technology Conference**, 2005.
53. MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas**. Brasília: IPEA, 2013.
54. ODRU, P.; GEFFROY, R. L. Carbon fiber tethers key for ultra-deepwater production. **Offshore**, v. 62, 2002.
55. SPARKS, C. et al. Carbon Fiber Composite Tendons for Deepwater Tension Leg Platforms. **Offshore Technology Conference**, 2003.
56. ALI, A. H. et al. Long-term durability testing of tokyo rope carbon cables. **ICCM20**, Copenhagen, 2015.
57. OFFSHORE. Disponível em: <<http://www.offshore-mag.com/index.html>>. Acesso em: 22 Setembro 2015.
58. WANG, X. et al. A novel anchor method of frp cable for long-span cable-supported bridges. **ICCM20**, Copenhagen, 2015.
59. JUNG, W. T.; PARK, J. S. An Experimental Study on Tensile Characteristic for CFRP. **Procedia Engineering**, v. 11, p. 1518-1523, 2011.

60. SANTOS, T. F. A. et al. Suitability of carbon fiber-reinforced polymers as power cable cores: Galvanic corrosion and thermal stability evaluation. **Materials and Design**, v. 56, p. 780-788, 2015.
61. MCNALLY, T.; PÖTSCHKE, P. **Polymer-carbon Nanotube Composites: Preparation, Properties and Applications**. 1ª. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2011.
62. PAN, N. Development of a Constitutive Theory for Short Fiber Yarns: Mechanics of Stample Yarn Without Slippage Effect. **Textile Research Journal**, v. 62, p. 749-765, 1992.
63. CROSSLEY, J. A.; SPENCER, A. J. M.; ENGLAND, A. H. Analytical solutions for bending and flexure of helically reinforced cylinders. **International Journal of Solids and Structures**, v. 40, p. 777-806, 2003.
64. CHAMIS, C. C. Simplified Composite Micromechanics Equations for Hygral, Thermal and Mechanical Properties. **NASA Technical Memorandum**, 1983.
65. KADDOUR, A. S.; HINTON, M. J. Instructions to Contributors of the Second World-Wide Failure Exercise. **WWFE-II: Part A**, 2004.
66. LUZ, F. F. et al. Influence of the static friction coefficient on CRFC and GFRP cables in tension and bending. **BCCM2**, São José dos Campos, 2014.
67. CHAMIS, C. C. Simplified Composite Micromechanics Equations for Hygral, Thermal and Mechanical Properties. **NASA Technical Memorandum**, 1983.
68. MIKKELSEN, L. P.; SALVIATO, M.; GILI, J. From measurements errors to a new strain gauge design for composite materials. **ICCM20**, Copenhagen, 2015.
69. HOSUR, M. E. A. Processing and characterization of epoxy nanocomposites with Mwent's/Cnf's using thinky. **Matéria**, v. 15, 2010.
70. MATHWORKS. Matlab Documentation, 2015. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/optim/ug/equation-solving-algorithms.html>>. Acesso em: 11 nov. 2015.
71. ARORA, J. S. **Introduction to Optimum Design**. 3ª. ed. Oxford: Elsevier, 2012.