



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE CABOS DE COMPÓSITO POLIMÉRICO SOB TRAÇÃO E FLEXÃO**

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico (UFRGS)  
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini Jr. (UFMG)

FELIPE FERREIRA LUZ, M.Sc.

Porto Alegre, 2018

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**TESE DE DOUTORADO**

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE CABOS DE COMPÓSITO POLIMÉRICO SOB TRAÇÃO E FLEXÃO**

Felipe Ferreira Luz, M. Sc.

Trabalho realizado no 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 Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração de 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)

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini Jr. (UFMG)

Banca Examinadora:

Branca Freitas de Oliveira (UFRGS), D.Sc.

Rogério José Marczak (UFRGS), D.Sc.

Sergio Frascino Muller de Almeida (USP), D.Sc.

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

*“If you follow every dream*

*You might get lost”*

**Neil Young**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Ana Cancian, por todo amor, apoio, incentivo e cuidado, sempre me ajudando a manter o foco e me mostrando o poder da continuidade. Porém, agradeço a ela acima de tudo, por me ajudar a me descobrir, me desenvolver e me tornar uma pessoa melhor.

Aos meus pais, Marcelo A. Paranhos Luz e Oneides C. Ferreira Luz, pelo suporte e amor incondicionais dados para que eu pudesse chegar a esta conclusão, não somente deste trabalho, mas também a mais uma importante etapa na minha vida. Aos meus irmãos, Fabricio e Franco, que me apoiaram, motivaram e me deram toda ajuda necessária. À minha Tia Odete M. de Melo Ferreira e minha avó Lilia de Melo Ferreira (*in memoriam*), que são minhas outras duas mães, e que com um enorme carinho sempre me ajudaram e acreditaram em mim.

Ao Prof. Dr. Sandro Campos Amico pelos ensinamentos, conversas, disponibilidade, paciência, comprometimento na busca dos melhores resultados e inspiração com suas frases de efeito.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini, por me mostrar um outro lado da ciência, por abrir minha perspectiva sobre as possibilidades de onde eu posso chegar, por me mostrar caminhos e me fazer querer ir além. Sempre com sua autenticidade ímpar.

Ao Prof. Dr. Stephen W. Tsai por ter me recebido e me ajudado em uma comunidade distante, além de ter me mostrado uma outra realidade de trabalho e ensinado muito. Agradeço também à secretária do Departamento de Engenharia Aeroespacial da *Stanford University*, Grace Fontanilla por toda ajuda e apoio. E à todos amigos que fiz neste período na Califórnia (EUA).

Aos amigos do Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) e do Grupo de Materiais Compósitos e Nanocompósitos (GCOMP) da Escola de engenharia da UFRGS, aos colegas da sala 121, pela amizade e colaboração de todos, tornando possível a realização deste trabalho. Em especial aos amigos e colegas Laís Vasconcelos, Eduardo Menezes e Maikson Tonato, pelas trocas de conhecimento e apoio mútuo. Também às alunas de iniciação científica Fernanda Watte e Rafaela Graff, por toda a ajuda nos ensaios experimentais.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro e por ter proporcionado a experiência de um doutorado sanduiche.

À Petrobras pela motivação do projeto e pelo apoio financeiro e tecnológico.

Aos laboratórios POLICAB da Universidade Federal de Rio Grande e ao Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR

pela realização dos ensaios de tração e determinação do coeficiente de atrito estático, respectivamente.

Aos colegas e amigos do Centro Universitário Franciscano, pelo compartilhamento de experiências e convivência. Em especial ao professor Clandio Marques, pelo auxílio nas análises estatísticas.

Aos amigos, pelas alegrias e motivação para chegar tão longe, mas sempre sonhando ir além. Em especial aos amigos Liciane Bertol, Fabricio Severo e André Marques.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo durante este período e que ainda continuarão, agora, me auxiliando na busca de novos e desafiadores objetivos. Eu sou a soma dos lugares que conheci, dos conhecimentos que aprendi e das pessoas com que convivi.

## PUBLICAÇÕES RELACIONADAS

### Artigos em Periódicos:

**LUZ, F. F.;** MENEZES, E. A. W.; SILVA, L. V.; CIMINI JR., C. A.; Amico, S.C. Strength analysis of composite cables. Latin American Journal of Solids and Structures, 2017. IN PRESS.

**LUZ, F. F.;** MENEZES, E. A. W.; CIMINI JR., C. A.; Amico, S.C. Numerical analysis of carbon fiber cables for mooring lines under tensile and bending loading. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2018. ACEITO.

### Congressos (trabalhos completos):

**LUZ, F. F.;** MENEZES, E. A. W.; CIMINI JR., C. A.; Amico, S.C. A simplified analytical model for carbon fiber composite cables under tensile load. In: Brazilian Conference on Composite Materials - BCCM-3, Gramado, 2016.

**LUZ, F. F.;** SILVA, L. V.; CIMINI JR., C. A.; Amico, S.C. Analysis of bending and tensile behavior of CFRP stranded and spiral cables using a numeric model. In: 20th International Conference on Composite Materials - ICCM, Copenhagen, 2015.

**LUZ, F. F.;** da SILVA, Carlos H.; CIMINI JR., Carlos A.; da SILVA, Laís V.; AMICO, Sandro C. Influence of the static friction coefficient on CFRP and GFRP cables in tension and bending. In: 2nd Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM2), São José dos Campos, Brasil, 2014.

**LUZ, F. F.;** SILVA, L. V. ; AMICO, S. C. ; CIMINI JR., C. A. Tensile behavior of a CFRP wire rope with independent core: Experimental, analytical and numerical analyses. In: 16 European Conference on Composite Materials (16ECCM), Seville, Espanha, 2014.

**LUZ, F. F.;** da SILVA, Carlos H.; CIMINI JR., Carlos A.; da SILVA, Laís V.; AMICO, Sandro C. Influence of the static friction coefficient on CFRP and GFRP cables in tension and bending. In: 2nd Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM2), São José dos Campos, Brasil, 2014.

**LUZ, F. F.;** SILVA, L. V. ; AMICO, S. C. ; CIMINI JR., C. A. . CFRP cables tensile behavior. In: IV ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites, Ponta Delgada, Portugal, 2013.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do fio
AFRP	<i>Aramid Fiber Reinforced Plastic</i>
C	Fio central (índice)
CFCC	<i>Carbon Fiber Composite Cable</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
COF	Coefficiente de atrito estático
CV	Coefficiente de variação
d	Diâmetro nominal do cabo
$d_f$	Diâmetro nominal do fio
E	Módulo de elasticidade
Ea	Rigidez axial
EI	Rigidez à flexão
F	Força axial
FE	Fio externo (índice)
FPS	<i>Floating Production System</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Plastic</i>
G	Módulo de Cisalhamento
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Plastic</i>
H	Momento de torção por unidade de comprimento
$h_c$	Comprimento do passo da perna
$H_c$	Comprimento do passo do cabo
I	Momento de inércia
J	Rigidez em torsão
k	Curvatura por unidade de comprimento
K	Fator de força de rompimento do cabo
L	Distância entre os suportes do ensaio de flexão

$l$	Comprimento do cabo
$l_c$	Comprimento crítico da fibra
LCP	Polímero de Cristal Líquido
$m$	Número de fios
$M$	Momento
MEF	Método dos Elementos Finitos
$M_z$	Torque
$N$	Força cisalhante por unidade de comprimento
$p$	Raio de dobramento
PA	Poliamida
PAN	Poliacrilonitrila
PE	Poliétileno
PEN	poli(naftalato de etileno)
PET	Politereftalato de etileno
PP	Polipropileno
$Q_{ij}$	Elementos da matriz rigidez de um compósito
$r$	Raio do fio
$R$	Raio do cabo
$r_c$	Raio do fio central
$r_{FE}$	Raio do fio externo
$R_r$	Faixa de categorias de resistência à tração de arames
SG	<i>Strain gauge</i>
SS	Semi-submersível
$T$	Tensão axial por unidade de comprimento
TB	Torção Balanceada
TL	Torção <i>Lang</i>
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
TN	Torção Não-Balanceada
$Tr$	Traço da matriz

TR	Torção Regular
$u_{t,t}$	Deformação axial de um fio
$u_{z,z}$	Deformação axial global do cabo por unidade de comprimento
$V_f$	Fração volumétrica de fibras
X	Linha externa de carregamento por unidade de comprimento
Z	Momento de flexão por unidade de comprimento

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Ângulo da hélice
$\beta$	Ângulo complementar da hélice
$\Delta\kappa'$	Curvatura por unidade de comprimento
$\Delta\tau$	Torção por unidade de comprimento
$\varepsilon$	Deformação axial
$\varepsilon^u$	Deformação axial na ruptura
$\xi, \eta, \lambda, \mu$	Parâmetros do modelo de Knapp (1979)
$\theta_{z,z}$	Ângulo de torção global do cabo por unidade de comprimento
$k_{\varepsilon\varepsilon}$	Tração pura
$k_{\theta\varepsilon}, k_{\varepsilon\theta}$	Termos de acoplamento tração-torsão
$k_{\theta\theta}$	Torsão pura
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Densidade
$\sigma$	Desvio padrão
$\sigma_T^*$	Tensão na ruptura

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - (a) Elementos de um cabo de aço e (b) exemplos de torções em um cabo 6×7 com torção regular e (c) com torção Lang, com detalhes dos sentidos das torções nas seções transversais. ....</i>	24
<i>Figura 2 - Passo da perna (<math>h_c</math>) e Passo do cabo (<math>H_c</math>). ....</i>	24
<i>Figura 3 - Cabos multi-pernas com emprego de fios de mesmo diâmetro (a) cabo 1×7 e (b) cabo 6×7, de diâmetros diferentes (c) Filler, (d) Warrington e (e) Seale, e (f) cabo espiral de construção 1×61. ....</i>	25
<i>Figura 4 - Cabo comercial CFCC da empresa Tokyo Rope em diversos tamanhos e aplicações [catálogo Tokyo Rope]. ....</i>	30
<i>Figura 5 - Comportamento em tração dos diferentes cabos de compósito comparados com um cabo de aço [Benmokrane et al., 2000]. ....</i>	32
<i>Figura 6 - Especificações do cabo CFCC 1×7 estudado no trabalho de Motoya et al. [2002]. ....</i>	33
<i>Figura 7 - Cabo rompido após a realização de ensaios estático (<math>a \times 10^{-4}</math> m/s) [Motoya et al., 2002]. ....</i>	33
<i>Figura 8 - Comportamento do cabo 1×19 em flexão [Menezes et al., 2017b]. ....</i>	34
<i>Figura 9 - Cabos utilizando fios de carbono sendo aplicados em estrutura na construção civil [Rohleder et al., 2008]. ....</i>	35
<i>Figura 10 - Diferentes tipos de plataformas de perfuração e produção de petróleo [site ScienceDaily.com]. ....</i>	36
<i>Figura 11 - Cabo em catenária (a) e cabo em taut-leg (b) [Gión, 2009]. ....</i>	37
<i>Figura 12 - Gráficos dos resultados dos elementos da matriz de rigidez conforme o ângulo <math>\theta</math> é aumentado comparados entre os modelos de Costello (1997), Hruska (1952,1953), Machida et al. (1973), McConnell e Zemeke (1882), Kumar e Cochran (1987), Ramsey com os resultados numéricos de Ghoreishi et al. (2007a). [Adaptado de Ghoreishi et al., 2007a]. ....</i>	47
<i>Figura 13 - Distribuição de tensão nas seções transversais de cabos com diferentes construções [Stanova et al., 2015]. ....</i>	49
<i>Figura 14 - Distribuição de tensão na seção longitudinal de um cabo multicamada sob carregamento em tração pura [Stanova et al., 2015]. ....</i>	51
<i>Figura 15 - Corpo de prova de fio de material compósito polimérico em ensaio de tração. ....</i>	52
<i>Figura 16 - Geometria do corpo de prova utilizado no ensaio de determinação de COF dos fios CE50 e VE50. ...</i>	53
<i>Figura 17 - Sistema para a realização do ensaio de determinação do COF. ....</i>	53
<i>Figura 18 - (a) Geometria dos corpos de prova, (b) cabo montado para ensaio de tração e (c) detalhes da ancoragem. ....</i>	54
<i>Figura 19 – (a) detalhes dos corpos de prova ensaiados em flexão e (b) detalhes do posicionamento dos strain gauges. ....</i>	55
<i>Figura 20 - (a) simetria isotrópica para o plano 2-3 e (b) relação das constantes de engenharia para estes materiais. ....</i>	56
<i>Figura 21 - Forças agindo em (a) um cabo 1×7 e (b) em um único fio externo. ....</i>	57
<i>Figura 22 - Imagem 3D do cabo 1×7: Orientação do material seguindo a orientação geométrica do cabo e no detalhe os eixos materiais. ....</i>	61
<i>Figura 23 - Análise de convergência da malha. ....</i>	62

<i>Figura 24 - Malha utilizando elementos hexaédricos lineares com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó, empregada no modelo numérico: (a) vista isométrica e (b) vista de topo.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 25 - Imagem 3D mostrando um dos 6 pares de contato entre o núcleo e um dos fios externos (a), um dos 6 pares de contato entre dois fios externos (b) e os 4 pares de contato entre os apoios e o cabo para o caso da sollicitação em flexão (c).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 26 - Representação das condições de contorno aplicadas às simulações em tração. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 27 - Representação das condições de contorno aplicadas às simulações em flexão. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 28 - (a) modo de falha do cabo 1×7 CE35 em sollicitação de tração e (b) em detalhe. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 29 - Resultados experimentais para os ensaios de tração no cabo 1×7 CE35. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 30 - Corpo de prova do cabo 1×7 CE35 ao final do ensaio de flexão 4 pontos.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 31 - Comportamento do cabo 1×7 CE35 em flexão para as medidas de momento e deformação.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 32 - Comportamento do cabo 1×7 CE35 em flexão para as medidas de força e deslocamento. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 33 - Comparativo do comportamento do cabo 1×7 em tração entre os resultados experimentas e os modelos numérico e analítico. ....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 34 - Pressão de contato no fio central ao longo da aplicação de tração. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 35 - Comparativo do comportamento momento vs. deformação do cabo 1×7 em flexão entre os resultados experimentas e os numérico e analítico. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 36 - Comparativo do comportamento força vs. deslocamento do cabo 1×7 em flexão entre os resultados experimentas e os numérico e analítico.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 37 - Análise da perda da seção transversal circular do cabo quando submetido à flexão. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 38 - Pressão de contato ao longo da aplicação de flexão. ....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 39 - Análise do cabo 1×7 CE35 com diferentes comprimentos de passo com carregamento em tração pura.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 40 - Relação entre o comprimento do passo e a resistência à tração para o cabo 1×7 CE35.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 41 - Análise do cabo 1×7 CE35 com diferentes comprimentos de passo com carregamento em flexão. ..</i>	<i>86</i>
<i>Figura 42 - Análise do cabo 1×7 CE35 com diferentes comprimentos de passo com carregamento em flexão. ..</i>	<i>86</i>
<i>Figura 43 – Relação entre o comprimento do passo e a força em tração para o cabo 1×7 CE35.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 44 - Seções transversais do cabo 1×7 CE35 para diferentes comprimentos de passo. ....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 45 - Análise do cabo 1×7 CE35 com diferentes valores de COF com carregamento em tração nas condições PF e PL. ....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 46 - Análise do momento do cabo 1×7 CE35 com diferentes valores de COF com carregamento em flexão. ....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 47 - Análise do deslocamento do cabo 1×7 CE35 com diferentes valores de COF com carregamento em flexão.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 48 - Comportamento dos cabos 1×7 híbridos em comparação com o cabo CE35 para sollicitação em tração.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 49 - Comportamento dos cabos 1×7 híbridos em comparação com o cabo CE35 para sollicitação em flexão.....</i>	<i>92</i>

<i>Figura 50 - Comportamento dos cabos 1×7 híbridos em comparação com o cabo CE35 para solicitação em flexão.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 51 - Comprimento dos passos das diferentes camadas do cabo 1×61 CE35.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 52 - Malhas construídas para a adaptação do modelo numérico para os cabos (a) 6×7 CE35 e (b) 1×61 CE35. ....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 53 - Comportamento dos cabos 1×61 CE35 e 6×7 CE35 em tração para as condições torção balanceada, torção não-balanceada, ponta-fixa e ponta-livre. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 54 - Resposta da torção dos cabos 1×61 CE35 e 6×7 CE35 em carregamento axial para torção balanceada e torção não-balanceada. ....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 55 - Vista isométrica do cabo e 6×7 CE35 TB em flexão.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 56 - Raio de dobramento vs. deformação no fio mais externo para os cabos (a) 6×7 CE35 TB e (b) 1×61 CE35 TB. ....</i>	<i>97</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Características dos cabos multi-pernas e espiral [Chaplin, 1998; Chaplin e Potts, 1991].</i>	26
<i>Tabela 2 - Propriedades das fibras empregadas em cabos de ancoragem (fibras isoladas) em comparação ao aço.</i>	27
<i>Tabela 3 - Propriedades dos fios de compósitos com diferentes fibras e diferentes fabricantes.</i>	31
<i>Tabela 4 - Propriedades dos cabos de compósitos com diferentes fibras de diferentes fabricantes.</i>	31
<i>Tabela 5 - Propriedades dos tendões finais, [Sparks et al., 2003].</i>	34
<i>Tabela 6 - Principais diferenças entre os modelos estudados por Ghoreishi et al. (2007a).</i>	45
<i>Tabela 7 - Nomenclatura dos fios de material compósito polimérico estudados.</i>	52
<i>Tabela 8 - Cálculo do traço das matriz rigidez normalizada para diferentes materiais CFRP (Adaptado de Tsai e Melo, 2014).</i>	60
<i>Tabela 9 - Resultados dos ensaios de tração nos fios de diferentes materiais compósitos</i>	67
<i>Tabela 10 - Valores de COF para os diferentes pares analisados.</i>	68
<i>Tabela 11 - Valores das constantes de engenharia empregadas nos modelos estudados.</i>	72
<i>Tabela 12 - Resultados para a carga de falha para o cabo 1×7 em tração utilizando os modelos numérico e analítico.</i>	73
<i>Tabela 13 - Análises das distribuições de tensão e pressão de contato utilizando o modelo numérico.</i>	75
<i>Tabela 14 - Resultados da carga para um deslocamento de 10 mm para o cabo 1×7.</i>	78
<i>Tabela 15 - Análises das distribuições de tensão e pressão de contato utilizando o modelo numérico.</i>	81
<i>Tabela 16 - Resultados para as análises estatísticas.</i>	84
<i>Tabela 17 - Diferentes estruturas híbridas estudadas.</i>	91
<i>Tabela 18 - Arquiteturas dos cabos multicamadas analisados.</i>	93

# SUMÁRIO

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS.....	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	14
SUMÁRIO.....	15
RESUMO.....	17
<i>ABSTRACT</i> .....	18
1. Introdução.....	19
2. Objetivos.....	22
2.1. Objetivos Específicos.....	22
3. Revisão Bibliográfica.....	23
3.1. Introdução a Cabos.....	23
3.2. Cabos de Aço.....	23
3.3. Cabos de Fibras Sintéticas.....	26
3.4. Cabos de Materiais Compósitos.....	28
3.4.1. Cabos Utilizando Fios de AFRP.....	29
3.4.2. Cabos Utilizando Fios de CFRP.....	29
3.4.3. Propriedades de Fios e Cabos de Compósitos.....	30
3.4.4. Aplicações de Cabos de Compósitos.....	35
3.5. Modelos Analíticos para Cabos.....	38
3.5.1. Deduções Simplificadas de Modelos Analíticos para Cabos de Aço.....	40
3.6. Método de Elementos Finitos Aplicados a Cabos.....	46
3.6.1. Tração de Cabos.....	46
3.6.2. Flexão de Cabos.....	49
3.6.3. Teorias de Contato e Influência do Atrito.....	50
4. Metodologia.....	52
4.1. Caracterização dos Fios.....	52
4.2. Determinação do Coeficiente do Atrito Estático (COF).....	53

4.3. Ensaio Tração Cabo 1x7 CFRP .....	54
4.4. Ensaio Flexão Quatro Pontos Cabo 1x7 CFRP .....	55
4.5. Implementação do Modelo Analítico Simplificado.....	56
4.6. Criação do Modelo Numérico .....	58
4.6.1 Geometria do Cabo e Propriedades do Material .....	58
4.6.2. Geração da Malha.....	62
4.6.3. Contato e Condições de Contorno .....	63
4.7. Planejamento Experimental.....	65
5. Resultados e Discussões .....	67
5.1. Caracterização dos Fios.....	67
5.2. Coeficiente de Atrito Estático .....	68
5.3. Tração Cabo 1x7 CE35.....	68
5.4. Flexão Cabo 1x7 CE35.....	70
5.5. Verificações dos Modelos Numérico e Analítico .....	72
5.5.1. Determinação das Constantes de Engenharia .....	72
5.5.2. Tração.....	73
5.5.3. Flexão .....	76
5.5.4. Análise Estatística.....	82
5.6. Análises Utilizando Modelo Numérico .....	84
5.6.1. Influência do Comprimento do Passo.....	84
5.6.2. Influência da Variação do COF .....	88
5.6.3. Construções Híbridas.....	90
5.6.4. Cabo Multi-pernas 6x7 e Cabo Espiral 1x61 .....	92
6. Conclusões .....	99
7. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	101
Referências.....	102

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico estático de diferentes cabos poliméricos reforçados por fibras em solicitações de tração e flexão através de ensaios experimentais, modelos analítico e numérico, inserindo as incertezas probabilísticas experimentais. Diferentes fios de compósitos pultrudados de seção circular foram ensaiados experimentalmente para se determinar seus respectivos coeficientes de atrito estático (COF), módulo de elasticidade ( $E_1$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) e máxima deformação axial na ruptura ( $\epsilon^u$ ). Cabos utilizando fibras de carbono e resina epóxi de arquitetura 1x7 foram ensaiados experimentalmente em tração e flexão 4 pontos, os resultados foram comparados com um modelo analítico bidimensional simplificado adaptado do modelo de Costello e com um modelo numérico tridimensional dedicado. Considerou-se as incertezas probabilísticas em ambos os modelos incorporando as variações experimentais das principais propriedades de entrada. O modelo numérico foi empregado para o estudo de cabos com construções híbridas (fios de diferentes compósitos). Como principais resultados para o cabo 1x7 CFRP, a carga de ruptura média em tração foi 190,25 kN, em flexão o cabo apresentou uma força média de 598,5 N para um deslocamento de 10 mm. O modelo numérico mostrou-se muito confiável, com uma diferença de -1,15% (181,1 kN) em relação aos resultados experimentais médios para tração, mas o modelo analítico simplificado apresentou diferenças acima de 10%. Para os ensaios em flexão o desempenho dos dois modelos foram similares, o numérico apresentou uma diferença de -3,11% (580,5 N) com relação ao experimental e o modelo analítico apresentou diferença acima de 10% (680,5 N). As análises estatísticas constataram não haver diferenças significativas entre os resultados do modelo numérico em relação ao experimental para ambas as solicitações analisadas. Por outro lado, há uma diferença estatística significativa entre os resultados experimentais e os gerados pelo modelo analítico. Concluiu-se também que todas as propriedades de entrada contribuem de maneira similar aos resultados dos dois modelos. Com o modelo numérico, comprovou-se a ocorrência de escorregamento entre os fios do cabo levando a uma perda da seção transversal circular e diminuição do momento de inércia. Encontrou-se o melhor compromisso entre maior flexibilidade em flexão sem comprometer a resistência à tração, para o cabo 1x7 com passo entre 90 e 150 mm, e que a variação do COF não afeta significativamente o desempenho do cabo em tração e flexão. Por fim, os demais resultados obtidos empregando este modelo indicam que os cabos de compósitos, mesmo em construções multicamadas, apresentam um real potencial de aplicação em diversos setores da engenharia.

## ABSTRACT

*The aim of this work is to evaluate the static mechanical behavior of different fiber reinforced polymer cables in tensile and flexural stresses through experimental, analytical and numerical models, inserting the experimental probabilistic uncertainties. Different wires of pultruded composites of circular section were tested experimentally to determine their respective coefficients of static friction (COF), modulus of elasticity ( $E_1$ ), Poisson coefficient ( $\nu_{12}$ ) and maximum axial deformation at rupture ( $\varepsilon^u$ ). Cables using carbon fibers and epoxy resin of 1 x 7 architecture were tested experimentally in traction and 4-point bending, the results were compared with a simplified two-dimensional analytical model adapted from the Costello model and also with a dedicated three-dimensional numerical model. Probabilistic uncertainties were considered in both models by incorporating the experimental variations of the main input properties. The numerical model was used for the study of cables with hybrid constructions (wires of different composites). As the main results for the 1 x 7 CFRP cable, the average tensile ultimate load was 190.25 kN, in flexion the cable had a mean force of 598.5 N for a displacement of 10 mm. The numerical model was very reliable, with a difference of -1.15% (181.1 kN) in relation to the average experimental results for traction, but the simplified analytical model presented differences above 10%. For the bending test the performance of the two models was similar, the numerical one presented a difference of -3.11% (580.5 N) in relation to the experimental one and the analytical model showed difference above 10% (680.5 N). Statistical analysis showed that there were no significant differences between the results of the numerical model in relation to the experimental one for both analyzed requests. On the other hand, there is a statistically significant difference between the experimental results and those generated by the analytical model. It was also concluded that all input properties contribute in a similar way to the results of the two models. With the numerical model, it was verified the occurrence of sliding between the cables of the cable leading to a loss of the circular cross section and decrease of the moment of inertia. The best compromise between greater bending flexibility without compromising tensile strength was found for the 1 x 7 cable with pitch length between 90 and 150 mm, and that the COF variation did not significantly affect the cable's performance in traction and bending. Finally, the other results obtained using this model indicate that composite cables, even in multilayer constructions, present a real potential of application in several engineering sectors.*

# 1. Introdução

No contínuo avanço na pesquisa de materiais compósitos poliméricos, bem como a inserção de novas técnicas para sua fabricação e melhor compreensão de seu comportamento térmico e mecânico, encontra-se uma tendência global em utilizá-los em substituição aos materiais tradicionais. Resistência e rigidez específicas, capacidade de amortecimento e resistência à ambientes agressivos, resistência à fadiga (chegando a ser três vezes maior que a do aço, para a fibra de carbono) (Dhand et al., 2015, Son et al., 2013, Wang e Wang, 2015) são as características frequentemente desejadas na utilização destes materiais em aplicações estruturais (Adanur et al., 2015). Apesar de materiais compósitos serem mais caros que os materiais tradicionais, sua extensa vida em serviço acaba sendo um fator de redução de custos à longo prazo (Fabbrocino et al., 2016).

A possibilidade de obter-se componentes mais leves comparados aos obtidos com materiais metálicos é um fator crucial em muitos setores. Uma aplicação para materiais compósitos ainda não amplamente explorada é em cabos. Este conceito já está sendo empregado em uma escala ainda não-expressiva na sustentação de pontes, permitindo um maior vão (distância entre suportes) e diminuindo o custo com manutenção devido à sua durabilidade e resistência à fadiga (Meier, 2012). Contudo, estes materiais ainda não foram devidamente explorados para aplicações em ancoragem de plataformas *offshore*. De acordo com o documento de especificação técnica da Petrobras (ET-3000.00-6651-962-PEB-004) um cabo de compósito para aplicação em linhas de ancoragem considerando carregamento estático deve possuir (i) uma força axial mínima de ruptura de 5000 kN para um cabo multi- pernas ou 6300 kN para um cabo espiral ambos para um diâmetro nominal de 90 mm, (ii) ter resistência à rotação e torque balanceado e (iii) ser capaz de ser dobrado sobre uma polia de 3 m de diâmetro. Além disso, espera-se que estes cabos trabalhem em um comportamento linear, longe das não-linearidades gerados por grandes deslocamento em flexão, por exemplo, motivo pelo grandes fatores de segurança costumam ser aplicados a estas estruturas. Cabos de ancoragem trabalham sob ação de esforços dinâmicos, onde os efeitos gerados por carregamentos acoplados (tração / flexão / torção), por exemplo, se tornam mais pronunciados. Contudo, inicialmente faz necessário entender o comportamento estático da estrutura com o emprego de materiais compósitos, a partir de uma metodologia que permita compreender isoladamente a resposta do cabo a solicitações isoladas (i.e. tração e flexão) para em estudos posteriores considerar carregamentos mais complexos.

Atualmente, para esta aplicação, utilizam-se cabos de aço e/ou cabos de fibras isoladas (não configurando um material compósitos, pois não há a presença de uma matriz), que possuem um tempo de vida relativamente baixo devido ao agressivo ambiente marinho. Além disso, plataformas ancoradas por cabos metálicos não podem ser empregadas em

águas ultra-profundas (lâmina d'água acima de 1500 m) devido ao seu elevado peso (Girón, 2009). Cabos de fibras isoladas, por serem flexíveis, também não são os melhores candidatos para esta aplicação, pois permitem um deslocamento considerável da plataforma devido às solicitações geradas pela ação das ondas do mar, correntes marítimas e fortes ventos. Portanto, cabos poliméricos reforçados por fibras (cabos de compósitos) apresentam um considerável potencial de substituir estes cabos atuais.

Cabos de compósitos são constituídos por fios geralmente de seção circular constante pultrudados (i.e. *rods*), em sua grande maioria compostos de uma matriz termorrígida (i.e. epóxi, éster-vinílica) reforçada por fibras longas e contínuas (i.e. carbono, aramida e vidro). Entretanto, é necessário uma melhor compreensão do comportamento mecânico destes novos cabos, pois o emprego destes materiais ortotrópicos altera a resposta mecânica destes componentes, não podendo assim, ter seu comportamento totalmente previsto através do uso modelos analíticos ou numéricos dedicados à cabos de aço, mesmo quando solicitados em condições de carregamento simples (tração, flexão ou torção).

Modelos analíticos e numéricos para cabos de aço e cordas vêm sendo desenvolvidos há décadas, sendo o modelo analítico de Costello (1997) um dos mais completos utilizado para materiais isotrópicos. Modelos analíticos considerando as relações constitutivas de um material ortotrópico também são encontrados na literatura para a aplicação em cordas. Ghoreishi et al. (2007b, 2007c), por exemplo, desenvolveram um modelo analítico e outro numérico para a análise estática de tração de cordas de geometria simples (apenas uma perna), comparando seus resultados com resultados experimentais e outros modelos analíticos. Os autores desconsideraram o coeficiente de atrito entre os fios e os efeitos do coeficiente de Poisson, o que os mesmos discutem poder ter sido o motivo pelo qual os resultados do modelo terem ficado com uma rigidez maior do que os resultados experimentais.

Atualmente continua a haver uma crescente demanda por novos e melhores modelos numéricos dedicados à cabos, principalmente utilizando análise por Elementos Finitos (MEF), que em geral apresentam melhores resultados quando comparados aos resultados gerados pelos modelos analíticos simplificados. Recentemente, Chen et al. (2017) realizaram um estudo que estabeleceu uma solução para a resposta de um cabo de aço 1x7 sob flexão pura analisando os efeitos da força de atrito entre os fios e diferentes comprimentos de passo, e como um dos principais resultados os autores observaram a possibilidade de escorregamento entre os fios. Porém, poucos modelos numéricos dedicados a cabos de compósitos são encontrados na literatura, e os mesmo ainda não apresentam uma boa concordância com resultados experimentais, principalmente em solicitações de flexão, como por exemplo o modelo de Menezes et al. (2017b) que não conseguiu acompanhar o comportamento não-linear de um cabo CFRP 1x19 em flexão 4 pontos.

As principais diferenças entre modelos dedicados a cabos de compósitos e aos cabos de aço estão (i) na dificuldade de medir e avaliar o efeito do atrito entre os fios do cabo, (ii) na imprecisão/dificuldade das obtenções das propriedades mecânicas dos materiais compósitos e (iii) em entender os efeitos que as propriedades anisotrópicas podem gerar na resposta mecânica do cabo para carregamentos em tração e flexão. Portanto, tem-se a necessidade de criar um modelo numérico confiável, que considere as incertezas probabilísticas experimentais, capaz de prever com consistência os comportamentos experimentais destes novos cabos para diferentes arquiteturas de construção.

## 2. Objetivos

O objetivo geral desta tese é avaliar o comportamento mecânico estático de cabos poliméricos reforçados por fibras através de ensaios experimentais e de um modelo numérico que permita determinar propriedades de interesse de engenharia, além de avaliar a influência de parâmetros físicos na resposta final do cabo em solicitações de tração e flexão.

### 2.1. Objetivos Específicos

- Avaliar os principais tipos de arquiteturas de cabos, bem como os materiais comumente neles empregados, comparando seu desempenho com compósitos de matriz termorrígida reforçados com fibras de carbono, aramida e vidro;
- Determinar o comportamento mecânico de cabos de compósitos em solicitações de tração e flexão através do uso de um modelo analítico simplificado e de um modelo numérico dedicado inserindo as incertezas probabilísticas nos dados de entradas;
- Verificar a correlação entre os resultados dos modelos e os resultados experimentais avaliando os impactos das simplificações realizadas, bem como as respectivas sensibilidades aos dados de entrada;
- Analisar o comportamento mecânico de cabos (i) com construções híbridas, (ii) com diferentes valores de comprimentos de passo e COF, e (iii) com multicamadas utilizando diferentes arquiteturas de construção.

## 3. Revisão Bibliográfica

### 3.1. Introdução a Cabos

Cabos são componentes de engenharia utilizados em diversas aplicações e condições de serviço, fabricados de acordo com a necessidade, variando-se o material, as dimensões e a sua arquitetura. É comum classificar os cabos de engenharia em: (i) cabos de aço, chamados de *wire ropes*, que também abrangem cabos feitos de outros metais como alumínio e cobre; e (ii) cabos de fibras, também chamados de cordas, fibras isoladas ou *fiber ropes*, geralmente compostos de milhares de fibras poliméricas termoplásticas. Ressalta-se que este último tipo são cabos que empregam apenas fibras (sem a incorporação de resina polimérica, i.e. fibras isoladas), são estruturas de menor rigidez comparadas à cabos construídos empregando-se materiais compósitos ou aço. Cabos de aço e cordas possuem muitas semelhanças em termos de construção e arquitetura. Os diversos modelos existentes para estas estruturas também apresentam similaridades, especialmente em resposta sob tração. Contudo, também há diversas diferenças, especialmente com relação à rigidez em flexão dos diferentes cabos.

Atualmente, novos materiais vem sendo estudados para melhorar o desempenho de cabos com arquiteturas conhecidas, tendo-se ainda a possibilidade de criar novas arquiteturas adaptadas a estes novos materiais, como ocorre com cabos de compósitos. Os principais tipos de cabos estão discutidos na seções seguintes.

### 3.2. Cabos de Aço

Os componentes básicos destas estruturas, apresentados na Figura 1a, são:

**a) Alma ou núcleo (Core):** Parte central do componente em torno da qual as pernas são dispostas em forma de hélice. A alma poder ser constituída de fibra natural ou artificial, podendo ainda ser formada por uma perna ou um cabo de aço independente. Geralmente de seção circular.

**b) Fio ou Arame (Wire):** Fio de aço obtido por trefilação e geralmente de seção circular.

**c) Perna (Strand):** Conjunto de fios torcidos em forma de hélice, podendo ou não ter um núcleo ou alma constituído por um fio, outro material metálico ou fibra.

A configuração de torção dos fios da camada externa da perna em sentido oposto à torção das pernas do cabo é denominada Torção Regular (TR, *Ordinary Lay* ou *Regular Lay*) ou Torção Balanceada (TB). Por outro lado, a configuração que possui sentido da torção da camada externa dos fios nas pernas igual ao da torção das pernas no cabo é denominada Torção Lang (TL, *Lang Lay*) ou Torção Não-Balanceada (TN). Torção regular à direita engloba a maioria dos cabos atualmente utilizados, por apresentar compensação de torque. A Figura

1b,c apresenta as diferenças entre os sentidos das torções das seções transversais de um cabo 6x7, torção regular e torção *Lang*. Um cabo construído com torção regular tende a ter um maior equilíbrio na torção das diferentes camadas quando submetidos à esforços de tração em comparação à torção *Lang*.

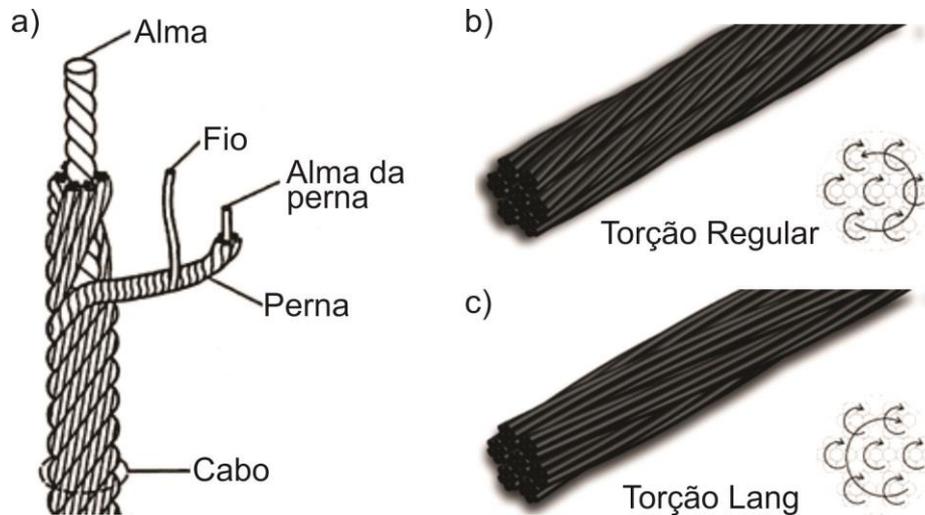


Figura 1 - (a) Elementos de um cabo de aço e (b) exemplos de torções em um cabo 6x7 com torção regular e (c) com torção *Lang*, com detalhes dos sentidos das torções nas seções transversais.

Outro fator importante na construção destes cabos é o comprimento do passo da perna ( $h_c$ ), e o comprimento do passo do cabo ( $H_c$ ), que é a distância necessária para o componente dar uma volta ao redor do seu eixo de torção, ambos apresentados na Figura 2. Esta propriedade é fundamental no comportamento mecânico do cabo, pois afeta diretamente sua flexibilidade, e quanto maior o valor de  $h_c$  e  $H_c$ , menor a flexibilidade do cabo. Apesar de sua importância, a definição de um valor de  $H_c$  não é facilmente encontrada, não sendo citada nas normas ISO 17893 e ISO 10425. A norma NBR 6327:2004 (“Cabos de aço para uso geral – Requisitos mínimos”) indica para cabos de classe 6x7 que o comprimento do passo do cabo ( $H_c$ ) não deve exceder  $8 \times d$  ( $d$  = diâmetro nominal do cabo). Para cabos com pernas perfiladas, triangulares por exemplo, o passo do cabo não deve exceder  $10 \times d$ . Para outros cabos, o passo do cabo acabado não deve exceder  $7,25 \times d$ .

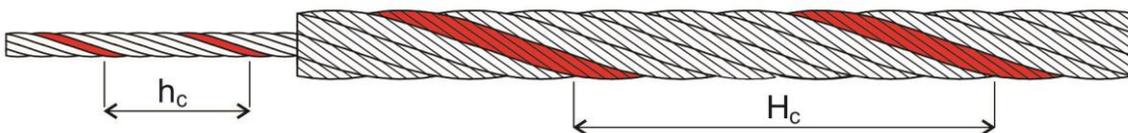


Figura 2 - Passo da perna ( $h_c$ ) e Passo do cabo ( $H_c$ ).

Os cabos de aço possuem basicamente dois tipos de construções:

**a) Cabo Multi-pernas (*Stranded*):** É o cabo composto por pernas de fios de aço dispostas em forma de hélice, em torno de uma alma, que pode ser de aço ou fibra, com o propósito de transferir carga de tração. Estes cabos podem ser especificados pelas normas ISO 17893:2003 ou mais especificamente para o setor de Óleo & Gás, pela ISO 10425:2004. A construção do cabo deve indicar o número de pernas, o número de fios em cada perna, a sua disposição, o tipo de alma e a maneira como os fios estão dispostos nas pernas. Cabos simples, como a construção 1×7 por exemplo (Figura 3a), são também aplicadas como pernas de cabos mais complexos, como na construção do cabo multi-pernas 6×7 (Figura 3b). Nestes exemplos, todos os fios apresentam o mesmo diâmetro. Porém, estes cabos e pernas podem ser arquitetados utilizando fios com diferentes diâmetros, obtendo-se diferentes construções, sendo as mais conhecidas a *Filler* (Figura 3c), *Warrington* (Figura 3d), e *Seale* (Figura 3e).

**b) Cabo Espiral (*Spiral* ou *Cordoalha*):** Cabo composto por pelo menos duas camadas de fios, de seção circular, dispostos em forma de hélice em torno de um fio central, com pelo menos uma camada torcida no sentido contrário ao da camada externa, com o propósito de transmitir força por tração, como por exemplo uma construção 1×61, apresentada na Figura 3f. As cordoalhas podem ainda possuir um travamento parcial na(s) última(s) camada(s) para impedir a rotação.

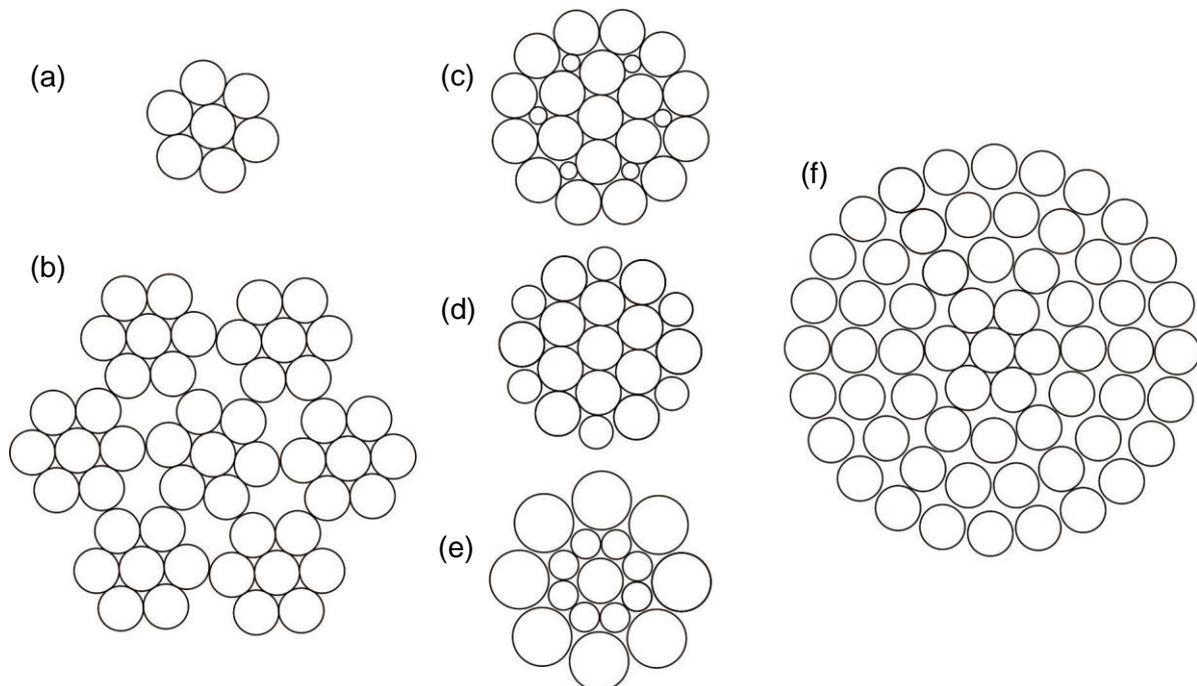


Figura 3 - Cabos multi-pernas com emprego de fios de mesmo diâmetro (a) cabo 1×7 e (b) cabo 6×7, de diâmetros diferentes (c) *Filler*, (d) *Warrington* e (e) *Seale*, e (f) cabo espiral de construção 1×61.

A Tabela 1 apresenta uma compilação das principais diferenças entre as construções mais comuns.

Tabela 1 - Características dos cabos multi-pernas e espiral [Chaplin, 1998; Chaplin e Potts, 1991].

Tipo de cabo	Vantagens	Desvantagens
Multi-pernas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possui um alto grau de tolerância ao dano e pode ser utilizado em guindastes de grandes cargas;</li> <li>• Construção é relativamente barata;</li> <li>• Fios geralmente mais finos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possui maior dificuldade para se aplicar a capa protetora (<i>jacket</i>), que aliado ao menor tamanho relativo do fio, o torna mais susceptível à exposição à água do mar.</li> </ul>
Espiral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximiza a utilização da área disponível;</li> <li>• Proporciona elevada resistência e rigidez axial específica;</li> <li>• Proporciona alto grau de torque balanceado;</li> <li>• A superfície externa final do cabo é essencialmente cilíndrica, facilitando a aplicação da capa protetora (<i>jacket</i>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa flexibilidade;</li> <li>• Sua aplicação é geralmente considerada inadequada para operações em polias cuja relação de diâmetro seja menor do que 35:1;</li> <li>• Os fios tendem a possuir maior diâmetro comparado ao cabo multi-pernas;</li> <li>• A construção é geralmente mais cara devido ao número de operações necessárias para se construir as diversas camadas.</li> </ul>

### 3.3. Cabos de Fibras Sintéticas

Diversas fibras sintéticas vêm sendo utilizadas para a construção de cabos, sendo mais comuns: PA (poliamida, *nylon*®), poliéster, polipropileno, aramida (*kevlar*®, *twaron*® e *technora*®), UHMWPE – *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene* (*Dyneema*® e *Spectra*®), PET - politereftalato de etileno, PEN – poli(naftalato de etileno) e LCP – polímero de cristal líquido (Del Vecchio et al., 2011). A aplicação destes cabos é ampla, principalmente para sistemas de ancoragem de plataformas em águas ultra-profundas, utilizados em conjunto com correntes metálicas (Ghoreishi et al., 2007b).

Cabos de fibras sintéticas são compostos pelos mesmos elementos básicos dos cabos de aço (i.e. alma, perna e fio/filamento). Os cabos de fibras isoladas seguem as mesmas definições referentes ao passo da perna ( $h_c$ ) e do cabo ( $H_c$ ), bem como aos sistemas de torção. Outra característica destes cabos é a heterogeneidade da seção transversal, pois os fios e as pernas são compostos por milhares de fibras, estas tentem a se acomodar e se compactar em seções não circulares.

A Tabela 2 apresenta um comparativo entre as propriedades das fibras mais utilizadas nestes cabos. As fibras de carbono não são recomendadas para aplicação de cabos de fibras isoladas, pois tratando-se de um material cerâmico (frágil) o atrito entre fibras é um fator de degradação da estrutura, necessitando assim de uma outra fase para proteger as fibras (e.g. em um material compósito). Com as fibras de carbono é possível produzir materiais compósitos com facilidade, tornando suas propriedades ainda mais interessantes (será discutido nos capítulos seguintes). Isto não acontece com as fibras de PE, pois sua natureza química dificulta a adesão com outro material (resina).

As fibras de aramida (abreviação para poliaramida) possuem elevada tenacidade, e característica de auto-extinção de chama. É reportado que não existe limite de fadiga para fibras de aramida, porém há ruptura por fluência (Dominico, 1995), além de uma considerável sensibilidade à radiação ultravioleta. Atualmente sua aplicação para ancoragem *offshore* limita-se a cabos produzidos com fibras isoladas, i.e. não combinadas a uma resina polimérica, possibilitando a ancoragem em águas ultra-profundas (Chi *et al.*, 2009).

A Tabela 2 também mostra que o aço, apesar de possuir elevados valores de  $E$  e  $\sigma_T^*$ , tem elevada densidade o que faz com que estas propriedades específicas sejam inferiores comparadas à maioria dos materiais apresentados, além de uma baixa resistência à oxidação.

Tabela 2 - Propriedades das fibras empregadas em cabos de ancoragem (fibras isoladas) em comparação ao aço.

Fibra	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E$ (GPa)	$\sigma_T^*$ (MPa)	$\epsilon^u$ (%)	$E/\rho$	$\sigma_T^*/\rho$	Referências
Vidro-E	2,5 - 2,7	70 - 79	1200 - 3445	2,5 - 4,8	28	866	(Wonderly et al., 2005; El-Tayeb et al., 1996)
Carbono – PAN (alto módulo)	1,7 - 1,9	221 - 827	2300 - 3950	0,3 - 1,4	204	1452	(Fu et al., 2000; Montes Morán et al., 2001)
Carbono – PAN (alta resistência)	1,8	230 - 291	4900 - 5690	2,0 - 2,1	128	2500	(Wonderly et al., 2005; Naito et al., 2008)
Aramida (Kevlar 49)	1,4	84 - 115	2900 - 3600	2,5 - 3,2	90	2000	(Cisneros et al., 2011; Nath et al., 2008)
PE (Spectra 1000)	0,9	49 - 87	1160 - 2700	1,7 - 3,7	177	3056	(Marais et al., 1992; Peijs et al., 1993)
PET	1,3	10 - 41	117 - 550	2,8 - 27	4	238	(Ochia et al., 2007; Hon et al., 2010)
LCP (Vectran)	1,4	74 - 75	2800 - 3200	2,3 - 3,8	53	2143	(vectranfibras.com, 2017; Adams et al., 1995)
PA (Nylon)	1,1	1,8 - 5,0	700 - 896	40 - 90	3	700	(Song et al., 2005; matweb, 2017)
PBO	1,5	175 - 280	360 - 1050	2,5 - 3,5	144	431	(Wu et al., 2004; Liu et al., 2011)
PP	0,9	6	550 - 625	8 - 15	10	343	(Kim et al., 2010; Foti, 2011)
Aço 1020	7,8	200 - 210	200 - 500	0,5 - 3,5	26	413	(Foti, 2011; vectranfibras.com, 2017)

onde:  $\rho$  é a densidade do material,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\sigma_T^*$  a tensão na ruptura e  $\epsilon^u$  a deformação na ruptura.

### 3.4. Cabos de Materiais Compósitos

Como fios destes cabos, são empregados materiais compósitos poliméricos, de modo geral chamados de Plásticos Reforçados por Fibras (FRP – *Fiber Reinforced Plastic*), que de acordo com a fibra empregada têm seu nome adaptado: CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Plastic*, AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Plastic* e GFRP – *Glass Fiber Reinforced Plastic*. Para a confecção destes materiais, comumente são empregadas resinas termorrígidas, gerando ao final um material sem deformação plástica.

Pan e Brookstein (2002) discutem algumas semelhanças e diferenças entre cordas e cabos de compósitos. Em ambas as estruturas, mesmo fragmentos de fibras já rompidas contribuem para a resistência geral do cabo, e vão continuar a contribuir até que estes fragmentos atinjam um comprimento crítico ( $l_c$ ), que vai depender, entre outros fatores, do seu coeficiente de atrito estático (COF). Porém, diferentemente dos cabos de fibras isoladas, o  $l_c$  para cabos em compósitos pode ser considerado constante, já que a adesão entre fibra e matriz permanece inalterada à medida que a tensão aumenta no cabo de compósito. Além disso, a redistribuição de carga quando as fibras começam a romper é um fenômeno mais local em compósitos devido também à alta adesão entre os constituintes.

Um maior número de referências são encontradas comparando, discutindo e relacionando cabos de compósitos com cabos de aço (Menezes et al., 2017a e 2017b; Meier, 2012; Grace et al., 2003; Balázs e Borosnóyi, 2001; Noisternig, 2000; Benmokrane et al., 2000). Os principais argumentos para esta associação são suas semelhanças em termos de rigidez, número de componentes, seções transversais circulares, maior continuidade/homogeneidade das propriedades ao longo do comprimento dos cabos e resistência a longo prazo. Noisternig (2000) sugere aplicar os mesmos critérios de requisitos de cabos de aço para um projeto de cabos de compósitos em pontes, por exemplo. Uma das principais diferenças entre eles consiste nos processos de fabricação, pois os fios que constituem os cabos de compósito são produzidos por pultrusão ou outra técnica similar. Além disso, pode-se dispor todos os fios (nestes cabos, geralmente barras de seção cilíndrica, e.g. *rods*) de material compósito paralelamente (i.e. sem torções, sem passo) criando-se a estrutura de tendões, também chamada de cabo paralelo. Praticamente não há na literatura informações sobre estes cabos e sua fabricação e terminação, ou de técnicas não destrutivas para avaliação e monitoramento, para aplicação no setor de Petróleo & Gás. Provavelmente devido a sua baixa flexibilidade e dificuldade de fabricação. Porém, um número maior de referências pode ser encontrado relacionado à sua aplicação na construção civil (Ortega et al., 2017; Fabbrocino et al., 2016; Wang et al., 2015; Cai e Aref, 2015; Shi et al., 2015).

Em geral as principais vantagens dos cabos de compósitos sobre os cabos de aço incluem: (i) alto módulo específico, (ii) alta resistência específica, (iii) excelente resistência à

fadiga (até três vezes maior que a do aço), (iv) excelente resistência à corrosão e neutralidade eletromagnética, e (v) baixo coeficiente de expansão térmica (especialmente para CFRP). As principais desvantagens com relação ao aço são: (i) alto custo, (ii) pouca flexibilidade, (iii) baixo módulo de elasticidade para as fibras de aramida e vidro, (iv) baixa deformação na ruptura, (v) elevada resistência axial comparada com a lateral afetando aplicações de ancoragem, (vi) resistência a longo prazo pode ser comprometida devido ao fenômeno de fluência e (vii) susceptibilidade ao dano por radiação ultravioleta e por absorção de água (no caso da fibra de aramida e resina epóxi).

A arquitetura dos cabos do tipo multi-pernas possibilita uma maior flexibilidade em flexão devido à distribuição geométrica dos fios, i.e. cada perna possui um eixo axial distinto do eixo axial do cabo, podendo assim trabalhar sua estrutura independente em flexão. Este comportamento ocorre em menor escala na estrutura espiral, onde todos os fios são torcidos em um mesmo eixo axial, dificultando a acomodação dos fios durante uma solicitação de flexão. Este fenômeno é mais acentuado em tendões.

#### **3.4.1. Cabos Utilizando Fios de AFRP**

Cabos de material compósito utilizando fibras de aramida possuem aplicação no setor de engenharia civil. Algumas das fibras de aramida disponíveis são Technora® (Teijin), Twaron® (Teijin) e Kevlar® (Dupont). Os principais cabos de AFRP comerciais são conhecidos pelos nomes de Technora da Teijin (Japão), Arapree da AKZO (Holanda) e Parafil Ropes da ICI Linear Composites (UK). Os elementos do cabo Technora® são fabricados utilizando a fibra de aramida comercial PPODTA (*poly-para-phenylene-3,4-oxidiphenylene terephthalamide*) impregnada com resina éster-vinílica com uma fração volumétrica de fibras ( $V_f$ ) de aproximadamente 65%. O principal cabo Technora possui a configuração 1×7 com 12,4 mm de diâmetro. Outros produtos comerciais destes cabos utilizam resina epóxi com valores de  $V_f$  entre 35 e 45%, como por exemplo o produto Arapree®, comercializado com fios retangulares ou circulares, com diâmetros de 2,5, 5,0 e 7,5 mm.

#### **3.4.2. Cabos Utilizando Fios de CFRP**

Os principais CFRP comerciais são encontrados com os nomes comerciais de CFCC da Tokyo Rope (Japão) e Leadline da Mitsubishi Plastics (Japão). O produto CFCC (*Carbon Fiber Composite Cable*) é produzido utilizando fibra de carbono PAN e resina epóxi, com um valor de  $V_f$  de 65%. O CFCC (Figura 4) é comercializado com fios com diâmetros de 3,0, 5,0 e 7,5 mm e em cabo espiral com configurações 1 × 7, 1 × 19 e 1 × 37, com diâmetros de 12,5 a 40 mm. A maioria das aplicações na engenharia civil utiliza o cabo 1×7, com fios de 7,5 mm. O cabo comercial Leadline é produzido utilizando fibra de carbono de piche e resina epóxi ( $V_f$

= 65%), comercializado com fios de perfil retangular e perfil circular (diâmetro de 3, 5, 8, 10, 12 e 17 mm).



Figura 4 - Cabo comercial CFCC da empresa Tokyo Rope em diversos tamanhos e aplicações [catálogo Tokyo Rope].

### 3.4.3. Propriedades de Fios e Cabos de Compósitos

A

Tabela 3 apresenta uma compilação de propriedades dos fios de materiais compósitos aplicados a cabos encontrados na literatura. A Tabela 4 apresenta as propriedades dos cabos construídos empregando estes fios. Nestas tabelas as fibras constituintes são carbono, aramida e vidro e os tipos de cabos são espiral (CFCC), multi-pernas (Technora) ou paralelo. Na

Tabela 3, observa-se que os fios de CFRP apresentam a maior resistência (média de 2300 MPa), maior carga de ruptura e maior módulo de elasticidade, porém apresenta densidade mediana e o menor alongamento na ruptura. Os fios de AFRP apresentam menor densidade (média de 1,31 g/cm<sup>3</sup>) e maior alongamento na ruptura, porém baixa resistência e módulo, comparado aos fios de carbono.

Na Tabela 4 observa-se para o cabo CFCC uma média de resistência de 2060 MPa e a carga de ruptura chega a atingir 1410 kN para o cabo de 40 mm. Observa-se também que esta propriedade apresenta valores maiores para os cabos paralelos, que também possuem diâmetros maiores, chegando a 78800 kN para um cabo com 330 mm de diâmetro. Os cabos Technora apresentam propriedades inferiores aos demais de diâmetro similar, e por ser construído a partir de fios de AFRP, apresenta menor rigidez, elevado alongamento na ruptura e menor peso. Os cabos paralelos, apesar de apresentarem maior carga de ruptura, são muito inferiores em solicitações de dobramento/flexão devido ao arranjo dos fios, o que dificulta sua acomodação.

Tabela 3 - Propriedades dos fios de compósitos com diferentes fibras e diferentes fabricantes.

Produto	d <sub>f</sub> (mm)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	σ <sub>T</sub> <sup>*</sup> (MPa)	F* (kN)	E <sub>1</sub> (GPa)	ε <sub>1</sub> <sup>u</sup> (%)	ν <sub>12</sub>	Referências
CFRP	5.0	1550	2450	48	160	1.5	0.30	(Benmokrane et al., 2000)
CFCC	5.0	1600	2700	-	160	1.6	-	(Noisternig, 2000)
CFCC	7.5	-	2120 - 2218	-	137 - 139	1.5 - 1.6	-	(Schmidt et al., 2010)
CFCC	7.5	2100	2120	-	137	1.6	-	(Benmokrane et al., 2000)
CFCC	7.5	-	-	-	137	1.6	-	(Benmokrane et al., 2000)
HR 2500 CFRP	8.0	-	2500	-	165	1.3	-	(Schmidt et al., 2010)
Leadline	7.5	-	2600 - 2906	-	150 - 163	1.3 - 1.8	-	(Schmidt et al., 2010)
Leadline	7.9	1670	2550	-	150	1.3	-	(Benmokrane et al., 2000)
Leadline	7.9	1670	-	104	150	1.3	-	(Schmidt et al., 2010)
Leadline	8.0	-	-	-	147	1.5	-	(Benmokrane et al., 2000)
Leadline	10.0	-	2261	162	147	1.9	-	(Grace et al., 2003)
Leadline	10.0	-	-	205	147	1.9	-	(Grace et al., 2002)
Cabo Paralelo fio único	6.0	1160	-	68	-	-	-	(Sparks et al., 2003)
CFRP Vf60	-	1500	2900	-	88	-	-	(Potyrała, 2004)
CFRP Vf80	-	1700	3400	-	235	-	-	(Potyrała, 2004)
Carbon PAN	-	1600	1930 - 2689	-	130 - 440	-	-	(Potyrała, 2004)
Carbon PITCH	-	1800	1380 - 1480	-	331 - 440	-	-	(Potyrała, 2004)
Technora	1.1	-	-	2	-	-	-	(Dolan et al., 2001)
Technora	7.5	-	2140	-	54	3.7	0.38	(Schmidt et al., 2010)
Technora	8.0	1300	2140	-	54	3.7	0.35	(Benmokrane et al., 2000)
Technora	8.0	1300	-	86	54	3.7	0.35	(Schmidt et al., 2010)
Arapree	7.5	-	1426 - 1506	-	61 - 63	2.1 - 2.2	0.30	(Schmidt et al., 2010)
Arapree	7.5	1250	1506	-	62	2.4	0.38	(Benmokrane et al., 2000)
Arapree	7.5	1250	-	67	62	2.4	0.38	(Schmidt et al., 2010)
Aramid 58	-	1450	1150 - 1380	-	70 - 107	-	-	(Potyrała, 2004)
GFRP	-	2100	720	-	30	-	-	(Potyrała, 2004)
E-glass	-	1900	1030	-	41	-	-	(Potyrała, 2004)
S-2 glass	-	1800	1960	-	52	-	-	(Potyrała, 2004)

onde: ν é o coeficiente de Poisson do material

Tabela 4 - Propriedades dos cabos de compósitos com diferentes fibras de diferentes fabricantes.

Produto	d (mm)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	σ <sub>T</sub> <sup>*</sup> (MPa)	F* (kN)	E <sub>1</sub> (GPa)	ε <sub>1</sub> <sup>u</sup> (%)	Referências
CFCC 1x7	12.5	-	2100	-	137	1.5 - 1.6	(Domenico, 1995)
CFCC 1x7	12.5	-	2460	160	137	1.5	(Grace et al., 2002)
CFCC 1x7	12.7	1517	2413	142	142	1.7	(Grace et al., 2008)
CFCC 1x7	12.5	-	1868	142	137	1.5	(Grace et al., 2003)
CFCC 1x7	12.5	3310	-	142	137.3	1.6	(Schmidt et al., 2010)
CFCC 1x7	12.5	-	-	-	137	1.6	(Benmokrane et al., 2000)
CFCC 1x7	15.2	-	2150	-	137	1.5 - 1.6	(Domenico, 1995)
CFCC 1x7	15.4	-	2200	246	141	1.5	(Noisternig, 2000)
CFCC 1x7	15.2	-	-	-	137	1.6	(Benmokrane et al., 2000)
CFCC 1x37	40	-	1850	1410	127	1.5	(Grace et al., 2002)
CFCC 1x37	40	-	1413	1070	127	1.5	(Grace et al., 2003)
Cabo Paralelo 19	200	2200	-	1290	-	-	(Sparks et al., 2003)
Technora 1x7	10	-	-	94	-	-	(Dolan, et al., 2001)
Technora 1x19	17	-	-	214	-	-	(Dolan, et al., 2001)
Technora 7x7	30	-	-	485	-	-	(Dolan, et al., 2001)

Para aplicação em ancoragem, a máxima carga de ruptura é mais importante do que a rigidez, pois procura-se principalmente resistência em solicitações de tração. No trabalho de Benmokrane *et al.* (2000), apresenta-se os diferentes comportamentos em tração para cabos de compósito comerciais em comparação com um cabo de aço (Figura 5). O cabo Leadline possui a maior rigidez entre os cabos de compósito, perdendo apenas para o cabo de aço, e apresenta a maior tensão de ruptura, seguido do cabo CFCC. Os cabos em compósitos de aramida possuem módulo e resistência inferiores ao Leadline e CFCC.

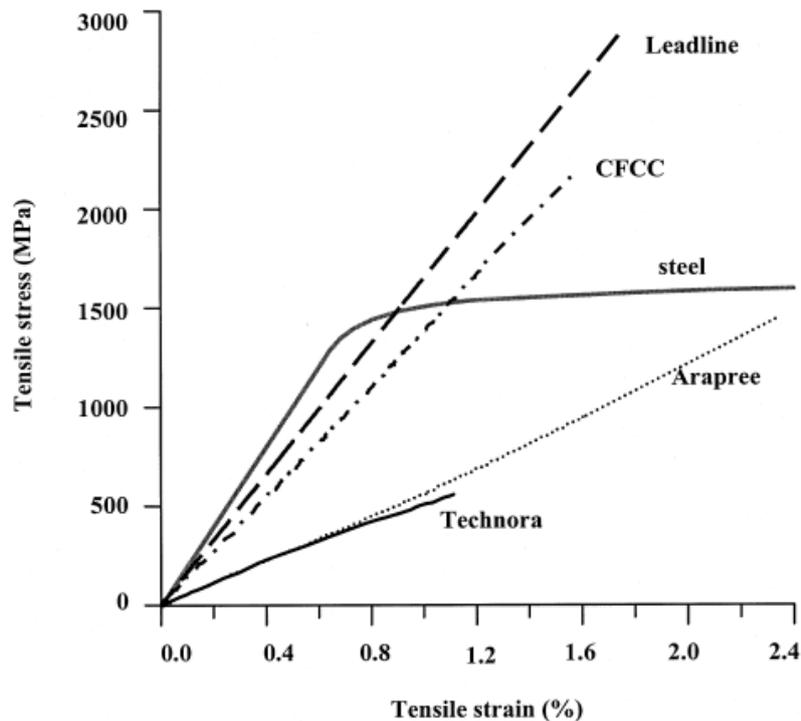


Figura 5 - Comportamento em tração dos diferentes cabos de compósito comparados com um cabo de aço [Benmokrane et al., 2000].

Nos trabalhos de Jackson *et al.* (2004 e 2005), comparam-se diferentes materiais e fabricantes para ancoragem *offshore*. Nestes trabalhos, é apresentado um cabo espiral utilizando 6 camadas de fios de carbono. Não são indicados nos trabalhos teor de fibra, tipo de resina, diâmetro dos fios, comprimento do passo do cabo, além de não estar claras as metodologias de ensaios utilizados, os equipamentos e instrumentos de medição empregados. Contudo, os autores encontraram uma carga de ruptura de 174 ton. Também foi realizado um ensaio de fadiga com 80000 ciclos a 10% e depois a 40% da carga de ruptura. Ao final dos ensaios não foi observado dano no cabo.

No trabalho de Motoya *et al.* (2002) discute-se o comportamento em ensaio dinâmico de um cabo da Tokyo Rope de CFCC 1x7 de 10,5 mm de diâmetro, arquitetura de construção apresentada na Figura 6, com fios de 3 mm de diâmetro compostos de aproximadamente 12000 fibras. Não é indicado o passo do cabo. O autor realizou ensaios de tração em

velocidades diferentes ( $1 \times 10^{-4}$ , 0,10, 0,34, 1,17 e 4,00 m/s), utilizando duas a cinco amostras em cada condição.

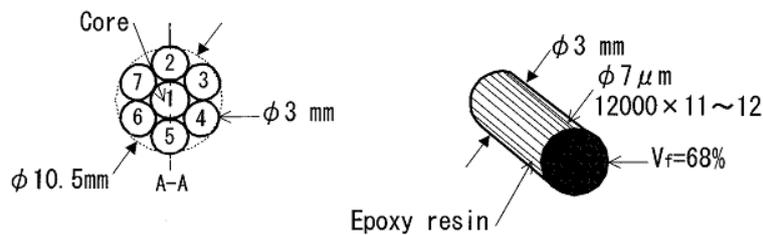


Figura 6 - Especificações do cabo CFCC 1x7 estudado no trabalho de Motoya et al. [2002].

No ensaio estático ( $1 \times 10^{-4}$  m/s), a tensão de ruptura foi de 114,5 kN e a deformação na ruptura foi de 1,35%. O aspecto do cabo rompido após o ensaio (Figura 7) indica que não houve região preferencial na fratura, pois as sete pernas romperam em regiões diferentes. A deformação na ruptura para os ensaios nas demais velocidades foi similar ao ensaio estático, com valores próximos a 1,35%. Os autores concluíram que à medida que a velocidade do ensaio aumenta o cabo fica mais sensível a concentrações de tensões geradas pela soquetagem.

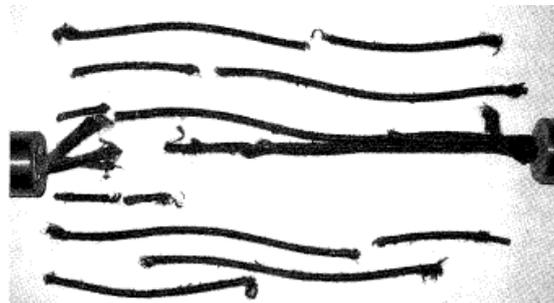


Figura 7 - Cabo rompido após a realização de ensaios estático (a  $1 \times 10^{-4}$  m/s) [Motoya et al., 2002].

Nos trabalhos de Sparks et al. (2003) e Noisternig (2000), foram avaliados cabos paralelos (tendões) em aplicações da engenharia civil. No primeiro, os autores apresentam um produto comercial chamado 3C-Tendons™, inicialmente destinado à ancoragem de plataformas *Tension Leg Platform* (TLP). Estes tendões são compostos da união de sub-cabos contendo 19 fios de 6 mm de diâmetro cada. Para o tendão final, a quantidade de sub-cabos variou entre 13 e 61. Estes fios são produzidos utilizando a FC T700 (de alta resistência) e resina epóxi, o  $V_f$  não é informado. Cada sub-cabo possui uma capa protetora feita de Polietileno de Alta Densidade e os espaços entre os fios são preenchidos com um polímero incompressível à prova d'água.

De acordo com os autores, os fios individuais deste cabo podem ser bobinados em um diâmetro de 2 m e um sub-cabo com 19 fios, em um diâmetro de 3,5 m. Um sub-cabo de 19

fios suporta uma carga de ruptura de 1290 kN, rigidez  $Ea$  de 80 MN, peso linear no ar de 1,16 kg/m e na água de 0,33 kg/m. As propriedades dos tendões finais estimadas para cada construção do cabo estão apresentadas na Tabela 5. Também foram realizados ensaios de fadiga com 2,2 milhões ciclos a 17% e 25% da carga de ruptura e nenhuma falha ou dano foi identificado. Este produto é utilizado em pontes, mas não foi empregado, nem proposto o uso, em ancoragem *offshore*. Provavelmente por não haver uma necessidade nos mercados europeus e norte-americanos, onde plataformas em águas ultra-profundas são menos empregadas em comparação ao mercado brasileiro.

Tabela 5 - Propriedades dos tendões finais, [Sparks et al., 2003].

Quantidade de sub-cabos (19 fios)	13	19	31	37	61
Carga de ruptura (kN)	16800	24500	40000	47800	78800
Rigidez $Ea$ (MN)	1050	1530	2500	3000	4900
Peso no ar (kg/m)	16	22	38	45	73
Peso na água (kg/m)	4,3	6,3	10,3	12,3	20,2
Diâmetro (mm)	180	200	245	270	330

Como observado, há diversos estudos relatando o comportamento de cabos de compósito em tração. Entretanto, em flexão, os trabalhos relevantes são poucos. Menezes et al., (2017b) recentemente realizou um estudo numérico e experimental em cabos *sea/le* CFRP 1×19 em tração e flexão. Seu modelo numérico não conseguiu acompanhar o comportamento experimental do cabo ao longo da aplicação do carregamento, como observado na Figura 8, onde os resultados experimentais mostram um comportamento não linear dos cabos. Contudo, na região linear (momento inferior a 20 N.m), o modelo apresentou boa concordância com os experimentos.

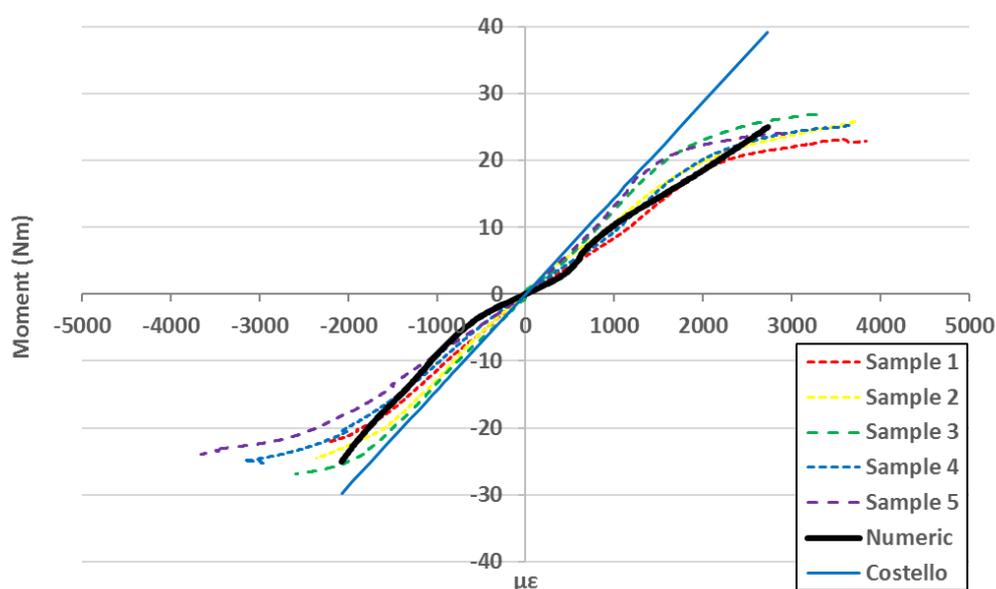


Figura 8 - Comportamento do cabo 1×19 em flexão [Menezes et al., 2017b].

### 3.4.4. Aplicações de Cabos de Compósitos

A grande maioria dos trabalhos relacionados à aplicação de cabos de compósitos na literatura são na indústria civil, relatando estudos do seu emprego em estruturas. Pode-se citar os trabalhos de Ortega et al. (2017), Fabbrocino et al. (2016), Wang et al. (2015), Cai e Aref (2015), Shi et al. (2015), Son et al. (2013), Wu e Yan (2011), Xiong et al. (2011), Liang e Wu (2011), Schmidt et al. (2010), Wu e Wang (2008), Rohleder et al. (2008), Woo et al. (2008), Tuakta (2004), Corte e Bogaert (2004), Grace et al. (2003 e 2002), Zhang et al. (2001) e Dolan et al. (2001) e Dominico (1995).

No trabalho de Meier (2012), o autor defende o uso de cabos de fibras de carbono em aplicações da engenharia civil, de pontes a cabos de energia. O autor cita como desvantagens principais os altos fatores de segurança ainda aplicados para estruturas em compósito e o alto custo comparado a cabos de aço. Também sugere que cabos de CFRP podem ser empregados em pontes suspensas devido à sua elevada resistência mecânica e à corrosão e conclui que, em teoria, para fins comparativos, enquanto uma ponte de aço tradicional suportaria um vão de 7,7 km, a mesma ponte suportaria 37,5 km se construída com cabos de CFRP.

A Figura 9 apresenta um exemplo destes cabos aplicados à uma ponte que continua em funcionamento, mostrando que a engenharia civil já possui confiança na utilização destes materiais em grandes estruturas, sendo um material consolidado e amplamente empregado.

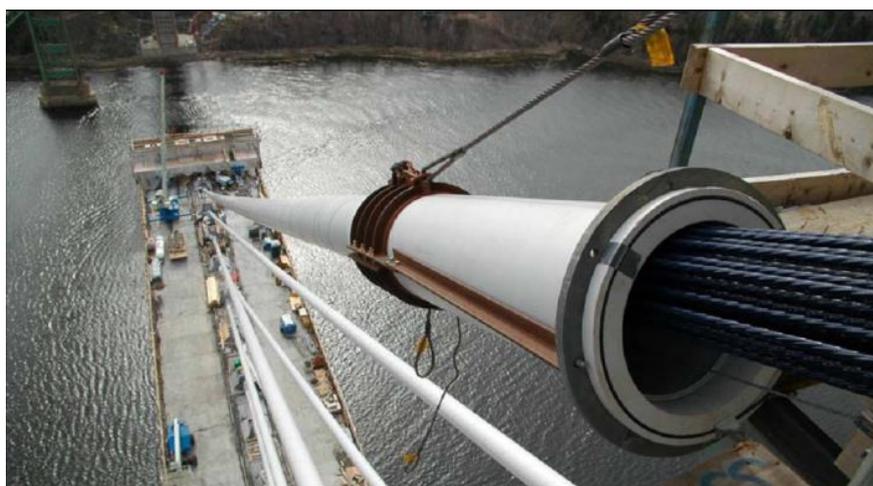


Figura 9 - Cabos utilizando fios de carbono sendo aplicados em estrutura na construção civil [Rohleder et al., 2008].

Uma possível área de aplicação para estes novos cabos são em plataformas *offshore*. Atualmente no Brasil as plataformas de produção mais utilizadas são do tipo Semi-Submersíveis (SS) e as Unidades Flutuantes de Armazenamento e Transferência (*Floating Production Storage and Offloading* – FPSO). As SS são plataformas com estruturas flutuantes

largamente empregadas para perfuração e produção. Outras plataformas utilizadas para perfuração e extração incluem *Spar*, *Floating Production System (FPS)* e *Tension Leg Platform (TLP)*, observadas na Figura 10. A TLP, por exemplo, consiste numa estrutura similar à SS, sendo mantida na locação através de tirantes (tendões) que são ancorados no fundo através de estacas e tracionadas no topo pela força resultante entre peso e empuxo (restauração hidrostática).

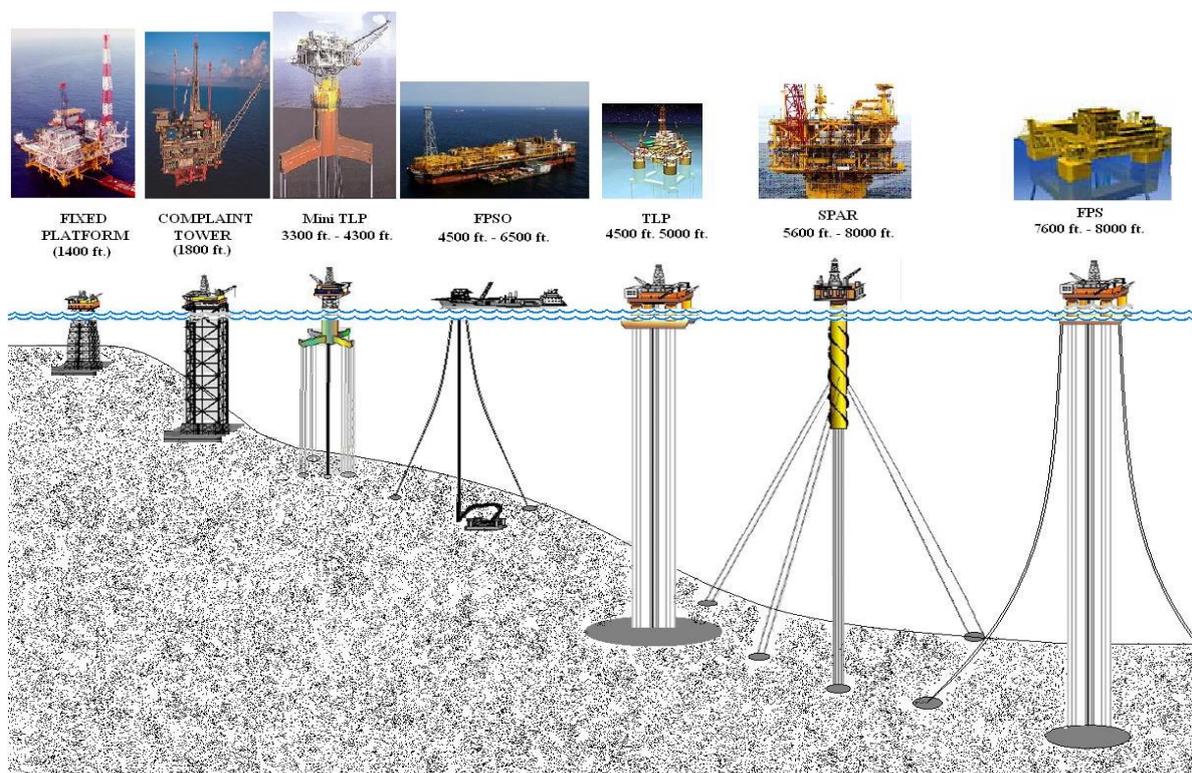


Figura 10 - Diferentes tipos de plataformas de perfuração e produção de petróleo [site ScienceDaily.com].

As SS podem ser ancoradas de duas maneiras: utilizando cabos em catenária (convencional) ou cabos em *taut-leg*, mostradas na Figura 11. A ancoragem em catenária mantém a unidade flutuante em uma posição através da força de restauração das linhas que é gerada pela inércia, ou seja, a massa da linha de ancoragem tende a retorná-la ao seu estado inercial de equilíbrio. Para atender aos critérios de projeto para passeio das unidades flutuantes ancoradas, é necessário um raio de ancoragem razoavelmente grande. Isto gera o congestionamento de linhas de unidades próximas em um campo de exploração de petróleo, interferindo diretamente no posicionamento das mesmas, e dos equipamentos submarinos (Girón, 2009).

A ancoragem em *taut-leg* mantém a unidade flutuante em uma posição através da força de restauração das linhas, porém diferentemente da catenária, esta força é gerada devido à elasticidade do material da linha. Ou seja, devido ao seu estado tensionado. A

ancoragem é feita geralmente por linhas de cabos de aço e cabos de fibras sintéticas, que se encontram esticadas com um ângulo de topo de aproximadamente  $45^\circ$  com a vertical, tendo assim, uma projeção horizontal da mesma ordem de grandeza da lâmina d'água, o que é uma vantagem em águas profundas. Às vezes é utilizada uma variante denominada *semi-Taut-Leg*, em que uma parte do trecho inferior da linha é apoiado no fundo e que, dependendo dos deslocamentos horizontais da unidade, o comprimento apoiado varia. Atualmente, projeta-se novas concepções para evitar ancoragens com grande projeção horizontal para águas profundas e ultra-profundas, por exemplo, usando ancoragens de raio ultracurto (Gión, 2009).

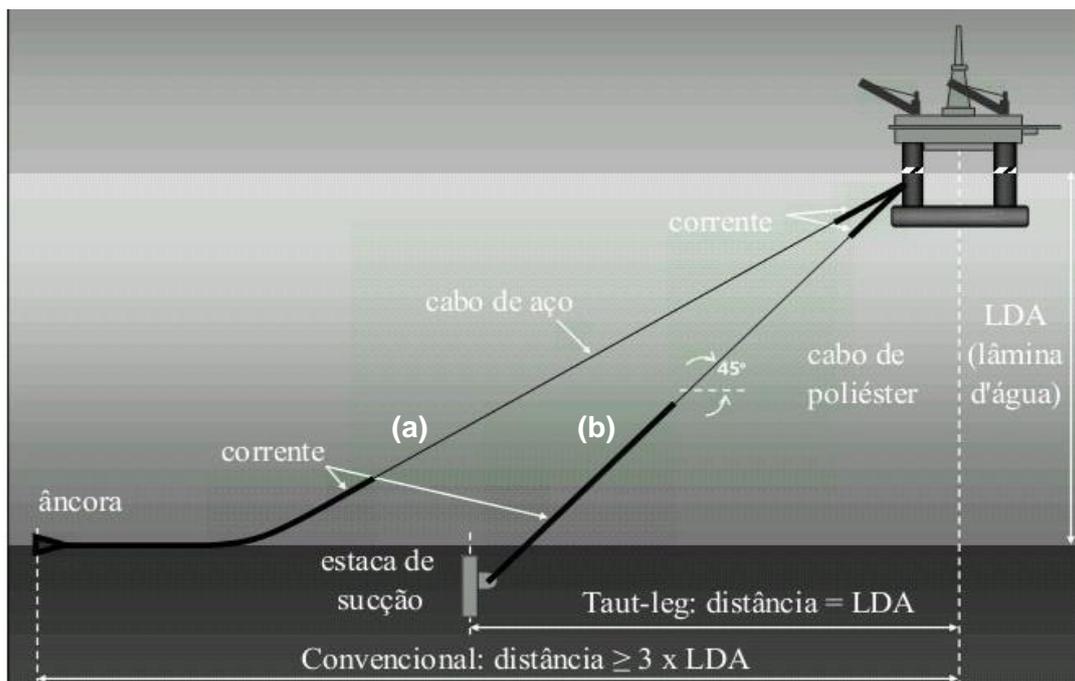


Figura 11 - Cabo em catenária (a) e cabo em taut-leg (b) [Gión, 2009].

Segundo o relatório *Wire Rope Offshore* (Chaplin e Potts, 1991), o uso a longo prazo de cabos para ancoragem de grandes estruturas *offshore* tem duas grandes particularidades em relação a outras aplicações desse componente estrutural: (i) o tipo e espectro da carga de fadiga, e (ii) imersão permanente da maior parte do cabo no mar. Cabos para ancoragem de plataformas devem possuir capacidade de resistir a cargas de tração e de flexão, com grandes variações de frequência no carregamento. O tempo de serviço esperado é da ordem de dezenas de anos, e os coeficientes de segurança de projeto variam de 3 a 6 (Chaplin e Potts, 1991). Assim, observa-se um campo de aplicação em potencial para cabos de compósitos ainda não explorado.

### 3.5. Modelos Analíticos para Cabos

A criação de um modelo analítico para prever a resposta mecânica de cabos é um desafio de décadas, pois trata-se de um problema complexo, principalmente devido a sua geometria, aos seus diversos componentes interagindo entre si, aos diferentes comprimentos de passo (passo dos fios e passos das pernas), o que gera diferentes ângulos de contato entre os fios. Além disso no caso de materiais compósitos, há ainda seu comportamento ortotrópico.

Até meados dos anos 30, todos os trabalhos significativos sobre cabos de aço e cordas eram experimentais, com ensaios de fadiga e de carga estática. Devido à diversas limitações, era necessário utilizar grandes fatores de segurança para assegurar o uso satisfatório de cabos de aço (Conci *et al.*, 1998). Hruska (1952,1953) publicou trabalhos examinando as forças radiais e tangenciais entre fios e pernas do cabo, iniciando os estudos sobre as tensões de contato entre fios. Leissa (1959) conseguiu expressar as forças radiais entre pernas e fios em função da carga aplicada e da geometria do cabo. Starkey e Cress (1959) publicaram um trabalho considerando as tensões críticas e os modos de falha de cabos de aço.

Durante as décadas de 60 e 70, alguns pesquisadores como, Hall (1961), Bert e Stein (1962), Durelli *et al.* (1972) e Machida *et al.* (1973) fizeram contribuições significativas para a teoria de cabos de aço. O equacionamento completo e a modelagem relacionada a cabos de aço foram apresentados por Phillips e Costello (1973) a partir do equilíbrio de uma haste delgada. A solução da modelagem analítica de um fio em forma de hélice, como os fios de uma perna em um cabo de aço, foi apresentada em uma série de artigos (Phillips e Costello, 1973 e 1977; Costello e Phillips, 1976; Costello e Sinha, 1977a e 1977b). Velinsky *et al.* (1984), apresentaram uma contribuição fundamental à teoria de cabos, linearizando as equações desenvolvidas por Costello e Phillips (1976) em construções do tipo *seale* com alma interna do cabo em aço, viabilizando desta forma aplicações de geometrias mais complexas. Costello e Phillips (1985) generalizaram o método de Velinsky para qualquer tipo de construção que contivesse uma alma interna do cabo em aço. Esta teoria foi complementada por Le Clair e Costello (1988), Costello (1997), Huang e Vinogradov (1992,1994) e Kumar *et al.* (1997) com a introdução da consideração do atrito entre os fios.

Utting e Jones (1987a, 1987b) realizaram um extenso trabalho experimental para solicitação em tração de cabos de aço e compararam com seu modelo analítico, obtendo razoável concordância. Embora o modelo considere o efeito do atrito, a variação da área de contato e a localização dos pontos onde o contato ocorre à medida que o cabo vai sendo solicitado axialmente, tornam seu modelo de atrito excessivamente simplificado. Medidas de deformação foram feitas nos cabos utilizando *strain gauge*, constatando que nos fios externos a tensão é consideravelmente maior perto dos engastes. Observaram também que cabos

engastados em ambas as extremidades apresentaram menor extensão que cabos engastados em apenas uma extremidade e com a outra com rotação livre. Os resultados experimentais de Utting e Jones (1987a, 1987b) são muito consistentes e por isso amplamente referenciados e estudados até de hoje.

Costello (1997) compilou em seu livro suas as soluções analíticas desenvolvidas ao longo de décadas para cabos com uma ou mais camadas, solicitados em tração, flexão e fadiga. No entanto, a solução apresentada por ele despreza o atrito entre os fios e o deslocamento relativo entre eles, a rotação em torno da alma e também assume o material isotrópico. Mesmo assim, o modelo de Costello (1997) é um dos mais utilizados. Ele foi empregados, por exemplo, nos trabalhos de Fontanari et al. (2015), Stanova et al. (2015), Zhu et al. (2015), Zhou e Tian (2013), Jiang (2012), Beltrán e Williamson (2011), Erdonmez e Imrak (2011, 2009), Stanova et al. (2011a, 2011b), Páczelt e Beleznai, (2011), Argatov (2011), Imrak e Erdonmez (2010), Usabiaga e Pagalday (2008), Sun et al. (2008), Elata et al. (2004), Crossley et al. (2003), Jiang et al. (2000), Nawrocki e Labrosse (2000), Raof e Kraincanic (1998), Sathikh et al. (1996) e Utting e Jones (1985, 1987a, 1987b). Costello afirma também que a maior parte da carga para um cabo  $1 \times 7$  é recebida pelo fio da alma do cabo.

Usabiaga e Pagalday (2008) propuseram um modelo analítico baseado na teoria de vigas, e compararam seus resultados com o modelo de Costello, que despreza o efeito de Poisson. Seu modelo baseia-se na teoria de barras proposto por Love (1944), mas ao contrário da maioria dos modelos anteriores, trata os fios das pernas externas, com igual severidade, evitando simplificações. Isso traz uma diferença significativa em relação ao de Costello para o caso de torque induzido nas extremidades do cabo. Usabiaga e Pagalday (2008) também verificaram um maior torque gerado na construção utilizando torção *Lang*, uma vez que não utilizaram a simplificação de rotação desprezível nos fios do cabo.

Mais recentemente, Elata et al. (2004) elaboraram um modelo analítico utilizando o teorema da reciprocidade de Betti e o validaram experimentalmente. Analisaram a importância do atrito no comportamento simultâneo em tração e torque através de dois casos extremos, o primeiro considerando fios idealmente lubrificadas (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. Stanova et al. (2011a) realizou uma completa dedução analítica tanto para cabos simples (apenas uma perna) como para cabos complexos multi-pernas empregando diferentes tamanhos de fios e diferentes valores de passos. Seu modelo provou a importância dos fatores de correção implementados pelos autores no conjunto de equações paramétricas empregadas. Este trabalho foi continuado em Stanova et al. (2011b), que desenvolveram um modelo numérico para o mesmo problema.

Embora haja uma grande variedade de soluções analíticas na literatura para cabos utilizando materiais isotrópicos, não se pode dizer o mesmo para cabos anisotrópicos. Hobbs e Raoof (1982) foram os primeiros a realizar um estudo em cordas considerando as relações constitutivas de uma lâmina ortotrópica, como estes cabos possuem um número muito grande de componentes, o modelo desconsiderava o momento de torção e torque individual das fibras. Pan (1992 e 1993) e Pan e Brookstein (2002) desenvolveram um modelo para cordas de fibras curtas empregando relações constitutivas para materiais transversalmente isotrópicos que considera: (i) os efeitos de escorregamento entre fios, (ii) o complexo mecanismo de transferência de tensões entre as fibras e (iii) as descontinuidades das fibras destes tipos de cabos. Concluíram que a tensão axial e a pressão lateral não são constantes ao longo do cabo, e que as variáveis que mais influenciaram as propriedades finais do cabo foram o módulo de elasticidade, a quantidade de fibras, o comprimento e o fator de aspecto das fibras por perna, além do coeficiente de atrito entre as fibras. Pan (1996) utilizou teorias já aplicadas em materiais compósitos poliméricos híbridos (dois reforços distintos no mesmo sistema) para expandir a aplicação do seu modelo para cordas empregando mais de um tipo de fibra. Os trabalhos citados não apresentam validação experimental.

Um dos estudos mais completos para cordas utilizando relações constitutivas de materiais não-isotrópicos foi realizado por Ghoreishi et al. (2007b, 2007c) que desenvolveram um modelo analítico e outro numérico para a análise estática de tração de cordas de geometria simples (apenas uma perna), comparando seus resultados com resultados experimentais e outros modelos analíticos. Em seu modelo analítico, os autores desconsideraram o coeficiente de atrito entre os fios e os efeitos do coeficiente de Poisson e citam que isto pode justificar que os resultados do modelo tenham ficado com uma rigidez maior do que os resultados experimentais. Contudo, houve boa correlação entre a rigidez axial do modelo e das cordas ensaiadas experimentalmente.

Com relação a modelos analíticos que contemplem a solicitação em flexão de cabos, o trabalho de Crossley et al. (2003) trouxe um modelo para materiais transversalmente isotrópicos discutindo sua aplicação em materiais compósitos, considerando passo constante, fios perfeitamente unidos ou sem atrito, e fios comportando-se como cascas cilíndricas. Foi determinada pelos autores a solução analítica para os problemas de flexão simples e flexão sobre carregamento uniforme, não apresentando, entretanto, comparação com resultados experimentais ou numéricos.

### **3.5.1. Deduções Simplificadas de Modelos Analíticos para Cabos de Aço**

A fim de avaliar e comparar diferentes modelos para cabos de aço, as equações dos principais modelos são brevemente apresentadas a seguir de maneira padronizada e

adimensional, utilizando a notação de Ghoreishi *et al.* (2007a). Nesta notação o comportamento elástico de um cabo é expresso pela Equação (1).

$$\begin{Bmatrix} F \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\varepsilon\varepsilon} & k_{\varepsilon\theta} \\ k_{\theta\varepsilon} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{z,z} \\ \theta_{z,z} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

onde  $u_{z,z}$  e  $\theta_{z,z}$  são a deformação axial por unidade de comprimento do cabo e o ângulo de torção por unidade de comprimento, respectivamente,  $F$  é a força axial e  $M_z$ , o torque. Os quatro componentes da matriz rigidez  $k_{\varepsilon\varepsilon}$ ,  $k_{\theta\theta}$ ,  $k_{\theta\varepsilon}$  e  $k_{\varepsilon\theta}$  são tração pura, torsão pura e os 2 termos de acoplamento, respectivamente. Nesta equação, ressalta-se as implicações caso determinados modelos apresentem a matriz rigidez (i) assimétrica e (ii) diagonal. No primeiro caso, implicaria em uma resposta igualmente assimétrica do cabo, pois com os termos de acoplamento desiguais ( $k_{\varepsilon\theta} \neq k_{\theta\varepsilon}$ ) diferentes deformações serão geradas dependendo do sentido de aplicação da sollicitação, como investigado por Samras *et al.* (1974). No segundo caso, os termos de acoplamentos  $k_{\varepsilon\theta} = k_{\theta\varepsilon} = 0$ , assim, não haveria uma relação entre efeitos de acoplamento tração/torção agindo no cabo, ou seja, os graus de liberdade do sistema estariam desacoplados.

A relação entre o ângulo complementar da hélice ( $\beta$ ) e o comprimento do passo é apresentada na Equação (2), onde  $r$  é o raio do fio e os índices C e FE referem-se ao fio central e aos fios externos, respectivamente.

$$H_C = \frac{2\pi(r_C + r_{FE})}{\tan \beta} \quad (2)$$

**a) Modelo de Hruska (1953):** Este modelo considera apenas tração pura, desconsiderando rigidez de flexão e torção dos fios e usa relações puramente geométricas. A deformação axial do fio  $u_{t,t}$ , é apresentada na Equação (3). Os componentes da matriz rigidez são apresentados nas Equações (4 – 6).

$$u_{t,t} = u_{z,z} \cos^2 \beta + r_{FE} \theta_{z,z} \sin \beta \cos \beta \quad (3)$$

$$k_{\varepsilon\varepsilon} = (Ea)_C + 6(Ea)_{FE} \cos^3 \beta \quad (4)$$

$$k_{\varepsilon\theta} = k_{\theta\varepsilon} = 6(Ea)_{FE} r_{FE} \cos^2 \beta \sin \beta \quad (5)$$

$$k_{\theta\theta} = (J)_C + 6r_{FE}^2 \sin^2 \beta \cos \beta \quad (6)$$

onde  $(Ea)$  e  $(J)$  são a rigidez axial e de torsão, respectivamente.

**b) Modelo de McConnell e Zemek (1982):** McConnell e Zemek modificaram o modelo de Hruska (1953) adicionando a rigidez de torção de cada fio individualmente. O termo  $k_{\theta\theta}$  é apresentado na Equação (7), enquanto as relações para  $k_{\varepsilon\varepsilon}$ ,  $k_{\theta\varepsilon}$  e  $k_{\varepsilon\theta}$  continuam as mesmas.

$$k_{\theta\theta} = (J)_c + 6(J)_{FE} + 6(Ea)_{FE}r_{FE}^2 \text{sen}^2\beta \cos\beta \quad (7)$$

**c) Modelo de Machida et al. (1973):** Machida et al. (1973) estudaram os efeitos de dobramento e torção dos fios individuais e obtiveram os momentos de flexão e de torção, Equações (8) e (9).

$$k_{\theta\varepsilon} = 6 \left( (Ea)_{FE}r_{FE} \cos^2\beta \text{sen}\beta - 2 \frac{(Ea)_{FE}}{r_{FE}} \cos^2\beta \text{sen}^3\beta + \frac{(J)_{FE}}{r_{FE}} \cos^2\beta \text{sen}\beta (1 - 2\cos^2\beta) \right) \quad (8)$$

$$k_{\theta\theta} = (J)_c + 6((Ea)_{FE}r_{FE}^2 \text{sen}^2\beta \cos\beta + 2(Ea)_{FE} \cos^3\beta \text{sen}^2\beta + (J)\cos^3\beta(1 - \text{sen}^2\beta)) \quad (9)$$

**d) Modelo de Knapp (1979):** Knapp (1979) apresentou uma nova matriz de rigidez para um cabo sujeito a tração e torsão, e estudou a compressibilidade do núcleo. As equações de equilíbrio primeiramente consideraram matriz não-linear e depois apresentaram uma matriz linear, com os termos apresentados nas Equações (10 – 13).

$$k_{\varepsilon\varepsilon} = (Ea)_c + 6(Ea)_{FE} \cos^3\beta \xi \quad (10)$$

$$k_{\varepsilon\theta} = 6(Ea)_{FE}r_{FE} \text{sen}\beta \cos^2\beta \eta \quad (11)$$

$$k_{\theta\varepsilon} = 6 \left( (Ea)_{FE}r_{FE} \text{sen}\beta \xi - \frac{(EI)}{r_{FE}} (\lambda + 2\xi) \text{sen}^3\beta + \frac{(J)}{r_{FE}} (1 - 2\xi) \text{sen}\beta \cos^2\beta \right) \quad (12)$$

$$k_{\theta\theta} = (J)_c + 6 \left( (Ea)_{FE}r_{FE} \eta \text{sen}\beta - \frac{(EI)_{FE}}{r_{FE}} \left( \mu + 2\eta - \frac{2r_{FE}}{\tan\alpha} \right) \text{sen}^3\beta + \frac{(J)_{FE}}{r_{FE}} \left( \frac{r_{FE}}{\tan\alpha} - 2\mu \right) \text{sen}\alpha \cos^2\beta \right) \quad (13)$$

onde  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\lambda$  e  $\mu$  são parâmetros definidos pelo autor em seu trabalho, relacionados à geometria e às propriedades elásticas do cabo.

**e) Modelo de Kumar e Cochran (1987):** Kumar e Cochran (1987) linearizaram as equações de Costello (1997) e chegaram à matriz de rigidez, cujos elementos são apresentados nas Equações (14 – 21).

$$k_{\varepsilon\varepsilon} = (Ea)_c + 6(Ea)_{FE} \cos \beta (1 - (1 + \nu)p \operatorname{sen}^2 \beta) \quad (14)$$

$$k_{\varepsilon\theta} = 6(Ea)_{FE}(r_c + r_{FE}) p \cos^2 \beta \operatorname{sen} \alpha \quad (15)$$

$$k_{\theta\varepsilon} = 6 \left( (Ea)_{FE}(r_c + r_{FE}) \operatorname{sen} \beta - \frac{(EI)_{FE}}{(r_c + r_{FE})} \operatorname{sen} \beta (1 - \nu_f \cos^4 \beta) + (1 + \nu)(q - 1 + \nu_f \cos^4 \beta) \right) \quad (16)$$

$$k_{\theta\theta} = (J)_c + 6(EI)_{FE} q \cos \beta \quad (17)$$

onde:

$$p = (1 - \nu_l) \left( 1 - (1/4) \left( \frac{r_{FE}}{r_c + r_{FE}} \right)^2 (1 + \nu_f \cos 2\beta) \cos^2 \beta \right) \quad (18)$$

$$q = (1 - \nu_l) \left( 4 \left( \frac{r_{FE}}{r_c + r_{FE}} \right)^2 \operatorname{sen}^2 \beta + 1 - \operatorname{sen}^4 \beta - \nu_f \cos^4 \beta \cos 2\beta \right) \quad (19)$$

e:

$$\nu_l = \nu \left( \frac{r_{FE}}{r_c + r_{FE}} \right) \operatorname{sen}^2 \beta \quad (20)$$

$$\nu_f = \nu / (1 + \nu) \quad (21)$$

**f) Modelo de Sathikh et al. (1996):** Sathikh et al. (1996) concentraram-se na assimetria das matrizes dos modelos anteriores. Eles criaram um modelo simétrico, elástico e linear usando o teorema de Ramsey (1988). Um cabo de núcleo rígido considerando apenas o contato dos fios com o núcleo foi analisado levando em consideração tensão, torção e momento do fio juntos, para um carregamento axisimétrico (tração – torção). Os termos da matriz de rigidez são apresentados nas Equações (22 – 24).

$$k_{\varepsilon\varepsilon} = (Ea)_c + 6 \left( (Ea)_{FE} \cos^3 \beta + (J)_{FE} \operatorname{sen}^2 \beta + (EI)_{FE} \cos^2 \beta \frac{\operatorname{sen}^4 \beta \cos \beta}{r_c + r_{FE}} \right) \quad (22)$$

$$k_{\varepsilon\theta} = k_{\theta\varepsilon} = 6 \left( (Ea)_{FE}(r_c + r_{FE}) \cos^2 \beta \operatorname{sen} \beta + (J)_{FE} \cos^2 \beta - (EI)_{FE} (1 + \cos^2 \beta) \frac{\operatorname{sen}^3 \beta \cos^2 \beta}{r_c + r_{FE}} \right) \quad (23)$$

$$k_{\theta\theta} = (J)_c + 6((Ea)_{FE}(r_c + r_{FE}) \operatorname{sen}^2 \beta \cos \beta + (J)_{FE} \cos^7 \beta + (EI)_{FE} \operatorname{sen}^2 \beta \cos \beta (1 + \cos^2 \beta)^2) \quad (24)$$

**g) Modelo de Costello (1997):** O modelo de Costello (1997), citado anteriormente neste trabalho, baseia-se nas equações de vigas curvadas de Love (1944), considerando os efeitos das variações de ângulo e momento de flexão e torção dos fios. O equilíbrio é expresso utilizando uma série de equações não-lineares que também são aplicáveis para grandes deslocamentos. Para cabos 1x7, assume-se que a variação do comprimento do passo é pequena. Lineariza-se os termos  $u_{z,z}$ ,  $\theta_{z,z}$ ,  $\Delta k'$  (curvatura por unidade de comprimento) e  $\Delta \tau$  (torção por unidade de comprimento) pelos seus respectivos  $\Delta \beta$ . Considerando a dedução completa do modelo (Costello, 1997), as relações para cada fio podem ser descritas pelas Equações (25 – 28), e o comportamento mecânico local de cada fio por é dado pelas Equações (29 - 32).

$$u_{z,z} = u_{t,t} + \Delta \alpha \tan \beta \quad (25)$$

$$(r_C + r_{FE})\theta_{z,z} = u_{t,t} \tan \beta - \Delta \beta + \nu \tan \beta \frac{(r_C u_{z,z} + r_{FE} u_{t,t})}{(r_C + r_{FE})} \quad (26)$$

$$r_{FE} \Delta k' = - \frac{2 \operatorname{sen} \beta \cos \beta}{((r_C + r_{FE})/r_{FE})} \Delta \beta + \nu \frac{r_C u_{z,z} + r_{FE} u_{t,t}}{(r_C + r_{FE})} \frac{\operatorname{sen}^2 \beta}{((r_C + r_{FE})/r_{FE})} \quad (27)$$

$$r_{FE} \Delta \tau = \frac{1 - 2 \cos^2 \beta}{((r_C + r_{FE})/r_{FE})} \Delta \beta + \nu \frac{r_C u_{z,z} + r_{FE} u_{t,t}}{(r_C + r_{FE})} \frac{\operatorname{sen} \beta \cos \beta}{(r_C + r_{FE})/r_{FE}} \quad (28)$$

$$H = (J)_{FE} \Delta \tau \quad (29)$$

$$Z = (EI)_{FE} \Delta k' \quad (30)$$

$$T = (Ea)_{FE} u_{t,t} \quad (31)$$

$$N = H \frac{\operatorname{sen}^2 \beta}{(r_C + r_{FE})} - Z \frac{\operatorname{sen} \beta \cos \beta}{(r_C + r_{FE})} \quad (32)$$

onde N é a força cisalhante por unidade de comprimento, T a tensão axial por unidade de comprimento, Z é o momento de flexão por unidade de comprimento e H é o momento de torção por unidade de comprimento.

Assim, a força axial (F) e o torque ( $M_z$ ) para o cabo são descritos na Equação (33) e (34).

$$F = (Ea)_C u_{z,z} + 6(N \cos \beta + T \operatorname{sen} \beta) \quad (33)$$

$$M_z = (J)_C \theta_{z,z} + 6(H \cos \beta + G \operatorname{sen} \beta + (r_C + r_{FE})T \operatorname{sen} \beta + (r_C + r_{FE})N \cos \beta) \quad (34)$$

Por fim, para se obter os componentes da matriz rigidez, as Equações (25) e (26) permitem que a deformação axial de um fio ( $u_{t,t}$ ) e a variação do ângulo complementar da hélice ( $\beta$ ) sejam expressas em função das deformações globais do cabo ( $u_{z,z}$  e  $\theta_{z,z}$ ). Assim,

substituindo as Equações (29 – 32) nas Equações (33) e (34), tem-se o comportamento global do cabo.

**h) Modelo de Labrosse (1998):** Labrosse (1998) apresentou um novo modelo analítico para prever o comportamento global de um cabo de aço sujeito a esforços de tração, flexão e torção. Em seu trabalho, o mais recente modelo analítico relevante de cabos de aço, as tensões ao longo da seção transversal são apresentadas em função da deformação generalizada do cabo e das derivações do deslizamento entre os fios. Os termos da matriz de rigidez são apresentados nas Equações (35 – 37).

$$k_{\varepsilon\varepsilon} = (Ea)_c + 6(Ea)_{FE} \cos^3 \beta \quad (35)$$

$$k_{\varepsilon\theta} = k_{\theta\varepsilon} = 6(Ea)_{FE} (r_c + r_{FE}) \sin \beta \cos^2 \beta \quad (36)$$

$$k_{\theta\theta} = (J)_c + 6((Ea)_{FE} (r_c + r_{FE})^2 \sin^2 \beta \cos \beta + (J)_{FE} \cos^5 \beta + (EI)_{FE} \sin^2 \beta \cos \alpha (1 + \cos^2 \beta)) \quad (37)$$

Ghoreishi *et al.* (2007a) fizeram um comparativo entre os principais modelos analíticos para cabos de aço em solicitação de tração, resumido na Tabela 6. Os modelos de Kumar e Cochran (1987) e Costello (1997) destacam-se por apresentarem resposta à todas solicitações estudadas bem com consideram o efeito do Coeficiente de Poisson. Os autores observaram que os modelos estudados apresentam resultados satisfatórios para comprimento de passos grandes, ou seja,  $\beta$  menores que  $20^\circ$  (ângulo da hélice  $\alpha < 70^\circ$ ), acima deste valor acredita-se que o efeito de Poisson na geometria do cabo é mais significativo. Para análises precisas com  $\beta$  acima de  $20^\circ$ , os autores recomendam o uso de modelos numéricos.

Tabela 6 - Principais diferenças entre os modelos estudados por Ghoreishi *et al.* (2007a).

	Comportamento dos cabos			$\nu$
	Tração	Torção	Flexão	
Hruska (1952, 1953)	✓	-	-	-
Machida <i>et al.</i> (1973)	✓	✓	✓	-
McConnel e Zemek (1982)	✓	✓	-	-
Knapp (1979)	✓	✓	✓	-
Kumar e Cochran (1987)	✓	✓	✓	✓
Sathikh <i>et al.</i> (1996)	✓	✓	✓	-
Costello (1997)	✓	✓	✓	✓
Labrosse (1998)	✓	✓	✓	-

## 3.6. Método de Elementos Finitos Aplicados a Cabos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) destacou-se como método de análise universalmente aceito para projetos estruturais (Friswell e Mottershead, 1996). O MEF é utilizado na análise de cabos de aço há décadas e geralmente apresenta resultados mais completos comparados aos resultados gerados através de modelos analíticos.

### 3.6.1. Tração de Cabos

Jiang e Henshall (1999) realizaram estudos sobre a influência das terminações e fenômenos de contato em cabos de aço, tanto para a condição de contorno ponta-fixa como para ponta-livre. Neste trabalho, assim como em Jiang et al. (1999) e (2000), os autores desenvolveram um modelo numérico utilizando MEF (com elementos tridimensionais hexaédricos com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó) para um cabo multicamada, considerando efeitos não-lineares como distribuição não-uniforme de tensões nos fios externos, tensões de contato, atrito e plasticidade do material, que são difíceis de serem considerados analiticamente. Os autores compararam os resultados gerados pela modelo numérico com os resultados do modelo de Costello (1997) e com os resultados experimentais de Utting e Jones (1987a, 1987b). Os resultados mostraram uma boa relação entre os resultados experimentais de variação da força axial em função da deformação e para o modelo numérico. Porém, o modelo de Costello (1997) não acompanha a não-linearidade da curva com a condição ponta-fixa para deformações maiores do que 0,8%, pois não contempla os efeitos não-lineares. Ainda foram analisadas as relações entre força axial e torque ou torção, bem como as pressões de contato entre os fios. Outro modelo a considerar a plasticidade do material do fio foi o de Zhou e Tian (2013), porém para um cabo mais simples, de arquitetura 1×7.

Elata *et al.* (2004) desenvolveram um modelo utilizando MEF para simular o comportamento mecânico de um cabo 6×7. Nesta arquitetura cada perna (cabo 1×7) possui seu próprio passo, e estas pernas estão torcidas ao redor do núcleo formando o segundo passo. Os autores utilizaram elementos de casca para as análises e as condições de ponta-fixa e ponta-livre. Para validar o modelo, realizaram um trabalho experimental onde um cabo foi ensaiado em tração axial. Um aparato mecânico foi utilizado para permitir a rotação no eixo longitudinal de modo que a condição de ponta-livre pudesse ser aplicada experimentalmente ao longo de todo o comprimento da amostra. Os autores encontraram uma boa relação entre o modelo numérico e os resultados experimentais.

Ghoreishi *et al.* (2007a), também utilizou o método dos elementos finitos e validou seus resultados em tração com os ensaios de Utting e Jones (1987a, 1987b) para cabos 1×7 com diferentes comprimentos de passo. Também os comparou com as soluções analíticas

clássicas de Costello (1997), Hruska (1952,1953), Machida et al. (1973), McConnell e Zemeke (1882), Kumar e Cochran (1987), Ramsey (1990), Sathikh et al. (1996) e Labrosse (1998). Os autores compararam os elementos da matriz de rigidez expressos na forma não-dimensional, mostrados anteriormente na Equação (1), e plotados em função do ângulo  $\beta$  na Figura 12. O  $\beta$  é o ângulo complementar a  $\alpha$ , assim, um aumento em seu valor implica na diminuição no passo do cabo. Os autores concluíram que para valores de  $\beta$  menores que  $20^\circ$  as soluções analíticas divergem do modelo numérico em menos de 10%. Porém, essa diferença aumenta com o valor de  $\beta$ , superestimando os valores de rigidez. Observa-se no gráfico  $k_{\theta\epsilon}$  vs.  $\beta$  que as curvas apresentam um valor máximo e posteriormente voltam a cair, indicando que para este acoplamento de carregamento há um passo ideal. Porém, no trabalho não há um detalhamento sobre este comportamento, indicando que maiores estudos são necessários para entender esta resposta do cabo.

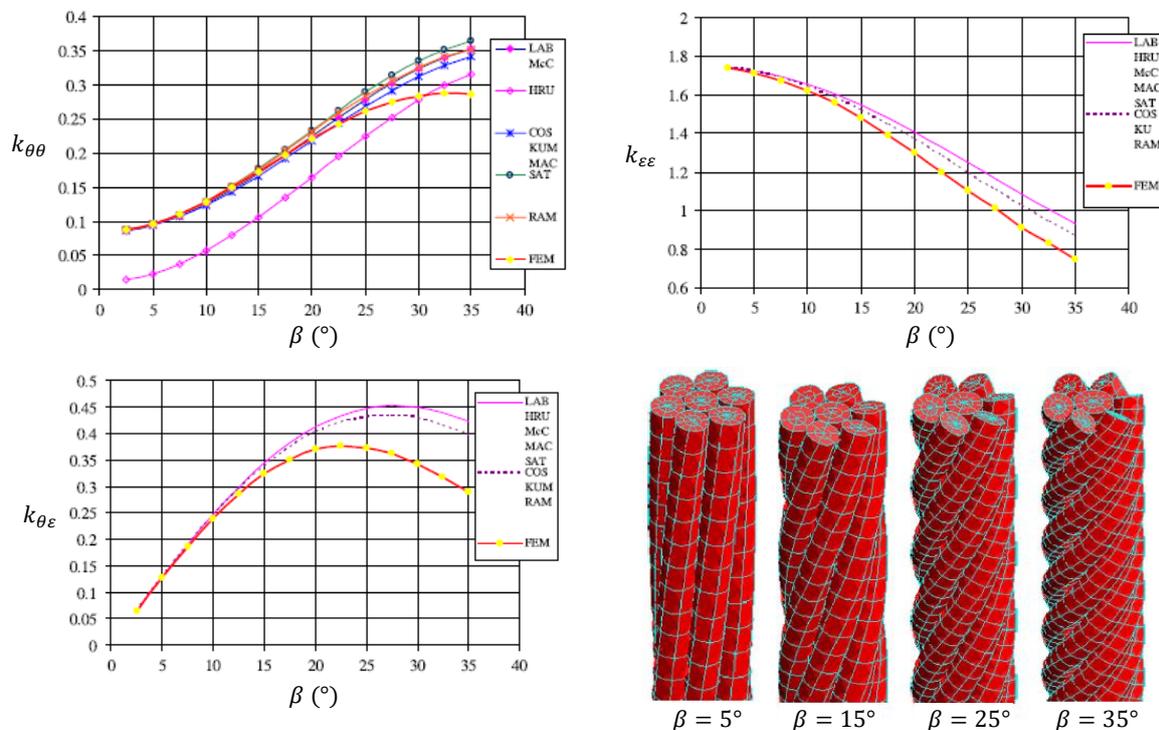


Figura 12 - Gráficos dos resultados dos elementos da matriz de rigidez conforme o ângulo  $\beta$  é aumentado comparados entre os modelos de Costello (1997), Hruska (1952,1953), Machida et al. (1973), McConnell e Zemeke (1882), Kumar e Cochran (1987), Ramsey com os resultados numéricos de Ghoreishi et al. (2007a). [Adaptado de Ghoreishi et al., 2007a].

Outro trabalho relevante foi realizado por Usabiaga e Pagalday (2008), que desenvolveram um modelo analítico próprio e consideraram cabos com arquiteturas de torção regular e *Lang*. O estudo foi focado na contribuição do coeficiente de Poisson para a resposta do cabo em uma solicitação de tração e torção simultâneas, comparada com o modelo de Costello (1997). Os resultados mostram uma boa relação entre os modelos, tanto para a resposta em tração como para torque.

Erdomnez e Imrak (2012 e 2009), analisaram cabos multicamadas submetidos à tração pura e à tração acrescida de força vertical, de forma a causar flexão em torno de uma polia. O modelo criado com elementos hexaédricos tridimensionais analisou o comprimento do cabo 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, 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 (Erdomnez e Imrak, 2012). Jun et al. (2008) também analisaram a influência do comprimento do passo com resultados semelhantes.

Argatov (2011) 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 com o núcleo. Foi comparada a solução analítica com a solução numérica de Ghoreishi et al. (2007a) e os resultados experimentais de Utting e Jones (1987a, 1987b). Embora a solução numérica tenha se aproximado mais dos experimentos, Argatov apresentou resultados consideravelmente melhores com a redução do passo do cabo em relação aos modelos analíticos testados por Ghoreishi et al. (2007a), por considerar hipóteses complexas de contato entre os fios.

Stanova et al. (2015) realizaram um completo estudo de cabos de aço multicamadas com seções transversais não-circulares solicitados em tração. Nestes casos, o núcleo é composto por mais de um fio, como observado na Figura 13a-c-d, que apresenta também as demais seções estudadas Figura 13b. Observa-se que a malha emprega elementos hexaédricos com 8 nós e 3 graus de liberdade por elemento. Segundo os autores, o tipo e tamanho dos elementos deve poder capturar os gradientes de tensão e deve corretamente aproximar a geometria do fio, principalmente nas áreas de contato. Como resultado, os autores observaram uma melhor distribuição de tensão entre os fios para uma seção oval em comparação às demais seções estudadas, como também observado na Figura 13.

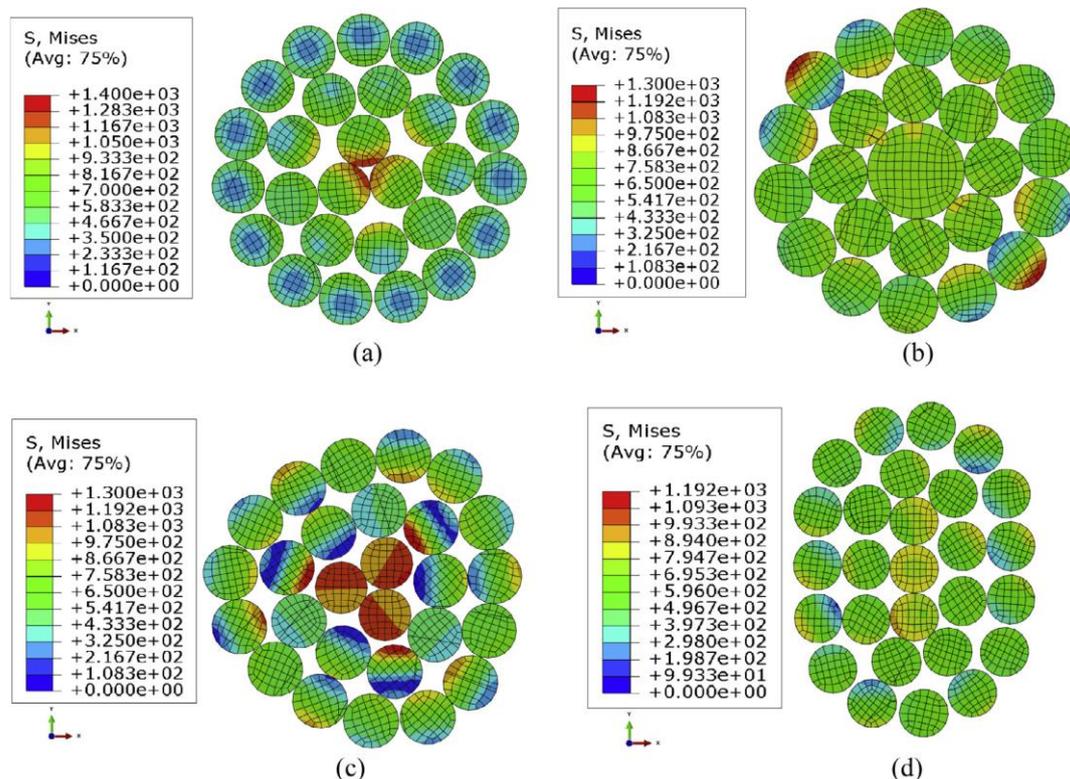


Figura 13 - Distribuição de tensão nas seções transversais de cabos com diferentes construções [Stanova et al., 2015].

### 3.6.2. Flexão de Cabos

Assim como nos modelos analíticos, análises numéricas para a resposta de cabos em flexão são encontrados em menor número comparado àqueles para tração, provavelmente devido à maior complexidade. O pesquisador Wen-Guang Jiang publicou diversos estudos empregando MEF para análises de cabo em tração (Jiang et al., 1999; Jiang et al., 2000 e Jiang et al., 2008), porém, somente depois apresentou seu primeiro estudo para solicitação em flexão pura (Jiang, 2012).

Erdonmez e Imrak (2011) simularam um cabo 6x7 fletindo em torno de uma polia, modelada como corpo rígido. Como simplificação do problema, o cabo 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. Como resultado, 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.

Chen et al. (2015) realizaram um estudo numérico/experimental utilizando diversas geometrias ensaiadas em flexão em três pontos. Como resultado, a resposta da curva de carga vs. deslocamento se mostrou elasto-plástica para cabos sem pré-tensionamento e com ponta-fixa, e linear elástica para cabos pré-tensionados, constatando ainda que o pré-tensionamento tornou o cabo mais rígido em flexão.

Como citado anteriormente, há poucos trabalhos analisando a resposta de cabos de compósito, tanto para tração quanto para flexão. O trabalho de Menezes et al., (2017a-b), analisa em tração e flexão o comportamento destes cabos sob diferentes parâmetros de construção (i.e. comprimento do passo e comprimento do cabo). Os autores apresentam um modelo numérico calibrado com parâmetros muitas vezes negligenciados por modelos analíticos e também avaliaram a sensibilidade da influência das constantes de engenharia nos resultados. Os autores observaram que os parâmetros de entrada  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $\nu_{23}$  e  $G_{23}$  (módulo de cisalhamento) não exercem influência nos resultados finais. Além disso, o modelo apresentou boa concordância com os valores experimentais.

### 3.6.3. Teorias de Contato e Influência do Atrito

Para um cabo de geometria 1x7 com fios externos em contato, há um total de 12 pares de contato, sendo seis pares nas interações entre o núcleo e os fios externos, e outros seis nas interações entre os fios externos. Segundo Costello (1997), Utting e Jones (1987a, 1987b) e Ghoreishi (2007a), os fenômenos de atrito apresentam influência pouco significativa no comportamento de cabos em solicitações de tração. Porém outros trabalhos como Páczelt e Beleznai (2011), Stanova et al., (2011a) e Stanova et al., (2015a) discordam e mostram que o atrito influencia a resposta final de um cabo de aço. Contudo, ainda não há dados expressivos sobre esta influência.

Páczelt e Beleznai (2011) desenvolveram uma teoria de contato utilizando MEF (código próprio) em cabos de aço capaz de prever danos por desgaste. Utilizando elementos de mola, os autores avaliaram um cabo de aço em condição de ponta-fixa e ponta-livre e compararam com os resultado experimentais de Utting e Jones (1987a-b), com os resultados do modelo de Costello (1997) e com o modelo numérico de Jiang et al. (1999), as considerações de contato aumentaram a diferença entre o comportamento do cabo na condição de ponta-fixa (mais rígido) e ponta-livre (menos rígido).

Argatov (2011) modelou analiticamente o contato entre os fios para um cabo 1x7 baseado no modelo de Costello (1997), porém considerando as deformações nos fios causadas pelo atrito. Jun et al. (2008) testaram diferentes hipóteses de contato em seu modelo numérico para cabos de aço, empregando elementos hexaédricos de 8 nós e 3 graus de liberdade por nó, e avaliaram a razão de auto-rotação dos elementos, que é a relação entre a deslocamento angular de rotação do elemento em relação à rotação do fio em que ele está empregado. Como resultado, concluíram que a razão de auto-rotação ideal para os elementos ficou em torno 1,0.

Stanova et al. (2015) não obteve sucesso ao utilizar contatos do tipo superfície-superfície em seu modelo MEF, pois o elevado tempo de análise tornou o estudo inviável.

Para contornar este problema, os autores empregaram a hipótese de contato geral, onde uma busca global determina a face da superfície-mestre mais próxima para cada nó-escravo em um dado par de contato. Esta busca é conduzida, comparando cada nó com todas as face da superfície mestre que estão no mesmo par de contato. Com isso, simulações de cabos com geometrias complexas e grandes quantidades de elementos foram estudadas e comparadas, conforme ilustra a Figura 14, que apresenta a distribuição de tensão na seção longitudinal de um cabo multicamada sob carregamento em tração pura. O trabalho ainda ressalta a grande demanda por novos e mais refinados modelos numéricos dedicados a cabos, os quais podem ser empregados para (i) desenvolvimentos básicos de geometria, (ii) controle de qualidade, (iii) experimentação numérica e (iv) extrapolação de resultados para outras condições.

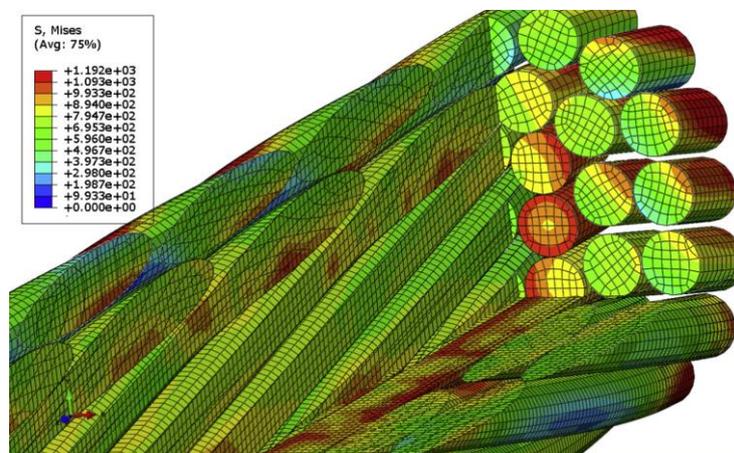


Figura 14 - Distribuição de tensão na seção longitudinal de um cabo multicamada sob carregamento em tração pura [Stanova et al., 2015].

Recentemente, Chen et al. (2017) realizaram um estudo que estabeleceu uma solução para a resposta de um cabo 1x7 sob flexão pura analisando os efeitos da força de atrito entre os fios e diferentes comprimentos de passo. Como resultado, os autores observaram (i) uma maior rigidez em flexão quando consideraram o atrito, (ii) uma considerável redução no diâmetro dos fios externos devido ao efeito do coeficiente de Poisson, (iii) uma maior pressão de contato na região mais distante do centro da curvatura, (iv) maiores comprimentos de passo apresentam mais resistência em fadiga e (v) possibilidade de escorregamento de fios.

O coeficiente de atrito estático (COF) é a propriedade que influencia diretamente este comportamento, sendo que este coeficiente entre compósitos de fibra carbono e resina epóxi varia entre 0,1 e 0,8 (Matsunaga et al., 2001, Schön, 2004, Suresha et al., 2006 e Zhang et al., 2006).

## 4. Metodologia

### 4.1. Caracterização dos Fios

A fim de entender o comportamento estático da estrutura, realizou-se ensaios de tração nos fios, e ensaios de tração e flexão 4 pontos nos cabos 1×7 como representação aos esforços simplificados aos quais os cabos estarão sendo solicitados. A nomenclatura adotada para as amostras dos diferentes fios analisados é apresentada na Tabela 7. Os ensaios de tração nos fios de seção circular foram realizados baseados na combinação das normas ASTM D3916-08 (*Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod*) e ASTM D7205 (*Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*). O comprimento livre dos corpos de prova foi de 305 mm, e o comprimento de ancoragem foi de 100 mm em cada extremidade. Os ensaios de tração (Figura 15) foram realizados em uma máquina de ensaios universal INSTRON 3382, com célula de carga de 100 kN, velocidade de 5 mm/min, corpos de prova fixados utilizando garras pneumáticas, pressão de aperto hidráulico definido para os fios de fibra de vidro de 8 MPa e para os fios de fibra de carbono e de aramida, 10 MPa. As medidas de módulo de elasticidade (E) e de coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) foram realizadas empregando-se extensômetros analógicos axial e transversal, para um nível de deformação axial máxima de 0,5%. Na construção destes compósitos (fornecidos por um fabricante nacional) foi utilizada fibra de carbono de alta resistência (HTS-40), fibra de vidro do tipo E (Owens Corning 111A 410), fibra de aramida (Kevlar 49) e resina epóxi (MY750).

Tabela 7 - Nomenclatura dos fios de material compósito polimérico estudados.

	<b>Fibra</b>	<b>Resina</b>	<b>d<sub>f</sub> (mm)</b>
<b>CE35</b>	Carbono	Epóxi	3,5
<b>AE35</b>	Aramida	Epóxi	3,5
<b>VE35</b>	Vidro	Epóxi	3,5



Figura 15 - Corpo de prova de fio de material compósito polimérico em ensaio de tração.

## 4.2. Determinação do Coeficiente do Atrito Estático (COF)

Foram analisados 5 corpos de prova por amostra de fio (CE50 e VE50), obtidas como ilustrado na Figura 16 (não se conseguiu bons resultados com os fios de aramida). Os fios pultrudados foram lixados, desbastando o material longitudinalmente, com o objetivo de chegar nas duas geometrias apresentadas na figura, o corpo posicionado abaixo do contra-corpo, teve uma etapa a mais de desbastamento para possibilitar sua acomodação na plataforma de ensaio. Com a geometria selecionada, a área de contato (em vermelho) foi maximizada, motivo pelo qual também utilizou-se somente fios com 5 mm de diâmetro. O ensaio de determinação do COF (Figura 17) consistiu em fixar uma das partes da amostra (contra-corpo) e posicionar a outra (corpo) sobre esta. O conjunto foi inclinado durante o ensaio e determinou-se o COF pelo início do deslizamento da parte sobreposta, medido através de um medidor a laser. Mediu-se o COF entre fios do mesmo material e entre fios de materiais diferentes (pares híbridos).

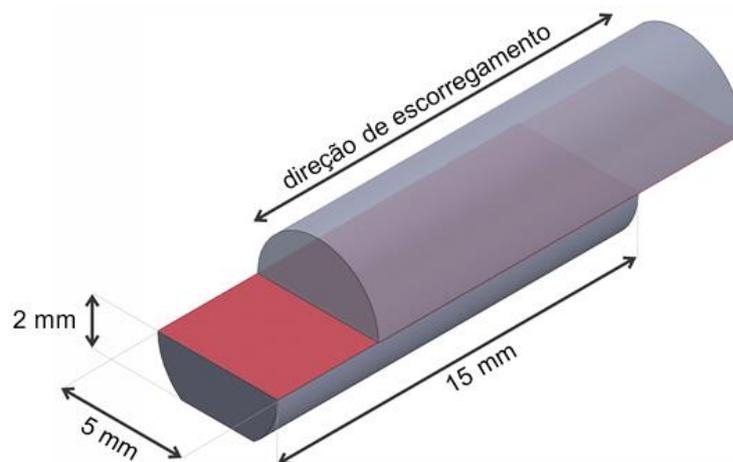


Figura 16 - Geometria do corpo de prova utilizado no ensaio de determinação de COF dos fios CE50 e VE50.

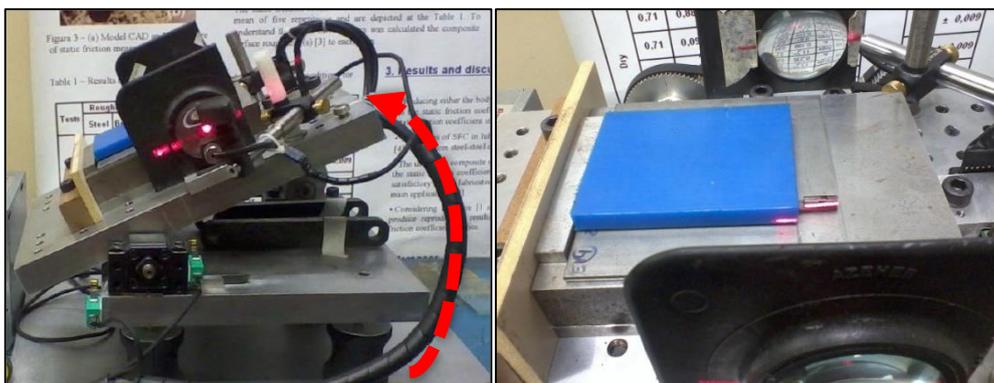


Figura 17 - Sistema para a realização do ensaio de determinação do COF.

### 4.3. Ensaio Tração Cabo 1x7 CFRP

Os cabos 1x7 CFRP foram fabricados pelo método de pultrusão pelo mesmo fornecedor nacional dos fios apresentados anteriormente. Os cabos ensaiados são compostos de seis fios externos (3,5 mm de diâmetro) torcidos helicoidalmente ao redor de um núcleo de mesmo diâmetro. O diâmetro nominal do cabo é 10,5 mm e o comprimento do passo, 152 mm, conforme apresentado na Figura 18a. Com este comprimento de passo, o ângulo  $\alpha$  é  $80,52^\circ$  ( $\beta = 9,48^\circ$ ). Os ensaios de tração seguiram a norma japonesa JSCE-E 531-1995 utilizando-se uma máquina de ensaios horizontal com capacidade de 170 ton (Figura 18b). As ancoragens dos corpos de prova tiveram um comprimento de 330 mm e foram realizadas utilizando-se cimento expansivo, o comprimento livre dos corpos de prova foi de 3360 mm, conforme apresentado na Figura 18c.

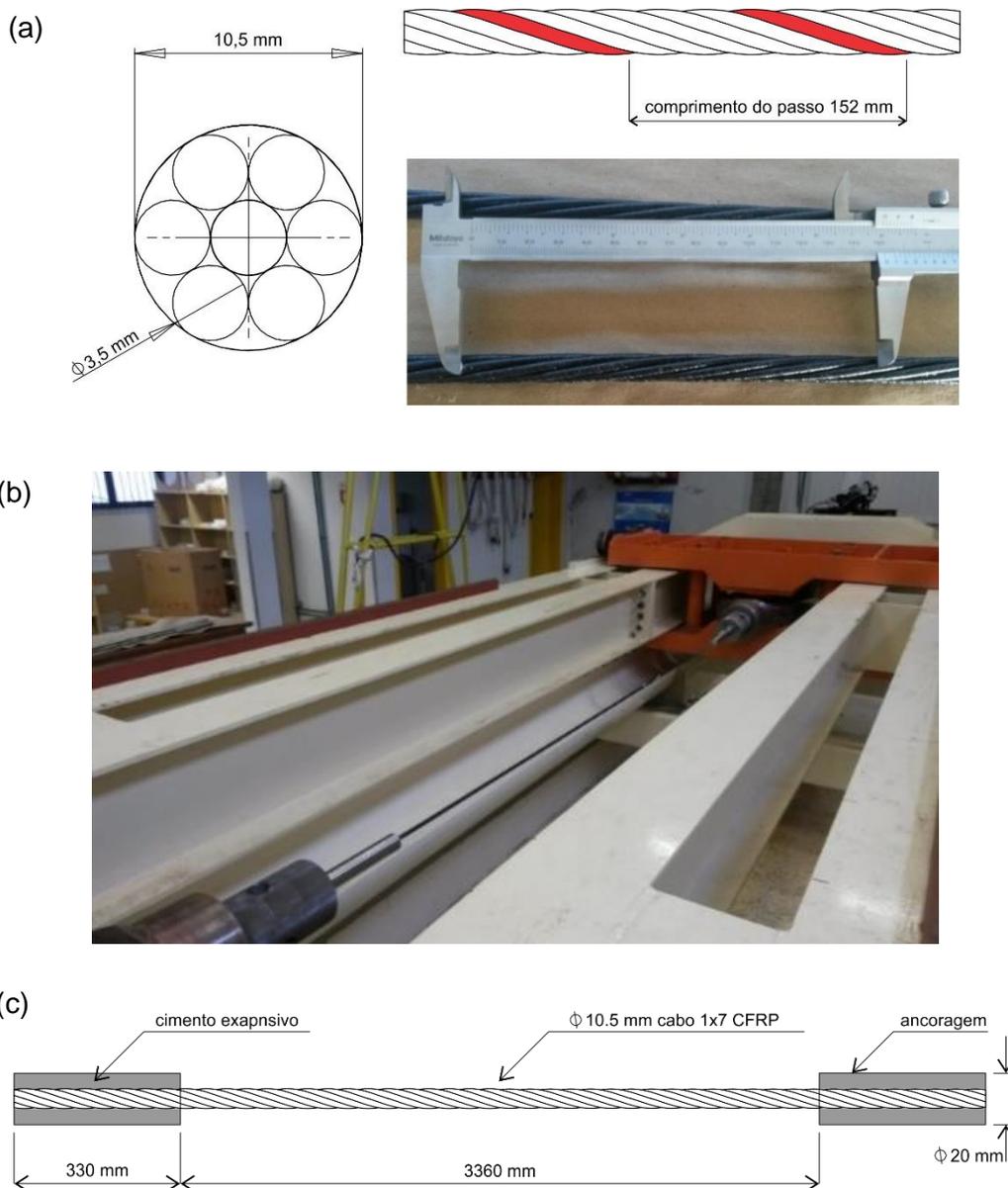


Figura 18 - (a) Geometria dos corpos de prova, (b) cabo montado para ensaio de tração e (c) detalhes da ancoragem.

#### 4.4. Ensaio Flexão Quatro Pontos Cabo 1x7 CFRP

Cabos 1x7 CFRP do mesmo lote de fabricação das amostras ensaiadas em tração foram também ensaiadas em flexão quatro pontos, onde o momento de flexão e o raio de curvatura são constantes. Os ensaios de flexão seguiram a norma ASTM 6272, com a razão distância entre apoios / diâmetro nominal do cabo de 16:1, corpos de prova com o comprimento de 208 mm, distância entre os suportes (L) de 84 mm, velocidade de ensaio de 4,5 mm/min e deslocamento máximo de 25 mm, conforme indicado na Figura 19a. Presilhas foram adicionadas nas extremidades dos corpos de prova para ajudar a manter a seção transversal do cabo circular. Utilizou-se uma máquina de ensaios universal INSTRON 3382 com célula de carga de 100 kN, dois *strain gauges* (SG) 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  $120,2 \pm 0,2 \Omega$ , foram adicionados a cada corpo de prova, posicionados em lados opostos dos fios externos na região central do cabo (e.g. um para a região em tração e o outro para região em compressão), conforme indicado na Figura 19b. Calculou-se o momento pela Equação (38).

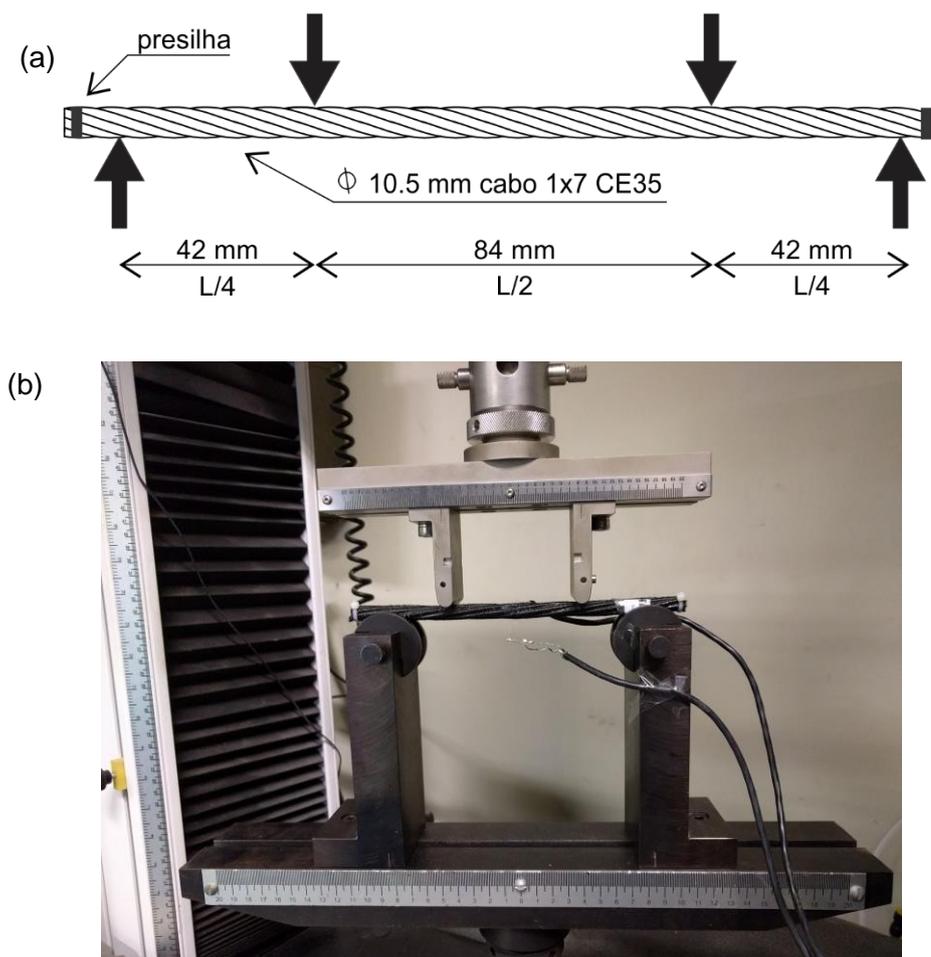


Figura 19 – (a) detalhes dos corpos de prova ensaiados em flexão e (b) detalhes do posicionamento dos *strain gauges*.

$$M = \frac{F}{2} \times \frac{L}{4} = \frac{FL}{8} \quad (38)$$

#### 4.5. Implementação do Modelo Analítico Simplificado

Os fios de materiais compósitos empregados nos cabos 1×7 CFRP deste estudo foram fabricados utilizando o processo de fabricação por pultrusão, onde as fibras são alinhadas na mesma direção dentro de uma seção circular, como representado na Figura 20a. Assumiu-se a simetria de um material transversalmente isotrópico como a mais adequada para descrever o comportamento deste material. A Figura 20b apresenta as relações das constantes de engenharia para um material transversalmente isotrópico.

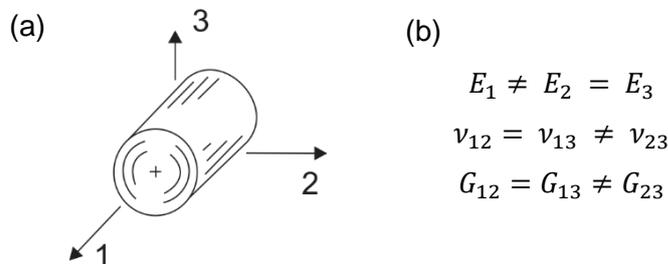


Figura 20 - (a) simetria isotrópica para o plano 2-3 e (b) relação das constantes de engenharia para estes materiais.

Apesar de autores como Hobbs e Raouf (1982), Pan (1993, 1994 e 1996) e Ghoreishi et al. (2007b) terem desenvolvido modelos para cordas empregando as relações constitutivas de materiais transversalmente isotrópicos, optou-se por se utilizar o modelo de Costello (1997) como base para este trabalho por se tratar de um modelo mais amplamente utilizado, que considera o efeito do coeficiente de Poisson e que foi desenvolvido para cabos de aço, que conforme já discutido, apresenta um comportamento mais semelhante aos cabos de compósito.

Assumindo-se também que o desempenho de um cabo sob carregamento é determinado por suas propriedades axiais, o modelo Costello (1997) foi simplificado para considerar as propriedades transversalmente isotrópicas de um material compósito pultrudado. Uma característica particular dos compósitos pultrudados empregados nestes cabos são as fibras dos fios externos desalinhadas do eixo principal pelo ângulo da hélice  $\alpha$ , conforme indicado na Figura 21a. Assim, para esta simplificação, os equivalentes do módulo de elasticidade  $E$  e do coeficiente de Poisson  $\nu$  dos materiais isotrópicos, foram substituídos respectivamente pelas propriedades  $E_1$  e  $\nu_{12}$  do fio da alma. Além disso, utilizou-se a relação  $(E_1 \sin \alpha)$ , onde  $\alpha$  é o ângulo da hélice ilustrado na Figura 21a para considerar a

rigidez reduzida do fio devido ao desalinhamento do eixo principal. Como citado, trata-se de um modelo simplificado, uma primeira tentativa de se analisar o comportamento mecânico de um cabo de compósito.

A Figura 21b apresenta as forças agindo em um dos fios externos do cabo 1x7 e as equações modificadas para materiais transversalmente isotrópicos são apresentadas nas Equações (39 - 46) para tração e (47 - 48) para flexão, onde os índices 1, 2 e 3 referem-se às direções em relação aos eixos como apresentados na Figura 20a, e C e FE referem-se ao fio central e fios externos, respectivamente,  $k$  é a curvatura,  $X$  é a linha externa de carregamento por unidade de comprimento e  $m$  é a quantidade de fios externos e  $p$  é o raio de dobramento. A dedução completa destas equações podem ser encontradas em Costello (1997). Assumiu-se que os fios externos não estão submetidos a um momento de flexão externo, assim as demais componentes da curvatura são consideradas nulas, esta hipótese pode limitar o modelo a pequenos ângulos  $\beta$ , uma vez que quanto maior este ângulo, menor o comprimento do passo, logo maior os efeitos dos demais componentes da curvatura. A Equação 44 apresenta a projeção das forças agindo nos fios externos na direção axial, que quando somada à força agindo no fio central apresentada na Equação 45, leva à força axial total agindo no cabo, dada pela soma algébrica da Equação 46. A Equação 47 é uma simplificação feita na hipótese de que os fios estão sob flexão pura aplicado perpendicularmente no eixo da hélice até o raio  $p$ , onde as hélices se comportam como uma viga. Neste caso ainda se desconsidera o atrito entre os fios e considera-se a rigidez em flexão como sendo a simples soma das rigidezes dos fios externos.

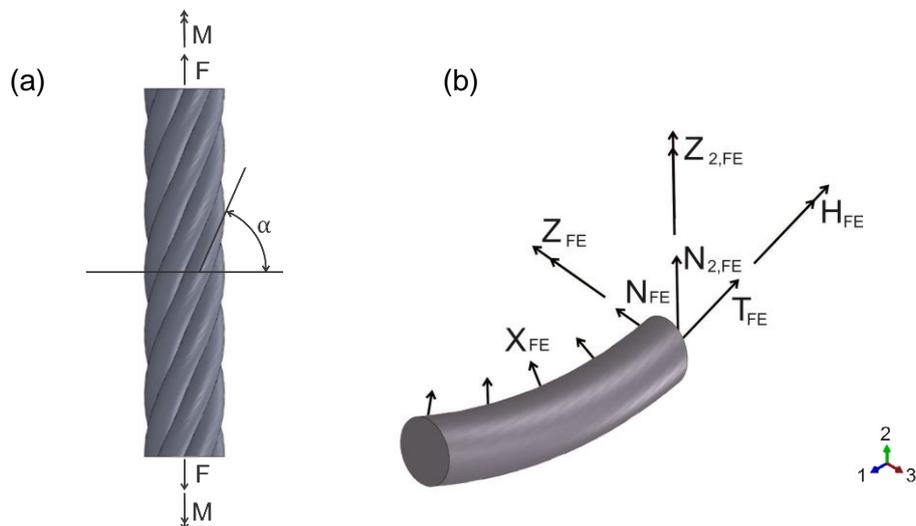


Figura 21 - Forças agindo em (a) um cabo 1x7 e (b) em um único fio externo.

$$\frac{Z_{2,FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^3} = \frac{\pi}{4} r_{FE} \Delta \kappa_{2,FE} \quad (39)$$

$$\frac{H_{FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^3} = \frac{\pi}{4(1 + \nu_{12})} r_{FE} \Delta \tau_{FE} \quad (40)$$

$$\frac{N_{2,FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^2} = \frac{H_{FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^3} \frac{\cos^2 \alpha}{r_{FE}/(r_C + r_{FE})} - \frac{Z_{2,FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^3} \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r_{FE}/(r_C + r_{FE})} \quad (41)$$

$$\frac{T_{FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^2} = \pi \varepsilon_{FE} \quad (42)$$

$$\frac{X_{FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}} = \frac{N_{2,FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^2} \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r_{FE}/(r_C + r_{FE})} - \frac{T_{FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^3} \frac{\cos^2 \alpha}{r_{FE}/(r_C + r_{FE})} \quad (43)$$

$$\frac{F_{FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^2} = m \left[ \frac{T_{FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^2} \sin \alpha + \frac{N_{2,FE}}{(E_1 \sin \alpha) r_{FE}^2} \cos \alpha \right] \quad (44)$$

$$\frac{F_C}{(E_1 \sin \alpha) r_C^2} = \pi \varepsilon \quad (45)$$

$$F = F_C + F_{FE} \quad (46)$$

$$\frac{1}{p} = \frac{(2 + \nu_{12} \cos^2 \alpha)}{2 \sin \alpha} \cdot \frac{4m}{\pi R^4 (E_1 \sin \alpha)} \quad (47)$$

$$EI = \frac{\pi (E_1 \sin \alpha)}{4} \left[ \frac{2m \sin \alpha}{(2 + \nu_{12} \cos^2 \alpha)} \cdot r_{FE}^4 + r_C^4 \right] \quad (48)$$

Este modelo analítico foi implementado utilizando o Microsoft Excel<sup>®</sup> tornando sua utilização prática e rápida. Assim, para a execução deste modelo insere-se as variáveis  $r_C$ ,  $r_{FE}$ , comprimento do passo,  $m$ ,  $E_1$ ,  $\nu_{12}$  e  $\varepsilon^*$ ; e tem-se como resultado a força axial total, o momento de torção e a rigidez flexural.

## 4.6. Criação do Modelo Numérico

Para o desenvolvimento do modelo numérico utilizou-se a plataforma comercial Abaqus<sup>®</sup> versão 6.14. O modelo numérico foi baseado na mesma geometria, arquitetura e passo do cabo 1×7 ensaiado em tração e flexão.

### 4.6.1 Geometria do Cabo e Propriedades do Material

A criação do modelo iniciou-se pelo desenho da seção 2D do cabo com posterior extrusão e torção no comprimento do passo, criando um sólido 3D. Nesta etapa, foi necessário adicionar um espaçamento de 0,01 mm entre os fios, pois a hipótese dos mesmos estarem inicialmente em contato impossibilitava a convergência do problema. Considerou-se também

não-linearidade geométrica. Desenhou-se também os quatro apoios (presentes no ensaio de flexão quatro pontos). Porém, para estas geometrias considerou-se as peças como cascas de corpo rígido.

As propriedades do material transversamente isotrópico tridimensional foram consideradas no modelo, inseriu-se as constantes de engenharia já citadas com suas respectivas relações na Figura 20b (módulos de elasticidade  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ ; coeficientes de Poisson  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$  e  $\nu_{23}$ ; e módulos de cisalhamento  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  e  $G_{23}$ ). Porém, experimentalmente foram obtidos apenas o  $E_1$  e o  $\nu_{12}$ . As demais constantes de engenharia foram determinadas analiticamente através do método dos invariantes (Tsai e Melo, 2014). Esta teoria recente tem como objetivo apresentar um método para se determinar as propriedades elásticas de um material compósito através das invariantes da sua matriz rigidez. Para compósitos unidirecionais, há 4 parâmetros independentes de rigidez a serem calculados ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$  e  $\nu_{12}$ ). Estes parâmetros sempre foram tratados como entidades separadas, como por exemplo nos critérios de falha onde estes parâmetros não são interativos, máxima deformação, Hashin (1980) e Puck e Schurmann (1998). Enquanto rigidez e flexibilidade são tensores, as constantes de engenharia não são, e assim como em tensores, há invariantes associados à transformação de coordenadas. O traço é justamente um invariável dos tensores de rigidez e compliância associado a uma transformação de coordenadas. Em álgebra linear, o traço de uma matriz é a soma dos elementos em sua diagonal principal como mostra a Equação (49), para a matriz de rigidez. Para compósitos laminados, a rigidez no plano e em flexão podem ser normalizadas de acordo com a Equação (50). Assim, os valores dos traços destas matrizes normalizadas são os mesmo (Equação 51). Enquanto os termos de  $[A^*]$  não dependem da ordem de empilhamento, os de  $[D^*]$  dependem. Mesmo que seus componentes variem em valor, seu traço permanece o mesmo. O traço é independente de carregamento, sequência de empilhamento e simetria do material (i.e. isotrópico, ortotrópico, anisotrópico).

$$\begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ Q_{yx} & Q_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ss} \end{bmatrix} \rightarrow \text{Tr} [Q] = Q_{xx} + Q_{yy} + 2Q_{ss} \quad (49)$$

$$[A^*] = [A]/h \text{ e } [D^*] = 12/h^3 [D] \quad (50)$$

$$\text{Tr} [Q] = \text{Tr} [A^*] = \text{Tr} [D^*] \quad (51)$$

Assim, pode-se considerar o valor do traço como uma propriedade do material, assim como seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Visto que o traço é uma combinação linear de três termos, se dois deles forem conhecidos, o último é facilmente

determinado. Para comprovar isso, Tsai e Melo (2014) compararam os valores das propriedades de dez diferentes materiais compósitos poliméricos, calculando os valores dos termos de suas matrizes de rigidez normalizadas e observaram que o valor do traço para elas é muito próximo. O valor do termo  $Q_{xx}^*$  por exemplo, apresenta um coeficiente de variação de 1,5%. Ou seja, o valor deste termo é praticamente o mesmo para todos os compósitos de fibra de carbono. A Tabela 8 apresenta os termos comparados para compósitos de fibra de carbono, a média dos valores para as diferentes lâminas é chamada de lâmina mestre (*Master Ply*).

Tabela 8 - Cálculo do traço das matriz rigidez normalizada para diferentes materiais CFRP (Adaptado de Tsai e Melo, 2014).

Material	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$\nu_x$	$G$ (GPa)	$Q_{xx}^*$	$Q_{yy}^*$	$Q_{xy}^*$	$Q_{ss}^*$	Traço (GPa)
IM7/977-3	191	9,9	0,35	7,79	0,8825	0,0459	0,0161	0,0358	217,8
T800/Cytec	162	9,0	0,40	5	0,8955	0,0497	0,0199	0,0274	182,5
T700 C-Ply 55	121	8,0	0,30	4,7	0,8746	0,0578	0,0173	0,0338	139,2
T700 C-Ply 64	141	9,3	0,30	5,8	0,8713	0,0575	0,0172	0,0356	162,8
AS4/H3501	138	9,0	0,30	7,1	0,8567	0,0556	0,0167	0,0438	162,0
IM6/epoxy	203	11,2	0,32	8,4	0,8791	0,0485	0,0155	0,0362	232,2
T300/F934	148	9,7	0,30	4,55	0,8878	0,0579	0,0174	0,0271	167,7
T300/5208	181	10,3	0,28	7,17	0,8805	0,0501	0,0140	0,0347	206,5
IM7/8552	171	9,1	0,32	5,29	0,8972	0,0476	0,0152	0,0276	191,6
IM7/MTM45	175	8,2	0,33	5,5	0,9014	0,0422	0,0139	0,0282	195,1
Desvio Padrão ( $\sigma$ )	25,9	1,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	28,6
Coef. Var. (CV)	15,9%	10,2%	10,7%	22,4%	1,5%	10,9%	10,9%	16,4%	15,4%
<b>Lâmina Mestre</b>					<b>0,8827</b>	<b>0,0513</b>	<b>0,0163</b>	<b>0,0330</b>	<b>185,8</b>

As propriedades longitudinais são conhecidas como determinadas principalmente pelas fibras, enquanto que as propriedades transversais e de cisalhamento, pelas matrizes. Embora as contribuições dos módulos de elasticidade pela matriz sejam pequenas em compósitos de carbono / epóxi, sua variação é grande porque diferentes matrizes e processos de cura são empregados. Assim, observando a tabela acima, é possível determinar esta proporção, a rigidez ao longo da fibra é responsável por cerca de 88% do traço para os compósitos unidirecionais de carbono / epóxi apresentados. Assim, as propriedades relacionadas à matriz são responsáveis por 12%.

Assim, pode-se considerar o valor do traço como uma propriedade do material, assim como seu módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Como o traço é uma combinação linear de três termos, se dois deles forem conhecidos, o último é facilmente determinado. Portanto, pode-se empregar esta relação das propriedades conhecidas de material com seu traço para se determinar suas demais propriedades. Por exemplo, a Equação (52) apresenta a matriz rigidez de um material compósito em termos de suas constantes de engenharia. Determina-se o traço do material a partir de uma propriedade calculada deste material dividido pelo valor da mesma propriedade da lâmina mestre normalizada pelo traço da lâmina mestre, como apresentado na Equação (53), no caso, módulo de elasticidade longitudinal. Pode-se

então calcular similarmente os termos da matriz rigidez, como mostra a Equação (54). E a partir destes termos da matriz rigidez, determina-se as demais constantes de engenharia.

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1-\nu_x\nu_y} & \frac{\nu_y E_x}{1-\nu_x\nu_y} & 0 \\ \frac{\nu_x E_y}{1-\nu_x\nu_y} & \frac{E_y}{1-\nu_x\nu_y} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$Tr = \frac{E_1(\text{medido experimentalmente})}{E_1^*(\text{da lâmina mestre normalizado pelo traço da lâmina mestre})} \quad (53)$$

$$Q_{ij} = Q_{ij}^* \cdot Tr \quad (54)$$

Após, definiu-se a orientação do material dos fios externos a fim de ficarem alinhados com seu eixo local, e não ao eixo global, ao longo de todo o comprimento do cabo, conforme mostra a Figura 22. Nesta figura, observa-se também o detalhe da orientação da extremidade de um dos fios externos. Com esta orientação, respeitou-se a rigidez do fio helicoidal, pois todas as 9 constantes de engenharia aplicadas a este material seguirão esta orientação local. A orientação do material do fio do núcleo, por outro lado, seguiu a orientação global, pois este fio não possui torção helicoidal.

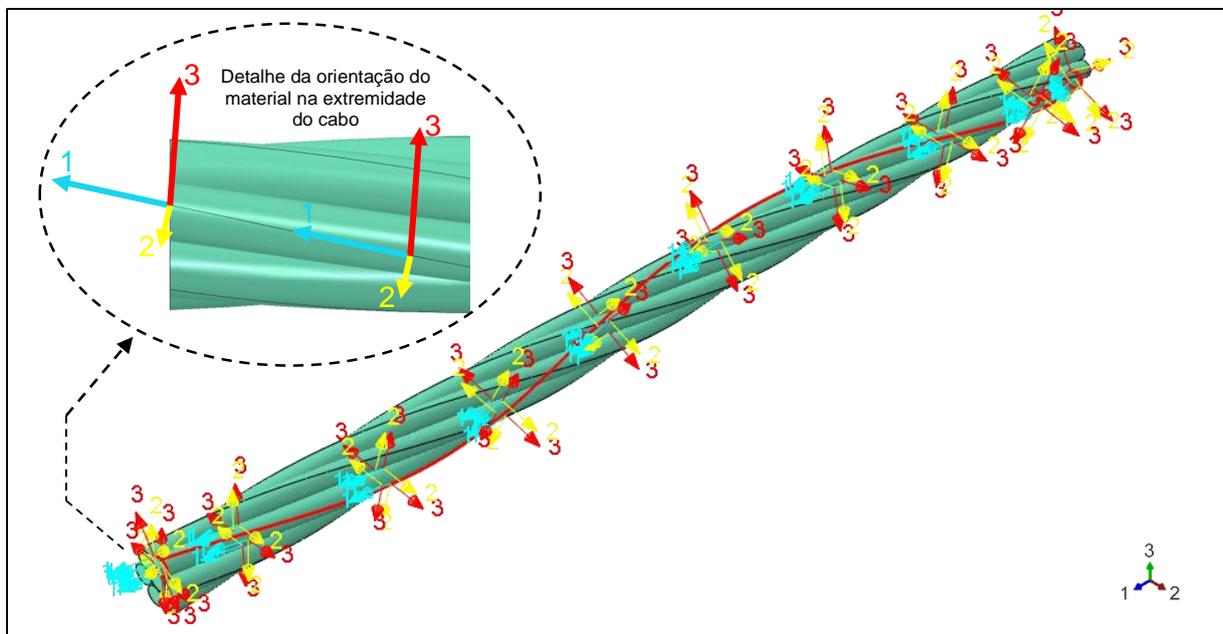


Figura 22 - Imagem 3D do cabo 1x7: Orientação do material seguindo a orientação geométrica do cabo e no detalhe os eixos materiais.

#### 4.6.2. Geração da Malha

Para a escolha do elemento mais apropriado para o modelo, efetuou-se um teste de convergência com diferentes tipos e quantidades de elementos. Comparou-se os elementos: (i) tetraédrico linear com 4 nós por elemento, C3D4 na biblioteca do código comercial empregado, (ii) tetraédrico quadrático com 10 nós por elemento, C3D10, (iii) hexaédrico linear com 8 nós por elemento, C3D8R, e (iv) hexaédrico quadrático com 20 nós por elemento, C3D20R. A Figura 23 apresenta um comparativo entre os elementos analisados, onde a linha tracejada indica o valor da deformação máxima experimental. O elemento que apresentou os melhores resultados em termos de convergência, velocidade e reprodutibilidade foi o hexaédrico linear com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó (C3D8R). Este elemento também foi empregado com sucesso por Stanova et al. (2015), Erdomnez e Imrak, (2012 e 2009), Argatov (2011) e Jiang et al. (1999 e 2000). Em geral este elemento apresenta diversas vantagens em comparação ao tetraédrico linear, principalmente em termos de contato devido a sua maior quantidade de nós por elemento. Contudo, as análises empregando o elemento hexaédrico linear demandaram um maior tempo para convergência em comparação ao tetraédrico linear.

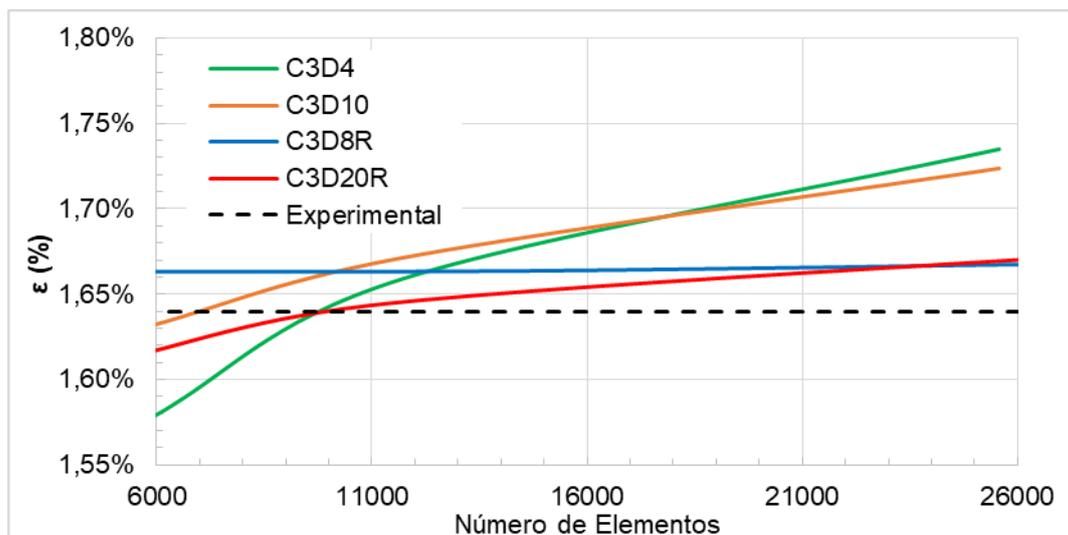


Figura 23 - Análise de convergência da malha.

A Figura 24 apresenta a malha final empregada no modelo. Como a geometria (comprimento do cabo) para os carregamentos em tração e flexão são diferentes, para o primeiro caso, a malha ficou com um total de 20.736 elementos e 17.050 nós, e para o segundo caso, 34.348 elementos e 27.918 nós.

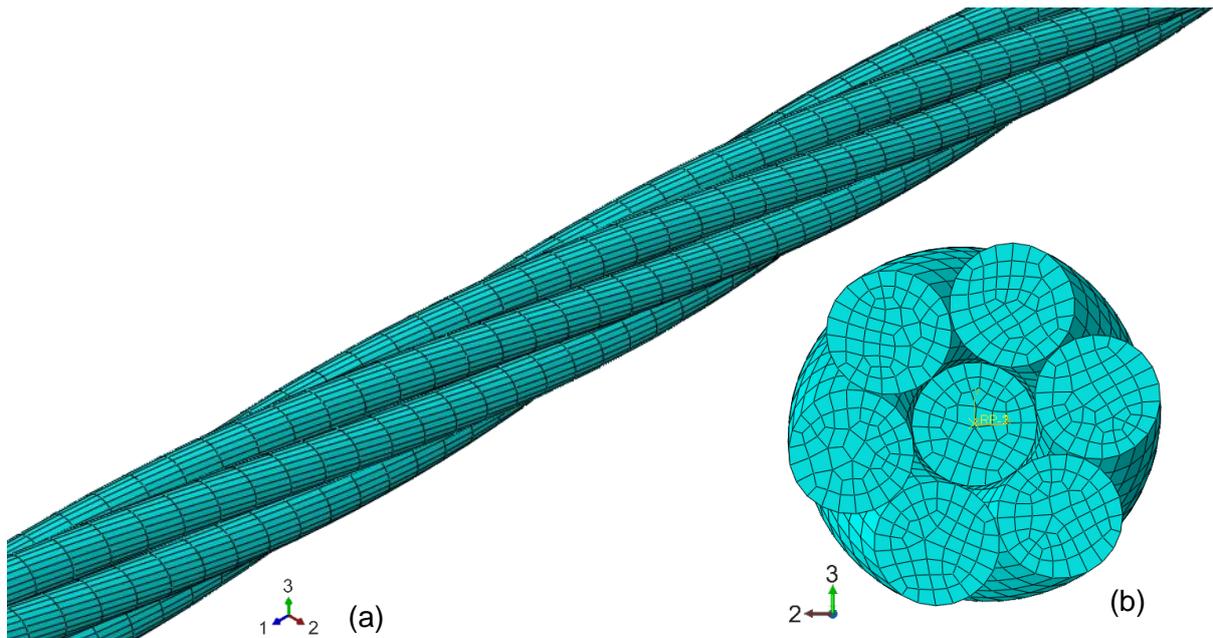


Figura 24 - Malha utilizando elementos hexaédricos lineares com 8 nós e 3 graus de liberdade por nó, empregada no modelo numérico: (a) vista isométrica e (b) vista de topo.

#### 4.6.3. Contato e Condições de Contorno

Para evitar efeitos de penetração entre fios, as simulações foram efetuadas iniciando-se com pequenos incrementos, aumentando-os gradativamente. Considerou-se 12 pares de contato superfície-superfície para o cabo, 6 para os pares núcleo / fios externos (Figura 25a) e outros 6 para os pares fio externo/fio externo (Figura 25b). Esta hipótese de contato leva a resultados mais precisos porém consomem mais tempo (Stanova et al., 2011 e 2015). Além disso, as propriedades de contato não-lineares aplicadas ao modelo contemplam o coeficiente de atrito estático entre os fios medido experimentalmente e os deslizamentos finitos entre os fios, o que permite grandes deslizamentos e rotações dos nós da geometria mestre em relação à superfície do elemento da geometria escrava, podendo transferir a pressão de contato para um número infinito de elementos, apesar de ser uma condição que consome um tempo maior em relação à condição que permite pequenos deslocamentos, é a mais indicada para o modelo, principalmente em flexão. Os outros 4 pares foram adicionados às simulações em flexão 4 pontos, referentes aos contatos dos apoios com o cabo, indicado na Figura 25c. Para estes, utilizou-se uma condição sem atrito a fim de facilitar a convergência do problema.

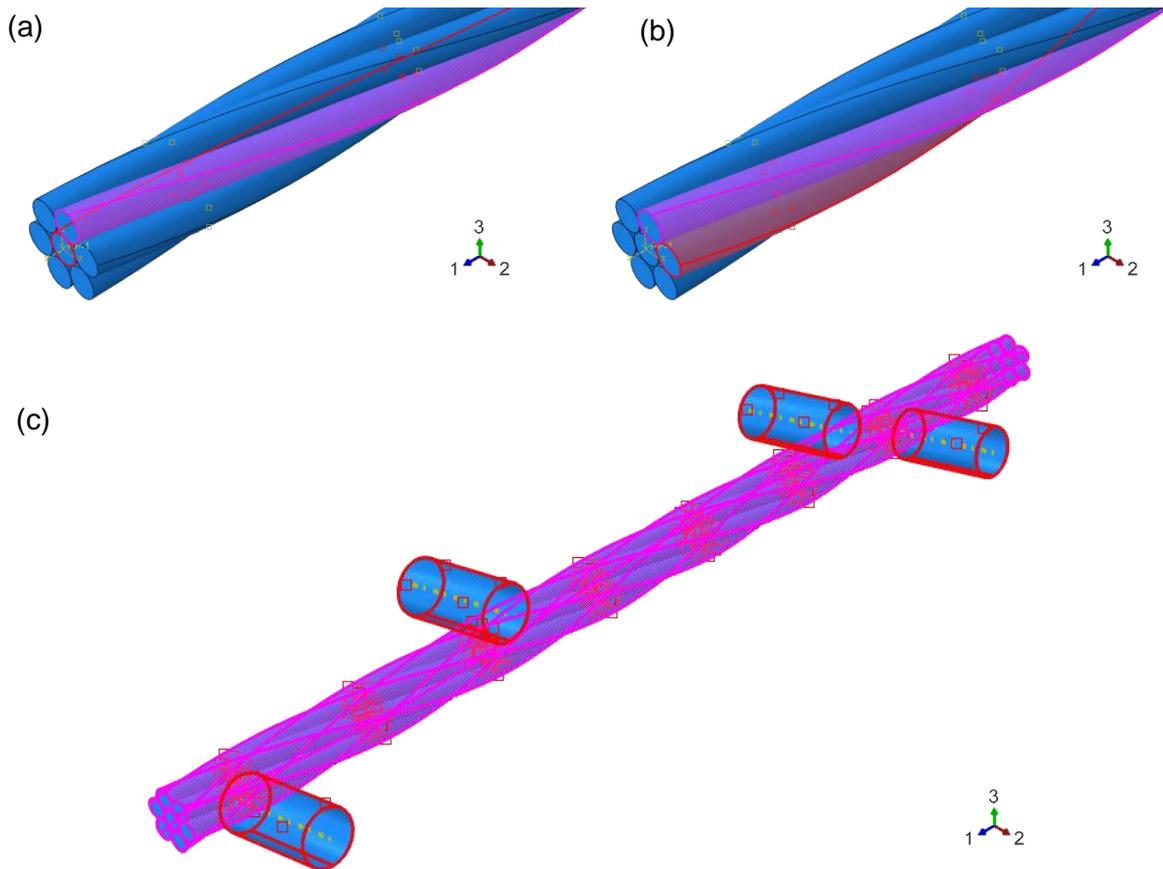


Figura 25 - Imagem 3D mostrando um dos 6 pares de contato entre o núcleo e um dos fios externos (a), um dos 6 pares de contato entre dois fios externos (b) e os 4 pares de contato entre os apoios e o cabo para o caso da solicitação em flexão (c).

Os casos simulados para a avaliação do comportamento do cabo 1x7 foram:

**(a) Tração:** o comprimento do cabo simulado foi de 152 mm, referente ao tamanho do seu passo  $h_c$ , o que de acordo com Erdonmez e Imrak (2011) é o suficiente para representar o comprimento real do cabo. Além disso, uma das pontas do cabo foi engastada, não permitindo deslocamento ou rotação em qualquer sentido. Na ponta oposta, impediu-se o movimento de rotação no eixo z, longitudinal ao cabo (fim fixo), nesta mesma ponta aplicou-se a força axial. Estas condições de contorno estão representadas na Figura 26.

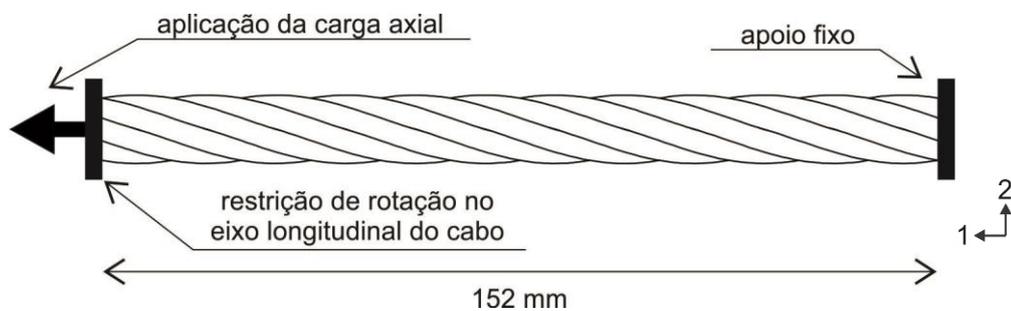


Figura 26 - Representação das condições de contorno aplicadas às simulações em tração.

**(b) Flexão:** O comprimento do cabo simulado foi o mesmo do utilizado experimentalmente (comprimento de 208 mm, distância entre os suportes (L) de 84 mm). Considerou-se os 4 apoios como corpos rígidos não-deformáveis, suas geometrias foram construídas utilizando cascas com diâmetro de 10 mm, sendo posicionados de acordo com a Figura 27. Os dois apoios inferiores foram engastados, não permitindo deslocamento ou rotação em qualquer sentido. Em ambas as seções transversais das pontas do cabo, restringiu-se o deslocamento na direção 3, e as rotação nos eixos 1 e 3. A fim garantir o alinhamento dos eixos locais ao longo de toda flexão, um novo sistema de coordenadas foi criado nas seções transversais das pontas do cabo.

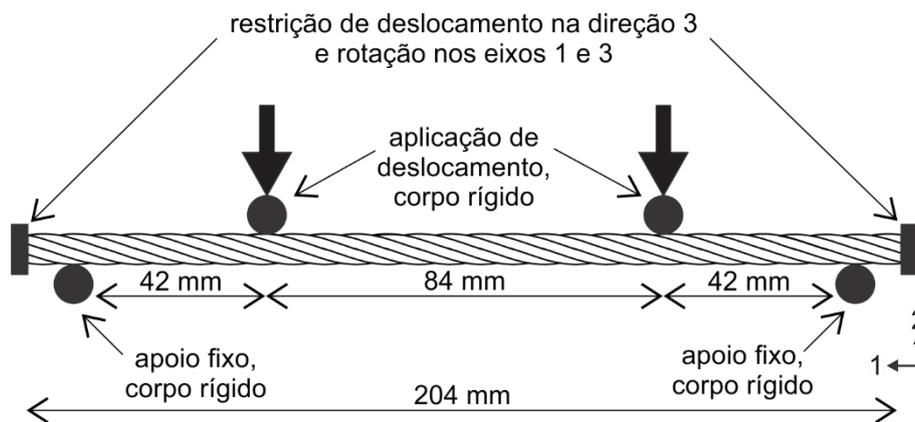


Figura 27 - Representação das condições de contorno aplicadas às simulações em flexão.

## 4.7. Planejamento Experimental

Há diversas incertezas associadas às medidas experimentais realizadas neste estudo, desde as incertezas intrínsecas aos equipamentos utilizados (i.e. células de cargas, extensômetros, SG,...) até incertezas relacionadas às medidas do comprimento do passo e diâmetros dos cabos. Com o objetivo de inserir incertezas probabilísticas nas simulações, incorporou-se a ambos os modelos (numérico e analítico) as variações das propriedades de entrada, representou-se as incertezas a partir dos valores de um desvio padrão ( $\pm\sigma$ ). Portanto, as principais propriedades de entrada foram inseridas nos modelos considerando suas incertezas experimentais: valor médio do módulo de elasticidade longitudinal ( $\bar{E}_1$ ), valor médio menos um desvio padrão ( $\bar{E}_1^{-\sigma}$ ) e valor médio mais um desvio padrão ( $\bar{E}_1^{+\sigma}$ ); bem como para o coeficiente de Poisson ( $\bar{\nu}_{12}$ ,  $\bar{\nu}_{12}^{-\sigma}$  e  $\bar{\nu}_{12}^{+\sigma}$ ) e para o coeficiente de atrito estático ( $\overline{COF}$ ,  $\overline{COF}^{-\sigma}$  e  $\overline{COF}^{+\sigma}$ ). Para os estudos em tração, utilizou-se como critério de falha o valor experimental da deformação longitudinal de ruptura, conseqüentemente, inseriu-se nos modelos os valores de  $\bar{\epsilon}_{1t}^u$ ,  $\bar{\epsilon}_{1t}^{u-\sigma}$  e  $\bar{\epsilon}_{1t}^{u+\sigma}$ .

Como resultado, o modelo numérico gerou um total de 81 resultados de resistência para o cabo em tração, e o modelo analítico, por não considerar o COF, gerou 27 resultados. Para o estudo do cabo em flexão, não utilizou-se um valor experimental como critério comparativo (como em tração onde se utilizou o valor experimental da deformação de ruptura, que possui uma incerteza associada), portanto, para esta condição de simulação gerou-se 27 resultados empregando o modelo numérico e 9 para o modelo analítico.

## 5. Resultados e Discussões

### 5.1. Caracterização dos Fios

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados nas amostras CE35, AE35 e VE35. Para cada amostra, cinco corpos de prova foram ensaiados. Nesta tabela apresenta-se os valores médios de força de ruptura ( $F^*$ ), coeficiente de Poisson na direção 12 ( $\nu_{12}$ ), deformação da ruptura ( $\epsilon^u$ ), tensão na ruptura ( $\sigma_T^*$ ) e Módulo de elasticidade na direção principal ( $E_1$ ), com seus respectivos desvios padrões ( $\sigma$ ) e coeficientes de variação (CV). Os valores das tensões foram calculados a partir dos valores de força, logo, apresenta, o mesmo CV.

Observa-se que a média do módulo de elasticidade (141,6 GPa) e da resistência (2328,8 MPa) dos fios de CE35S é próxima ao dobro dos fios de AE30S, 72,5 GPa e 1312,3 MPa, respectivamente. Porém, a média da deformação na ruptura dos fios de fibra de carbono (1,64%) é a menor das amostras ensaiadas. Os fios de VE30S apresentaram o maior coeficiente de Poisson principal, 0,43, e a maior deformação na ruptura, 2,55%.  $E_1$  e  $\nu_{12}$  apresentaram os menores valores de  $\sigma$  e CV, e  $\sigma_T^*$  e  $\epsilon^u$ , os maiores.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de tração nos fios de diferentes materiais compósitos

		<b>F* (kN)</b>	<b>E<sub>1</sub> (GPa)</b>	<b><math>\nu_{12}</math></b>	<b><math>\sigma_T^*</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon^u</math> (%)</b>
<b>CE35</b>	Média	32,36	141,6	0,28	2323,8	1,64
	$\sigma$	2,46	6,03	0,02	256,14	0,15
	CV	11,0%	4,3%	7,1%	11,0%	8,9%
<b>AE35</b>	Média	9,53	72,5	0,43	1312,3	1,81
	$\sigma$	0,62	2,01	0,02	85,95	0,12
	CV	6,5%	2,8%	4,9%	6,5%	6,4%
<b>VE35</b>	Média	7,88	48,8	0,31	1243,2	2,55
	$\sigma$	0,73	1,68	0,01	115,55	0,26
	CV	9,3%	3,5%	4,2%	9,3%	10,3%

Estes resultados estão em concordância com resultados de outros estudos que utilizam materiais similares, como apresentado na

Tabela 3. Por exemplo, o fio de 5 mm de diâmetro (Benmokrane et al., 2000), com  $E_1$  de 160 GPa,  $\nu_{12}$  de 0,3,  $\sigma_T^*$  de 2450 MPa e  $\epsilon^u$  de 1,5%; o fio de 7,5 mm de diâmetro de AFRP (Schmidt et al., 2010) com  $E_1$  de 62 GPa,  $\nu_{12}$  de 0,3,  $\sigma_T^*$  de 1466 MPa e  $\epsilon^u$  de 2,1%; e o fio de GFRP (Potyrata, 2004) com  $E_1$  de 41 GPa e  $\sigma_T^*$  de 1030 MPa. Outros resultados similares podem ser encontrados em Meier (2012), Cai e Aref (2015), Adnur et al. (2011) e Wang e Zu (2010).

## 5.2. Coeficiente de Atrito Estático

A Tabela 10 apresenta os resultados para as medidas do Coeficiente de Atrito Estático (COF) para as amostras dos pares de fios (i) CE35/CE35, (ii) VE35/VE35 e para os pares híbridos (iii) CE35S/VE35S e (iv) VE35/VE35, bem como seus respectivos  $\sigma$  e CV. A arquitetura dos cabos híbridos serão apresentadas e discutidas na seção 5.6.3. Não obteve-se resultados satisfatórios para as análises das amostras AE30, o compósito não manteve uma superfície plana após o corte longitudinal nos corpos de prova, as fibras de aramida não se mantiveram alinhadas comprometendo o ensaio, o que não ocorreu nos compósitos de CFRP e GFRP. Realizaram-se 3 ensaios para cada amostra de pares.

Observa-se que a média do COF para o par CE35/CE35 é superior à média do par VE35/VE35, 0,61 e 0,37, respectivamente. Os pares híbridos apresentaram resultados similares considerando suas variações ( $0,50 \pm 0,05$  e  $0,49 \pm 0,06$ ), indicando que a posição dos compósitos não interfere nos resultados. Os resultados para o COF dos pares híbridos também indicam que o mesmo pode ser aproximado como uma média dos valores de COF dos pares isolados. De modo geral, estes valores de COF para materiais compósitos são elevados comparados a valores típicos de COF para cabos de aço, cerca de 0,10 (Zhang et al., 2017), e contribui para a elevada rigidez dos cabos em compósito. Os valores de COF para os compósitos estão coerentes com outros resultados, como por exemplo, 0,65 para um CFRP medido por Schön (2004) e 0,35 para um GFRP medido por Suresha et al. (2006).

Tabela 10 - Valores de COF para os diferentes pares analisados.

COF	CE35/CE35	VE35/VE35	CE35/VE35*	VE35/CE35*
Média	0,61	0,37	0,50	0,49
$\sigma$	0,05	0,03	0,05	0,06
CV	8,2%	8,7%	9,0%	13,0%

\* a ordem da amostra na nomenclatura indica o corpo e o contra-corpo, respectivamente.

## 5.3. Tração Cabo 1×7 CE35

Quatro cabos de construção 1×7 utilizando fios de CE35 (cabo 1×7 CE35) produzidos por um fabricante nacional de compósitos pultrudados foram ensaiados em tração. O modo de falha do cabo, apresentado na Figura 28, está de acordo com os apresentados por Motoyama et al., 2012 (anteriormente apresentado na Figura 7) e por Benmokrane et al. (2000). Os fios aparentemente rompem-se simultaneamente. Porém, sabe-se que a alma é o elemento que recebe a maior parte da carga, logo, irá deformar mais e será o primeiro a romper. Instantaneamente após esta fratura, os fios da coroa passam a receber o carregamento extra e abruptamente fraturam. Neste momento, os fios da coroa também são submetidos a uma solicitação em compressão causada pela alma que após fraturada,

rapidamente volta às dimensões originais (Stanova et al., 2015). Contudo, como a falha do cabo acontece instantaneamente, é difícil determinar seu mecanismo exato.

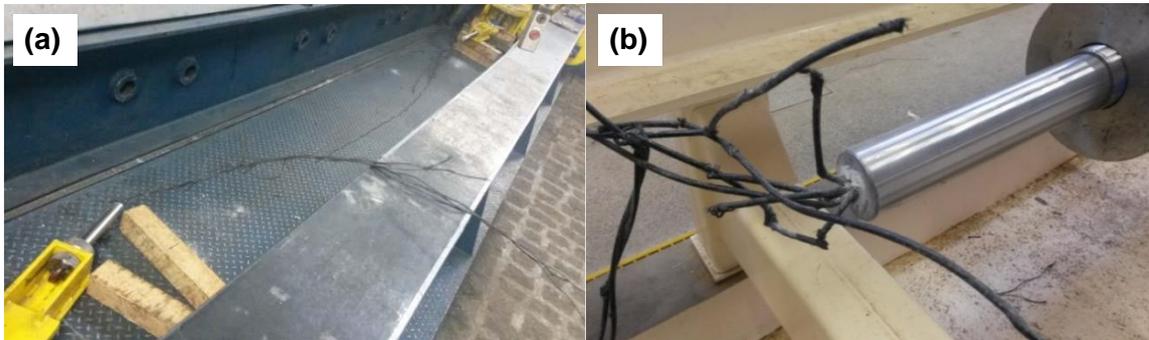


Figura 28 - (a) modo de falha do cabo 1x7 CE35 em sollicitação de tração e (b) em detalhe.

O gráfico da Figura 29 apresenta os resultados destes ensaios. A média da força de ruptura ( $\bar{F}^*$ ) foi 190,25 kN com um  $\sigma$  de 3,31 e um CV de 1,74%. Nestes ensaios não foi utilizado extensômetros ou *strain gauges*, e a deformação apresentada foi obtida através dos deslocamentos das garras dos suportes ( $\Delta l$ ), não sendo uma medida precisa, porém ainda permitindo observar qualitativamente o comportamento linear e a rigidez dos cabos ensaiados. O critério de falha para as demais análises será a deformação máxima ( $\epsilon^u$ ) do fio central (alma), pois nesta arquitetura de cabo é o elemento que recebe a maior carga e tem a maior deformação (Costello, 1997 e Erdonmez e Imrak, 2011), além de ser o único fio do cabo a ter todas as fibras do compósito alinhadas com o carregamento axial. Os valores de  $\bar{F}^*$  e  $\Delta l/l$  para estes cabos estão em concordância com os resultados dos estudos de Motoyama et al. (2012) e Menezes et al. (2017b), e com os dados apresentados nos catálogos de cabos 1x7 de CFRP comerciais.

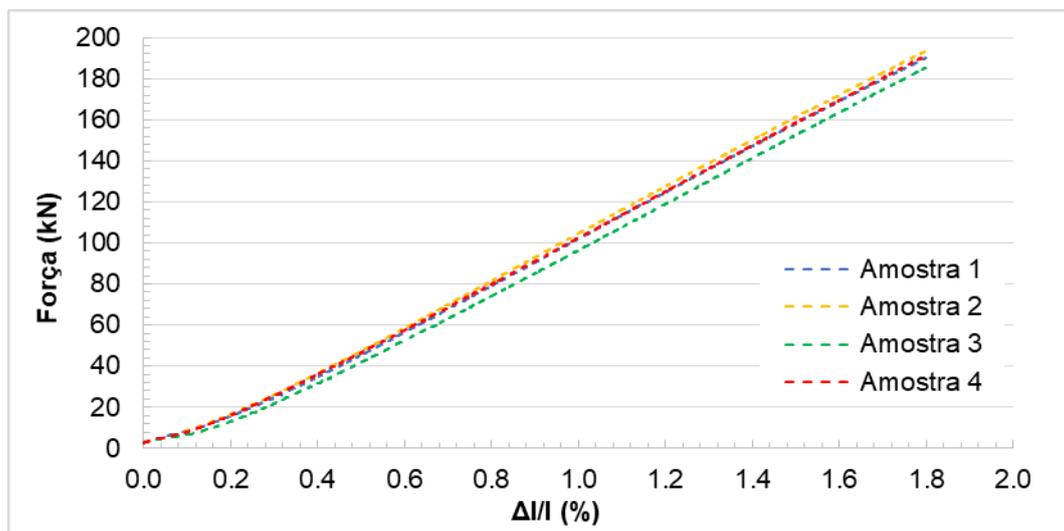


Figura 29 - Resultados experimentais para os ensaios de tração no cabo 1x7 CE35.

#### 5.4. Flexão Cabo 1x7 CE35

A Figura 30 mostra um corpo de prova do cabo 1x7 CE35 ao final do ensaio de flexão 4 pontos. Observou-se a falha dos fios constituintes dos cabos em deslocamentos inferiores a 25 mm (deslocamento máximo configurado para o ensaio). Observou-se também, que as medidas dos SG não foram confiáveis até o final dos ensaios. Um deslocamento de 25 mm para este pode ser considerado um grande deslocamento e é uma solicitação extrema para este componente, espera-se de um cabo em serviço que trabalhe apenas com pequenos deslocamentos, ou seja, dentro da região linear da curva apresentada na Figura 32, no caso do cabo ensaiado, com deslocamento inferiores à 10 mm.

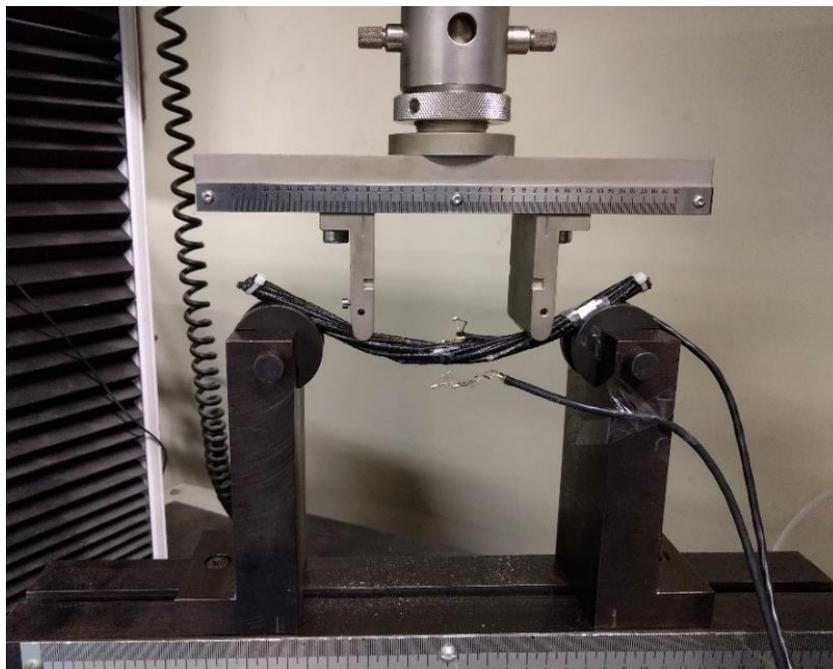


Figura 30 - Corpo de prova do cabo 1x7 CE35 ao final do ensaio de flexão 4 pontos.

O gráfico da Figura 31 apresenta os resultados dos ensaios de flexão quatro pontos realizados em quatro corpos de prova do cabo 1x7 CE35. O gráfico, que relaciona o momento de flexão em N.m vs. micro deformação, apresenta os resultados das medidas dos dois *strain gauges* posicionados na região de tração (primeiro quadrante, momento e deformação positivos) e na região de compressão (terceiro quadrante, momento e deformação negativos). Observa-se em ambas regiões um comportamento não-linear, com um aumento na rigidez. Este comportamento está de acordo com as amostras ensaiadas por Menezes et al. (2017), onde para valores de momento inferiores a 20 N.m, a curva apresenta-se como uma leve exponencial e posteriormente há uma declividade na curva e o momento tende a ficar constante para um aumento na deformação, como observado na Figura 8. Porém, suas

amostras são maiores e com uma quantidade maior de elementos (cabo 1×19), assim, os corpos de prova suportaram valores maiores de momento.

Observa-se também, uma grande dispersão nos valores registrados. Considerando-se um valor de momento de 5 N.m, por exemplo, as deformações correspondentes variam de 1380 a 2200  $\mu\text{m}$  em tração,  $\sigma$  de 373 e CV de 22%. Uma dispersão similar também é observada na região de compressão.

Estes comportamentos (não linearidade e alta dispersão) se devem possivelmente a uma variação na seção transversal circular do cabo, pois observou-se experimentalmente uma movimentação geométrica dos fios (grandes deslocamentos) ao longo do ensaio. Assim, a seção transversal não atua como uma seção rígida, indicando escorregamentos entre os fios, o que diminui o momento de inércia do cabo, reduzindo sua rigidez, como sugerido nos trabalhos de Menezes et al. (2017b) e Chen et al. (2017). A medida de deformação para este experimento foi obtida utilizando-se SG, que é uma medição pontual em um único fio externo do cabo, o que justifica a alta dispersão nos resultados obtidos.

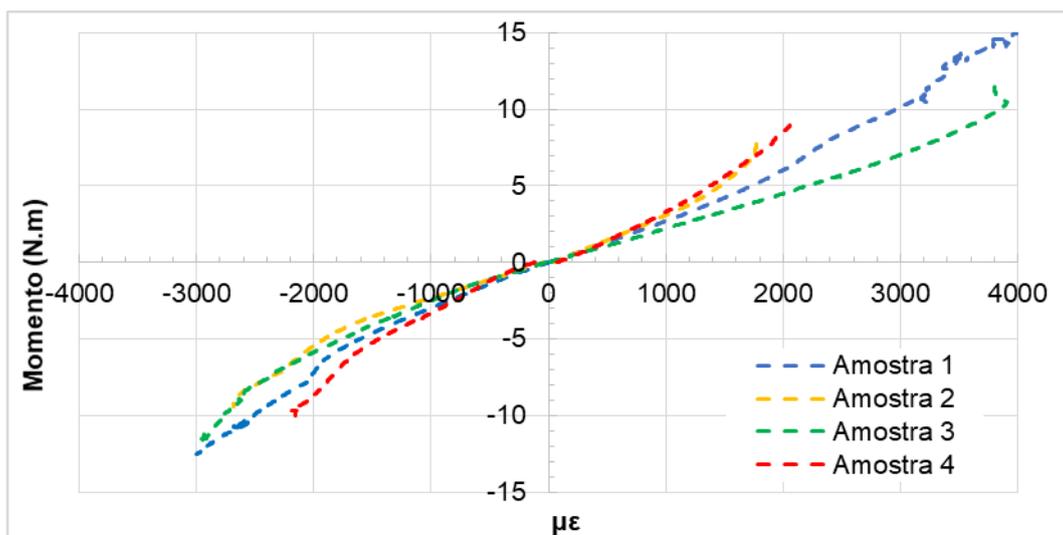


Figura 31 - Comportamento do cabo 1×7 CE35 em flexão para as medidas de momento e deformação.

O gráfico da Figura 32 apresenta os resultados para os mesmos ensaios de flexão quatro pontos, porém, através do deslocamento do punção da máquina de ensaio. Observa-se uma menor dispersão dos dados comparado ao gráfico momento vs. deformação. Os corpos de prova comportaram-se de maneira similar, apresentado um comportamento linear até deslocamentos inferiores a 10 mm. Após, há uma declividade e o comportamento passa a ser não-linear, com valores de força tendendo a uma constante a medida que o deslocamento aumenta. Para este deslocamento de 10 mm, os valores de força apresentam uma média ( $\bar{F}^{U=10mm}$ ) de 598,5 N,  $\sigma$  de 19,9 e CV de 3,3%. Observa-se também, diversas quedas de força ao longo das curvas, na curva da Amostra 3 (em verde), por exemplo, há três

quedas visíveis em 12, 16 e 18 mm. Tanto o comportamento não linear, quanto a ocorrência destas quedas na força, evidenciam o escorregamento entre os fios e variação da seção transversal circular citados anteriormente.

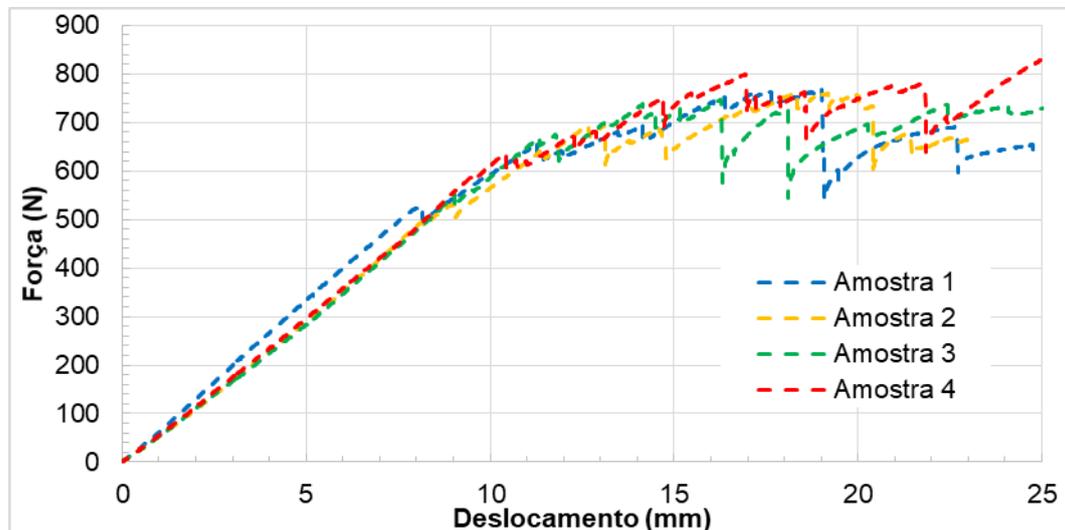


Figura 32 - Comportamento do cabo 1x7 CE35 em flexão para as medidas de força e deslocamento.

## 5.5. Verificações dos Modelos Numérico e Analítico

### 5.5.1. Determinação das Constantes de Engenharia

A Tabela 11 apresenta os valores das constantes de engenharia empregadas nos modelos estudados,  $E_1$  e  $\nu_{12}$  obtidos experimentalmente, e os demais, através do método dos invariantes (lâmina mestre) de Tsai e Melo (2014). Os valores e as proporções entre as constantes de engenharia calculados estão coerentes com materiais comerciais. O material comercial T700 C-ply 64 (Tsai e Melo, 2014) por exemplo, possui um valor de  $E_1$  muito semelhante (141,0 GPa) ao do fio CE35, e os valores para  $E_2$  (9,3 GPa) e  $G_{12}$  (5,8 GPa) também, apresentando erros inferiores a 10%. Estes resultados também estão coerentes com os resultados encontrados por Menezes et al. (2017b), onde  $E_1 = 132$  GPa,  $E_2 = 7,5$  GPa e  $G_{12} = 5,2$  GPa. Outro material AS4/H3501, também apresentado na Tabela 8, está igualmente de acordo com estes resultados,  $E_1 = 148$  GPa,  $E_2 = 9,5$  GPa e  $G_{12} = 4,5$  GPa.

Tabela 11 - Valores das constantes de engenharia empregadas nos modelos estudados.

$E_1 = 141,6 \text{ GPa } (\pm 6)^*$	$G_{12} = 5,3 \text{ GPa}^{**}$	$\nu_{12} = 0,28 (\pm 0,02)^*$
$E_2 = 8,5 \text{ GPa}^{**}$	$G_{13} = 5,3 \text{ GPa}^{**}$	$\nu_{13} = 0,28^{**}$
$E_3 = 8,5 \text{ GPa}^{**}$	$G_{23} = 4,7 \text{ GPa}^{**}$	$\nu_{23} = 0,47^{**}$

\* Obtido experimentalmente

\*\* Obtido através do método dos invariantes (Tsai e Melo, 2014)

### 5.5.2. Tração

As simulações utilizando o modelo numérico consumiram em média 90 min para cada caso em tração, utilizando um processador Intel Core i5-5200, 2.20 GHz com 8 GB de memória RAM. Já as simulações utilizando o modelo analítico (planilha Excel) foram realizadas instantaneamente. A Tabela 12 apresenta os resultados das simulações realizadas incluindo as incertezas probabilísticas das principais propriedades de entrada dos modelos bem como o valor do critério de falha empregado. Considerando todos os resultados, o modelo numérico apresentou um valor médio de força de ruptura em tração de 188,1 kN ( $\sigma$  de 15,39 e CV de 8,18%), comparado com os valores experimentais, este modelo apresentou uma diferença de -1,15%. Por outro lado, o modelo analítico apresentou uma diferença de 10,31% comparado ao valor experimental, com uma média de força de ruptura de 212,12 kN ( $\sigma$  de 17,80 e CV de 8,38%). Contudo, as diferenças nos resultados do modelo analítico são consistentes, empregando-se um fator de correção de 0,87 para os casos estudados, este modelo apresenta resultados similares ao do modelo numérico.

Tabela 12 - Resultados para a carga de falha para o cabo 1x7 em tração utilizando os modelos numérico e analítico.

Caso #	$\bar{\varepsilon}_{1t}^{u-\sigma}$			$\bar{\varepsilon}_{1t}^u$		$\bar{\varepsilon}_{1t}^{u+\sigma}$			
	Numérico	Analítico	Numérico	Analítico	Numérico	Analítico			
1	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	164		180		197	
2	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}$	164	184	180	203	197	221
3	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	164		181		197	
4	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	164		180		197	
5	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}$	164	184	180	203	197	221
6	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	164		180		197	
7	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	164		180		196	
8	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}$	164	184	180	203	196	221
9	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	164		180		197	
10	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	171		188		205	
11	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}$	171	192	188	212	205	231
12	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	171		188		205	
13	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	170		187		205	
14	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}$	170	192	188	212	205	231
15	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	170		188		205	
16	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	170		187		204	
17	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}$	170	192	187	212	205	231
18	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	170		187		205	
19	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	177		195		213	
20	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}$	177	200	195	221	213	241
21	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	177		195		213	
22	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	177		195		213	
23	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}$	177	200	195	221	213	241
24	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	177		195		213	
25	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	177		195		213	
26	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}$	177	200	195	220	213	241
27	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	177		195		213	
Média				171	193	188	212	205	231

A menor diferença apresentada pelo modelo numérico pode ser justificada por este considerar uma geometria tridimensional, com atrito e nove constantes elásticas. Os resultados para o modelo analítico mostram que as simplificações feitas necessitam refinamento, porém, os resultados são processados imediatamente, diferente do modelo numérico que necessita de longos períodos para gerar os resultados.

O gráfico da Figura 33 apresenta o comportamento do cabo em tração para os ensaios experimentais em comparação com os modelos estudados. Para esta comparação, utilizou-se o caso#14, utilizando nas simulações os valores médios das propriedades de entrada e o valor médio para o critério de falha. Observa-se novamente a pequena diferença entre o resultado experimental e o modelo numérico, e também a discrepância com o modelo analítico. Como esperado, em todos os resultados o comportamento do cabo foi linear.

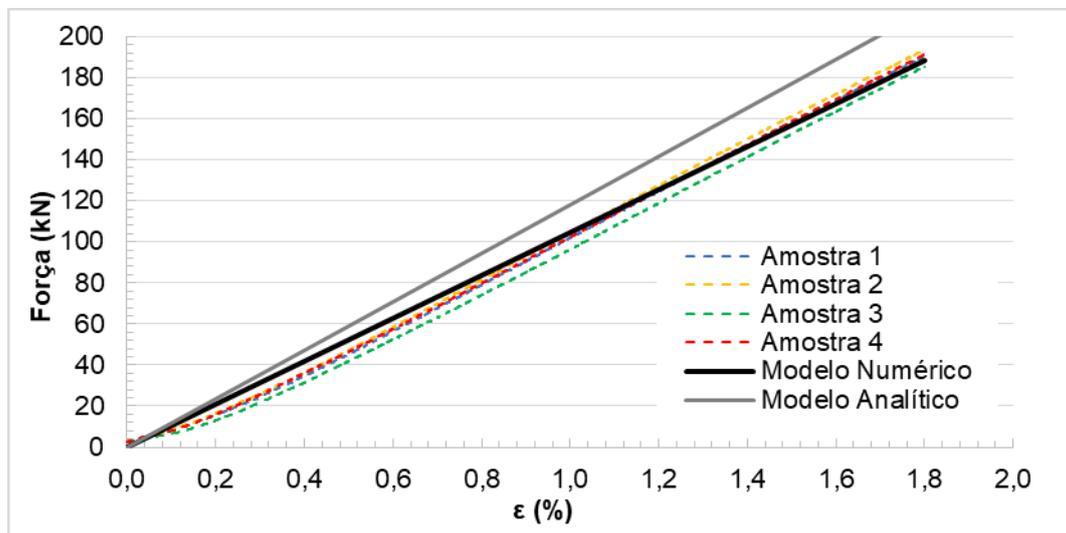


Figura 33 - Comparativo do comportamento do cabo 1x7 em tração entre os resultados experimentais e os modelos numérico e analítico.

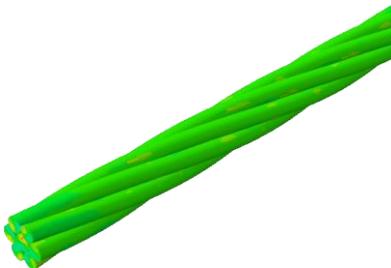
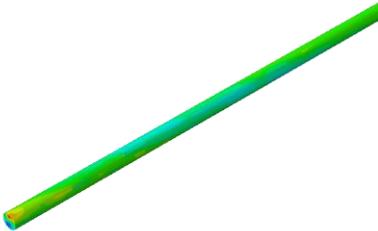
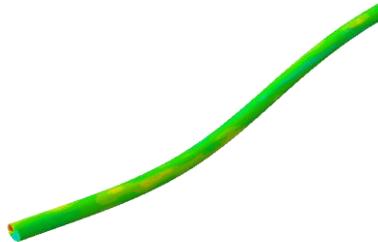
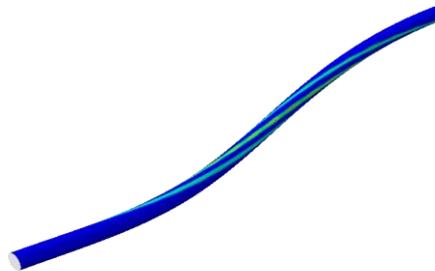
Com o modelo numérico é possível analisar em detalhes o comportamento do cabo, observando separadamente seus diferentes componentes (e.g. fio do núcleo e fios externos). A Tabela 13 apresenta imagens dos resultados para análise de tensão axial e pressão de contato utilizando o modelo numérico para o caso#14. Por serem imagens de menor tamanho, optou-se por não exibir o contorno dos elementos nestas imagens para facilitar sua visualização.

Observa-se que a tensão distribui-se uniformemente ao longo de todo o comprimento do cabo, representado por apenas uma cor predominante (verde) no diagrama de cores. Porém, uma variação maior na tensão é observada no núcleo, e a média de tensão recebida neste fio é de 2210 MPa. Os seis fios externos do cabo apresentaram uma distribuição de tensão e contato muito similares entre si, indicando que sua posição não interfere na

distribuição da carga entre eles. A média de tensão recebida pelo fio externo é de 1962 MPa, cerca de 13% menor que o fio do núcleo, uma proporção similar foi prevista por Costello (1997), que calculou uma contribuição do núcleo 15% maior em comparação a um dos fios externos.

É possível observar também a distribuição da pressão de contato entre os fios. No fio do núcleo observa-se linhas de pressão helicoidais ao longo do comprimento do fio, indicando a compressão exercida por todos os fios externos. Os valores de pressão média no núcleo é de 110 MPa, porém com pontos de contato com até 221 MPa. No fio externo, também observa-se as linhas de pressão, indicando o contato com fios adjacentes, porém, para a média de pressão de contato é de 71 MPa, chegando a pontos com até 171 MPa, inferior ao estimado para o núcleo.

Tabela 13 - Análises das distribuições de tensão e pressão de contato utilizando o modelo numérico.

	Tensão (MPa)	Pressão de Contato (MPa)
<b>Cabo</b>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+3.627e+03</li> <li>+3.353e+03</li> <li>+3.080e+03</li> <li>+2.806e+03</li> <li>+2.533e+03</li> <li>+2.260e+03</li> <li>+1.986e+03</li> <li>+1.713e+03</li> <li>+1.440e+03</li> <li>+1.166e+03</li> <li>+8.929e+02</li> <li>+6.195e+02</li> <li>+3.462e+02</li> </ul> 	<p>CPRESS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.214e+02</li> <li>+2.030e+02</li> <li>+1.845e+02</li> <li>+1.661e+02</li> <li>+1.476e+02</li> <li>+1.292e+02</li> <li>+1.107e+02</li> <li>+9.225e+01</li> <li>+7.380e+01</li> <li>+5.535e+01</li> <li>+3.690e+01</li> <li>+1.845e+01</li> <li>+0.000e+00</li> </ul> 
<b>Fio núcleo</b>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+3.250e+03</li> <li>+3.078e+03</li> <li>+2.906e+03</li> <li>+2.734e+03</li> <li>+2.563e+03</li> <li>+2.391e+03</li> <li>+2.219e+03</li> <li>+2.047e+03</li> <li>+1.875e+03</li> <li>+1.703e+03</li> <li>+1.531e+03</li> <li>+1.360e+03</li> <li>+1.188e+03</li> </ul> 	<p>CPRESS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.214e+02</li> <li>+2.030e+02</li> <li>+1.845e+02</li> <li>+1.661e+02</li> <li>+1.476e+02</li> <li>+1.292e+02</li> <li>+1.107e+02</li> <li>+9.225e+01</li> <li>+7.380e+01</li> <li>+5.535e+01</li> <li>+3.690e+01</li> <li>+1.845e+01</li> <li>+0.000e+00</li> </ul> 
<b>Fio externo</b>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.673e+03</li> <li>+2.554e+03</li> <li>+2.436e+03</li> <li>+2.317e+03</li> <li>+2.199e+03</li> <li>+2.081e+03</li> <li>+1.962e+03</li> <li>+1.844e+03</li> <li>+1.725e+03</li> <li>+1.607e+03</li> <li>+1.488e+03</li> <li>+1.370e+03</li> <li>+1.251e+03</li> </ul> 	<p>CPRESS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+1.715e+02</li> <li>+1.572e+02</li> <li>+1.429e+02</li> <li>+1.286e+02</li> <li>+1.143e+02</li> <li>+1.000e+02</li> <li>+8.575e+01</li> <li>+7.146e+01</li> <li>+5.717e+01</li> <li>+4.288e+01</li> <li>+2.858e+01</li> <li>+1.429e+01</li> <li>+0.000e+00</li> </ul> 

O gráfico da Figura 34 apresenta a pressão de contato recebida pelo fio central (na região da metade do seu comprimento) vs. a deformação axial ao longo da aplicação do carregamento. Observa-se inicialmente uma taxa de aumento de pressão maior até uma deformação de 0,2%, possivelmente gerada pelos contatos iniciais dos demais fios no fio central. Após, a pressão continua aumentando linearmente, porém com uma taxa inferior à inicial, provavelmente devido à uma acomodação dos fios externos. As pressões de contato são particularmente importantes para o estudo de desgaste dos cabos (Silva et al., 2017).

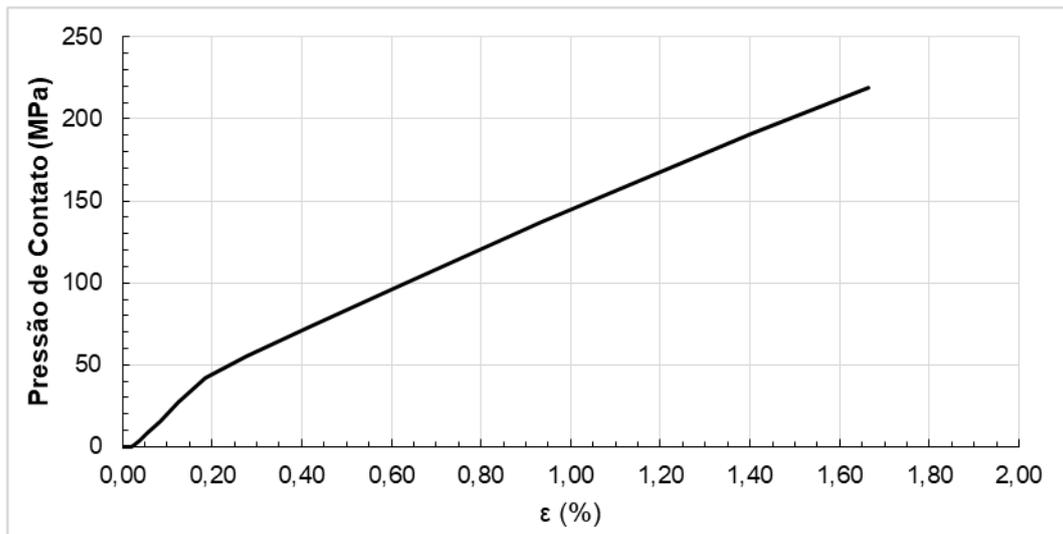


Figura 34 - Pressão de contato no fio central ao longo da aplicação de tração.

### 5.5.3. Flexão

As simulações para flexão utilizando o modelo numérico consumiram em média 180 min para cada caso, utilizando um processador Intel Core i5-5200, 2.20 GHz com 8 GB de memória RAM. Devido os incrementos de tempo iniciais baixos, os tempos iniciais da aplicação do deslocamento consumiu a maior parte do tempo total destas simulações, justamente quando onde os fios entram em contato. Caso os incrementos de tempo iniciais fossem maiores, haveria penetração entre fios e principalmente do cabo nos apoios, por serem cascas. Outro momento com processamento computacional mais intenso nas simulações foi em média quando chegou a 40% de aplicação do deslocamento, 10 mm, onde acredita-se começar o escorregamento entre fios e a perda da seção transversal circular.

Como visto anteriormente, as análises para momento vs. deformação apresentaram uma dispersão muito elevada, diferente das análises para deslocamento vs. força, que mostraram-se mais confiáveis, principalmente para deslocamentos inferiores a 10 mm. Assim, para a verificação dos modelos para solicitação em flexão, optou-se por comparar os resultados de força para o deslocamento em 10 mm ( $\bar{F}^{U=10mm}$ ). A Tabela 14 apresenta a

matriz de simulações realizadas incluindo as incertezas probabilísticas das principais propriedades de entrada dos modelos.

Considerando todos os resultados, o modelo numérico apresentou um valor médio de força para um deslocamento de 10 mm em flexão de 580,5 N ( $\sigma$  de 41,2 e CV de 7,1%), uma diferença de -3,11% comparado com a média dos valores experimentais. Por outro lado, o modelo analítico apresentou uma diferença de 12,06% comparado ao valor experimental, com uma média de força para um deslocamento de 10 mm de 680,5 N ( $\sigma$  de 24,9 e CV de 3,67%). Como para os resultados em tração, a diferença entre os valores experimentais e o modelo numérico foram menores comparadas ao modelo analítico pelos mesmos motivos citados anteriormente. Contudo, as diferenças nos resultados do modelo analítico são consistentes, empregando-se um fator de correção de 0,81 para os casos estudados, este modelo apresenta resultados similares ao do modelo numérico. Além disso, suas análises são mais rápidas que o modelo tridimensional.

Os gráficos das Figura 35 (momento vs. deformação) e Figura 36 (força vs. deslocamento) apresentam o comportamento do cabo em flexão para os ensaios experimentais em comparação ao numérico. Para estas comparações, utilizou-se o caso #14, e simulações utilizando os valores médio das propriedades de entrada. Observa-se na análise de momento vs. deformação que o modelo analítico não conseguiu representar a não-linearidade observada nos resultados experimentais, pois o modelo não considera escorregamento entre os fios, além de desconsiderar o atrito. Porém, o modelo numérico conseguiu prever o comportamento dos cabos medidos experimentalmente, inclusive o ponto onde ocorre uma declividade na curva e o momento tende a ficar constante para um aumento na deformação, mesmo comportamento observado experimentalmente em Menezes et al. (2017b). Porém, estes autores não conseguiram sucesso em prever este comportamento com o modelo implementado, provavelmente devido às simplificações impostas (i.e. simetria e aplicação de carregamento de momento ao invés de deslocamento e aplicado em nós específicos). Contudo, similar aos resultados em tração, aplicando-se um fator de correção de 0,81 para os resultados do modelo analítico, a diferença com relação ao modelo numérico torna-se próximo de zero.

Tabela 14 - Resultados da carga para um deslocamento de 10 mm para o cabo 1x7.

Caso #				Numérico	Analítico
1	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	552	651
2	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}$	555	
3	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	543	
4	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	550	651
5	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}$	544	
6	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	544	
7	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	544	651
8	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$COF$	550	
9	$\bar{E}_1^{-\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	534	
10	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	580	680
11	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}$	558	
12	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	565	
13	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	632	680
14	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}$	605	
15	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	564	
16	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	565	680
17	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}$	561	
18	$\bar{E}_1$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	556	
19	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	669	709
20	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}$	591	
21	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{-\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	580	
22	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	661	709
23	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}$	582	
24	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	565	
25	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{-\sigma}$	657	709
26	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}$	588	
27	$\bar{E}_1^{+\sigma}$	$\bar{v}_{12}^{+\sigma}$	$\overline{COF}^{+\sigma}$	665	
Média				580	680

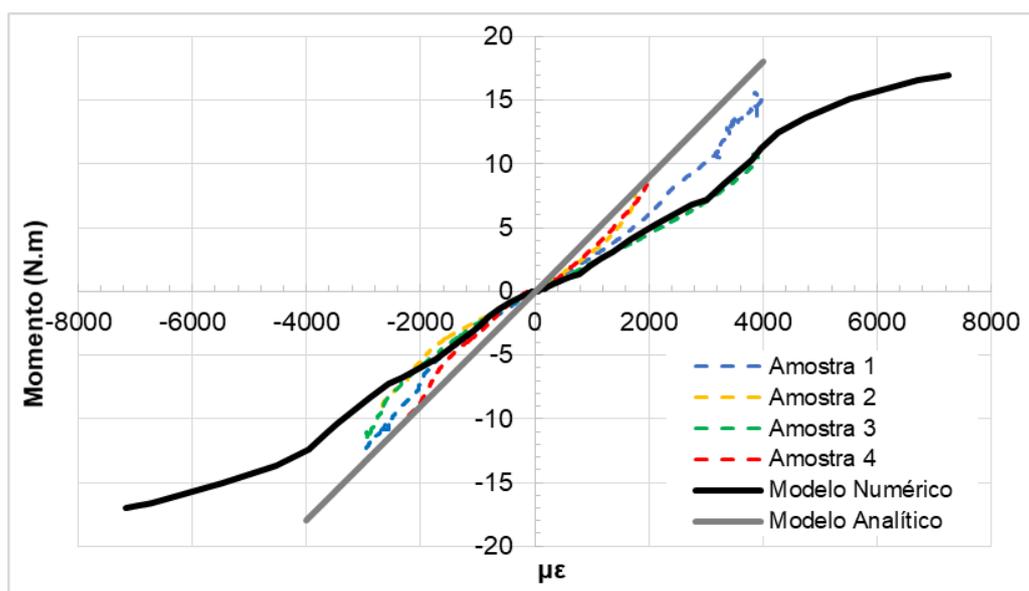


Figura 35 - Comparativo do comportamento momento vs. deformação do cabo 1x7 em flexão entre os resultados experimentais e os numérico e analítico.

Observa-se na análise de força vs. deslocamento que modelo analítico novamente não conseguiu representar a não-linearidade observada nos experimentos. Também, o modelo numérico conseguiu prever o comportamento do cabo, porém, a diferença entre os resultados experimentais e este modelo para deslocamentos acima de 10 mm foram maiores. A curva estabiliza em valores maiores de força, diferente dos resultados experimentais, indicando uma maior rigidez para a estrutura.

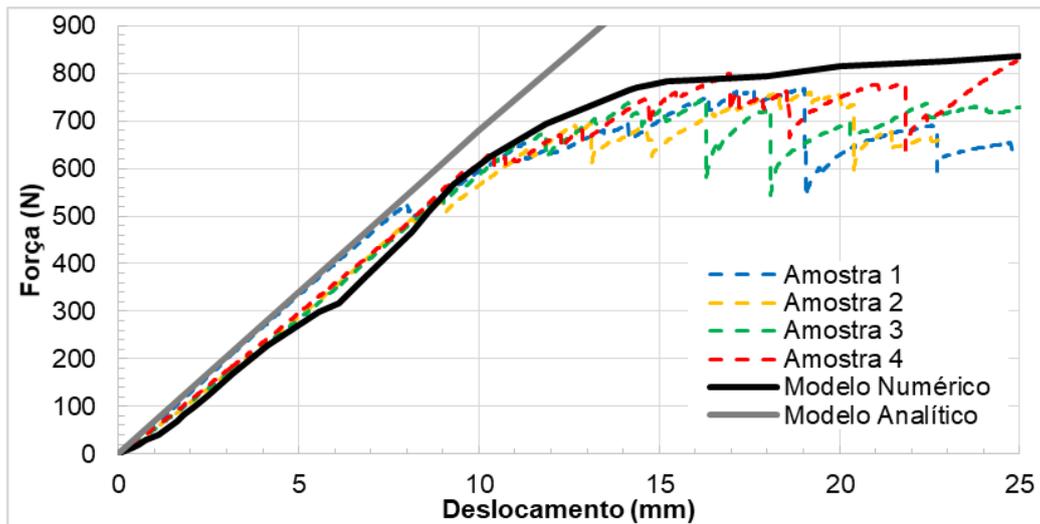


Figura 36 - Comparativo do comportamento força vs. deslocamento do cabo 1x7 em flexão entre os resultados experimentais e os numérico e analítico.

Com modelo numérico é possível analisar em maiores detalhes o comportamento do cabo em flexão, observando separadamente seus diferentes componentes (e.g. fio do núcleo e fios externos) e, principalmente, poder investigar a hipótese de escorregamento entre os fios e o efeito na seção transversal. A Figura 37 apresenta resultados da deformação do cabo para análise de flexão utilizando o modelo numérico para o caso #14. Observa-se no Detalhe 1 da Figura 37a que o cabo não deformado apresenta um visível alinhamento entre os elementos dos diferentes fios, eles estão posicionados ordenadamente um abaixo do outro, indicado pelas setas verticais. Porém, no Detalhe 2, quando o cabo é deformado, observa-se que o alinhamento se perde, e os elementos entre os diferentes fios ficam deslocados. Observa-se também que os fios posicionados nas extremidades superior e inferior se deslocam mais em comparação aos posicionados no centro. Além disso, observa-se também uma movimentação de torção nos fios, possivelmente necessária para que os mesmos pudessem se acomodar para suportar o esforço em flexão. Na Figura 37b observa-se os cortes transversais das seções no centro do cabo. No cabo não deformado, a seção é circular com raio de 10,5 mm, após a deformação decorrente da aplicação da flexão, a seção é observada elíptica, com o valor do raio maior igual 11,95 mm, um aumento de 14%. Efeito similar ocorre na seção de cada fio, porém, em uma escala menor, com um aumento de

apenas 0,9% no raio maior do fio central, passando de 3,5 para 3,53 mm. Contudo, este efeito nos fios deve-se, possivelmente ao coeficiente de Poisson do material, pouco contribuindo na diferença observada na seção do cabo.

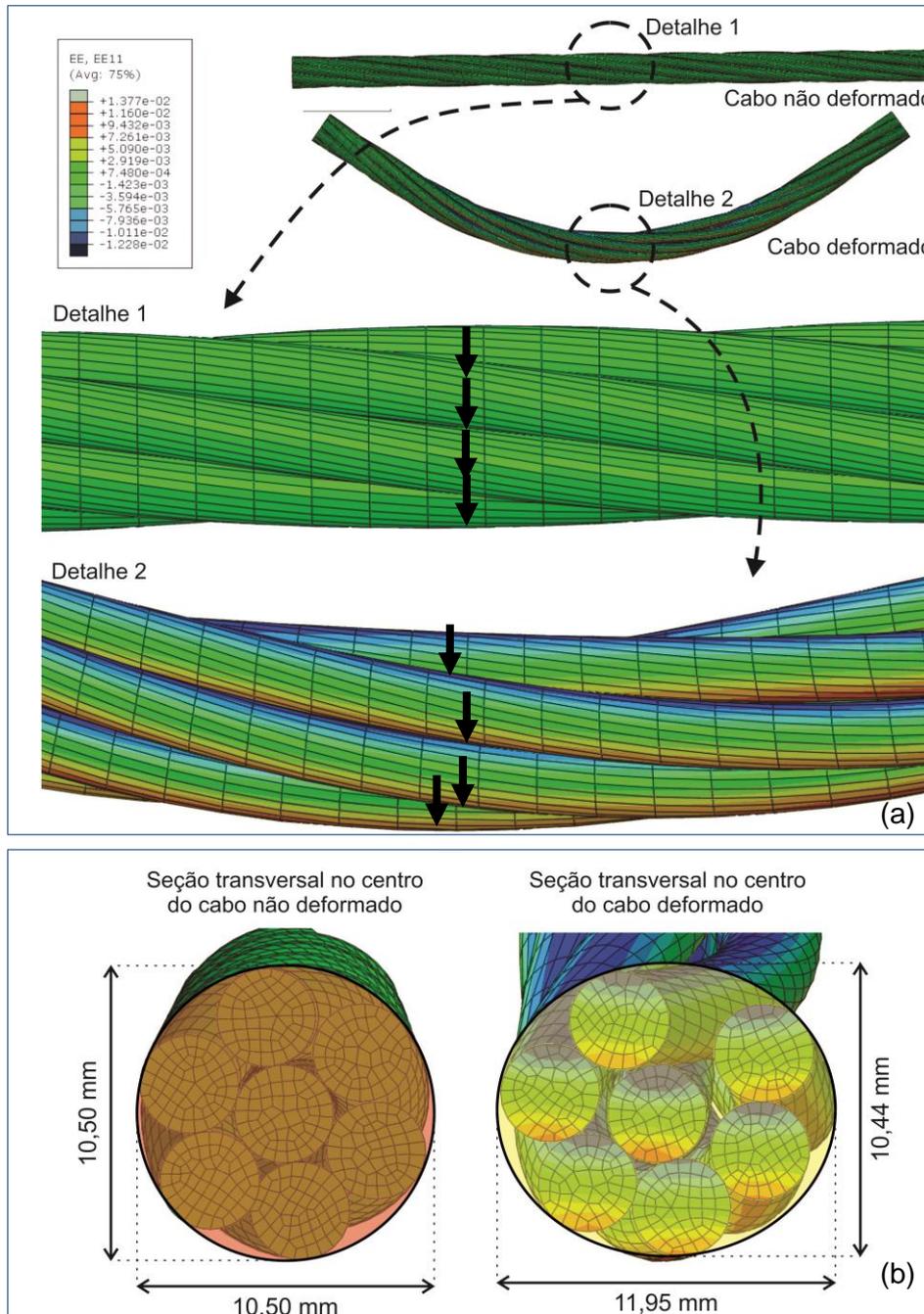


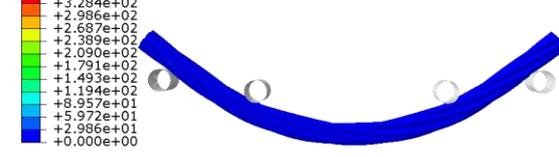
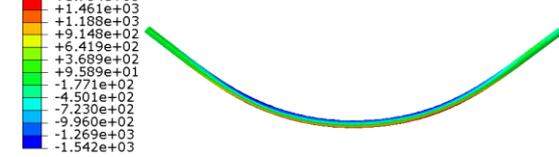
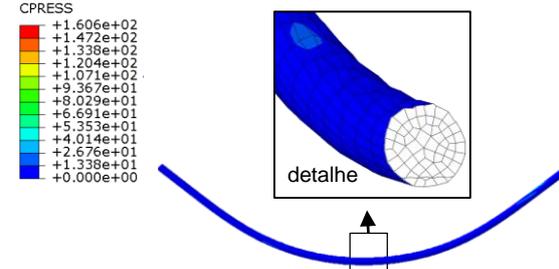
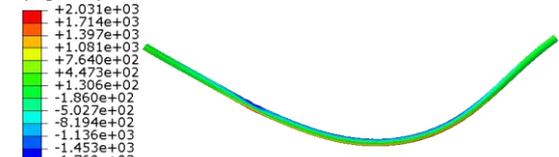
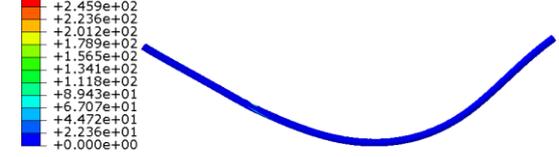
Figura 37 - Análise da perda da seção transversal circular do cabo quando submetido à flexão.

Assim, evidencia-se nestas análises uma elevada movimentação geométrica independente entre os fios, com escorregamento, torção e perda da seção transversal circular, indicando que a mesma não atua com uma seção rígida. Este fenômeno é ignorado por grande parte dos modelos analíticos estudados. Analisa-se também que a dispersão dos

resultados de deformação dos ensaios experimentais com SG é compreensível, pois uma medição pontual não é capaz de captar a complexidade de movimentações geométricas e esforços aos quais os fios estavam sujeitos. Contudo, o projeto de um cabo de compósito deve considerar que a estrutura não opera nesta faixa de deslocamentos.

A Tabela 15 apresenta imagens dos resultados para as distribuições de tensão axial e pressão de contato utilizando o modelo para o caso #14. Observa-se que há tensões de tração e compressão atuantes em todo o cabo, mais visivelmente no fio do núcleo mas também nos fios externos. A tensão máxima de tração no cabo mostrou-se levemente maior do que a de compressão. Diferentemente do cabo em tração, o fio do núcleo em flexão não recebe a maior parte da carga, neste caso está recebendo 1734 MPa em tração e -1542 MPa em compressão enquanto que o fio externo, 2031 MPa em tração e -1769 MPa em compressão, cerca de 14% maior em tração e 13% maior em compressão. Ressalta-se que este comparativo está sendo baseado no cabo 1x7 CE35 quando aplicado a ele um deslocamento vertical de 25 mm em um ensaio de flexão quatro pontos.

Tabela 15 - Análises das distribuições de tensão e pressão de contato utilizando o modelo numérico.

	Tensão (MPa)	Pressão de Contato (MPa)
<b>Cabo</b>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.031e+03</li> <li>+1.714e+03</li> <li>+1.397e+03</li> <li>+1.081e+03</li> <li>+7.640e+02</li> <li>+4.473e+02</li> <li>+1.306e+02</li> <li>-1.860e+02</li> <li>-5.027e+02</li> <li>-8.194e+02</li> <li>-1.136e+03</li> <li>-1.453e+03</li> <li>-1.769e+03</li> </ul> 	<p>CPRESS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+3.583e+02</li> <li>+3.284e+02</li> <li>+2.986e+02</li> <li>+2.687e+02</li> <li>+2.389e+02</li> <li>+2.090e+02</li> <li>+1.791e+02</li> <li>+1.493e+02</li> <li>+1.194e+02</li> <li>+8.957e+01</li> <li>+5.972e+01</li> <li>+2.986e+01</li> <li>+0.000e+00</li> </ul> 
<b>Fio núcleo</b>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+1.734e+03</li> <li>+1.461e+03</li> <li>+1.188e+03</li> <li>+9.148e+02</li> <li>+6.419e+02</li> <li>+3.689e+02</li> <li>+9.589e+01</li> <li>-1.771e+02</li> <li>-4.501e+02</li> <li>-7.230e+02</li> <li>-9.960e+02</li> <li>-1.269e+03</li> <li>-1.542e+03</li> </ul> 	<p>CPRESS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+1.606e+02</li> <li>+1.472e+02</li> <li>+1.338e+02</li> <li>+1.204e+02</li> <li>+1.071e+02</li> <li>+9.367e+01</li> <li>+8.029e+01</li> <li>+6.691e+01</li> <li>+5.353e+01</li> <li>+4.014e+01</li> <li>+2.676e+01</li> <li>+1.338e+01</li> <li>+0.000e+00</li> </ul> 
<b>Fio externo</b>	<p>S, S11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.031e+03</li> <li>+1.714e+03</li> <li>+1.397e+03</li> <li>+1.081e+03</li> <li>+7.640e+02</li> <li>+4.473e+02</li> <li>+1.306e+02</li> <li>-1.860e+02</li> <li>-5.027e+02</li> <li>-8.194e+02</li> <li>-1.136e+03</li> <li>-1.453e+03</li> <li>-1.769e+03</li> </ul> 	<p>CPRESS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.683e+02</li> <li>+2.459e+02</li> <li>+2.236e+02</li> <li>+2.012e+02</li> <li>+1.789e+02</li> <li>+1.565e+02</li> <li>+1.341e+02</li> <li>+1.118e+02</li> <li>+8.943e+01</li> <li>+6.707e+01</li> <li>+4.472e+01</li> <li>+2.236e+01</li> <li>+0.000e+00</li> </ul> 

A distribuição da pressão de contato para o cabo em flexão é maior nas regiões de contato do cabo com os apoios (358 MPa). Porém, a média para o núcleo é de 67 MPa com máximo de 160 MPa, e para o fio externo é de 112 MPa com máximo de 268 MPa, valores superiores aos da pressão de contato para o cabo em tração pura (média de 110 MPa com máximo de 221 MPa). Observa-se também, no detalhe da imagem da pressão de contato no fio do núcleo, a deformação dos elementos causada pelos esforços. Esta deformação não foi observada na malha dos fios externos.

Observa-se no gráfico Figura 38 pressão de contato vs. deslocamento para o ensaio de flexão para o fio central, um dos fios externos e para um dos apoios. Diferentemente da pressão de contato para o fio central observada em tração, para flexão inicialmente a pressão de contato é próxima de zero, provavelmente devido aos *gaps* e acomodações iniciais dos fios. O comportamento do fio externo e apoio sofrem diversas variações ao longo do ensaio, na região próxima ao deslocamento de 10 mm, há um diminuição na taxa da pressão do apoio e um aumento na taxa sofrida pelo fio externo, indicando o início do escorregamento e perda da sessão transversal. Porém, nos valores de deslocamentos finais do ensaio, as taxas de pressão aumentam para todos os componentes, indicando possivelmente que não mais espaço para movimentação geométrica a fim do cabo suportar o carregamento aplicado.

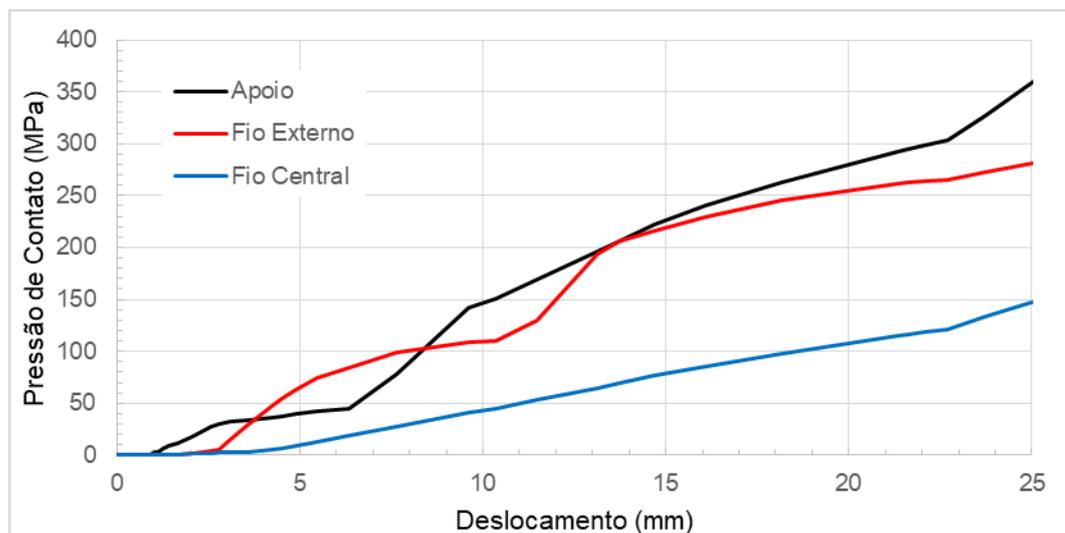


Figura 38 - Pressão de contato ao longo da aplicação de flexão.

#### 5.5.4. Análise Estatística

Análises estatísticas foram realizadas com o objetivo de: (i) verificar se há diferenças significativas entre os resultados dos modelos e os resultados experimentais, em tração e em flexão, e (ii) verificar a sensibilidade dos modelos aos dados de entrada. Estas análises foram realizadas com o auxílio do *software* IBM SPSS.

O conjunto de dados analisados inicialmente foram: (i) para tração: força de ruptura obtido pelos experimentos ( $n=4$ ), modelo numérico ( $n=81$ ) e pelo modelo analítico ( $n=27$ ), e (ii) para flexão: força correspondente para um deslocamento de 10 mm obtido pelos experimentos ( $n=4$ ), pelo modelo numérico ( $n=27$ ) e pelo modelo analítico (9). A hipótese de normalidade dos dados foi verificada utilizando o teste de Kolmogorov–Smirnov. O teste de Levene também foi aplicado para a verificação da homogeneidade de variância. O valor-p para os dois testes foi inferior a 0,05 (Tabela 16) indicando que (i) os dados são não-paramétricos e (ii) não há igualdade de variâncias em pelo menos um dos grupos. Portanto, somente testes não-paramétricos foram empregados nas análises subsequentes.

Para verificar as diferenças estatísticas significativas entre os resultados experimentais e os dos modelos, aplicou-se o teste-H de Kruskal–Wallis para os resultados em tração e flexão. Conforme apresentado na Tabela 16, o valor-p foi inferior a 0,05, indicando que há diferença em pelo menos um dos modelos em comparação aos resultados experimentais. Contudo, este teste não indica em qual dos grupos está esta diferença (resultados do modelo numérico ou do analítico). Portanto, aplicou-se o teste-U Mann-Whitney, cujo resultado também pode ser observado na Tabela 16. Esta análise indicou que não há diferença estatística significativa entre os resultados experimentais e os gerados pelo modelo numérico, tanto para tração (valor-p 0,852) quanto para flexão (valor-p 0,738). Por outro lado, há uma diferença estatística significativa entre os resultados experimentais e os gerados pelo modelo analítico, tanto para tração (valor-p 0,022) quanto para flexão (valor-p 0,018). Ou seja, os resultados experimentais e numéricos são similares, porém ambos diferem do analítico.

Por fim, com o objetivo de verificar a sensibilidade dos modelos aos dados de entrada, aplicou-se outro teste-H Kruskal–Wallis. Os dados do modelo numérico foram organizados em três grupos: (i) casos 5, 14 e 23, (ii) casos 11, 14 e 17, e (iii) casos 13, 14 e 15; e os do modelo analítico em dois grupos: (i) casos 4-6, 13-15 e 22-24, e (ii) casos 10-12, 13-15 e 16-18. Deste modo, isolam-se as propriedades de entrada de interesse para análises independentes ( $E_1$ ,  $\nu_{12}$  e COF). Não encontrou-se diferença entre os grupos para ambos os modelos, tanto para tração quanto para flexão, com um valor-p 1,00 para todas as análises. Portanto, todas as propriedades de entrada contribuem de maneira similar aos resultados dos modelos, o que concorda com a análise de Menezes et al. (2017a), onde os autores verificaram não haver variação significativa nos resultados numéricos com variações nos valores de  $E_1$  e  $\nu_{12}$ .

Tabela 16 - Resultados para as análises estatísticas.

		Experimental	Númérico	Analítico
<b>Kolmogorov–Smirnov</b>		< 0,001		
<b>Levene</b>		0,017		
<b>Tração</b>	<b>Kruskal–Wallis</b> (para diferenças entre modelos)	< 0,001		
	<b>Mann-Whitney</b>	-	0,852	0,022
	<b>Kruskal–Wallis</b> (para os parâmetros individuais de entrada)	-	1,00	1,00
<b>Flexão</b>	<b>Kruskal–Wallis</b> (para diferenças entre modelos)	< 0,001		
	<b>Mann-Whitney</b>	-	0,738	0,018
	<b>Kruskal–Wallis</b> (para os parâmetros individuais de entrada)	-	1,00	1,00

## 5.6. Análises Utilizando Modelo Numérico

Considerando as análises anteriores, o modelo numérico mostrou-se confiável em prever o comportamento do cabo 1×7 CE35 em diferentes solicitações mecânicas. Assim, realizou-se outras análises utilizando este modelo. Inseriu-se os valores médios das propriedades de entrada (caso #14) e optou-se por aplicar um deslocamento de 14 mm para simulações de flexão ao invés dos 25 mm aplicados anteriormente para diminuir a demanda computacional, já que os principais fenômenos estudados (i.e. perda da seção transversal circular) ocorrem nesta faixa.

### 5.6.1. Influência do Comprimento do Passo

A escolha do comprimento passo do cabo é um importante parâmetro para seu desempenho. Como visto anteriormente, para fios de materiais compósitos, quanto maior o passo, maior a rigidez e menor sua flexibilidade. Para avaliar esta relação entre o passo e as resistências em tração e flexão, variou-se o valor do passo para o cabo 1×7 CE35 (com o mesmo diâmetro de fios de 3,5 mm) para os seguintes valores: (i) 50 mm, (ii) 100 mm, (iii) 300 mm e (iv) 500 mm. As simulações para tração e flexão seguiram as mesmas condições das análises anteriores.

A Figura 39 apresenta os resultados para as simulações em tração para os diferentes passos, empregou-se o mesmo critério de falha anterior, deformação máxima de 1,64%. Como previsto, o cabo com passo 500 mm apresentou a maior rigidez e maior resistência (218 kN) entre os analisados. O cabo com passo 50 mm apresentou a menor rigidez e a menor resistência, 72 kN, cerca de 67% a menos que o cabo de passo 500 mm. Ou seja, uma redução de 90% no comprimento do passo (500 para 50 mm) gerou uma redução de 67% na resistência do cabo. Estes resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Utting e Jones (1987a, 1987b) e Jun et al. (2008) para tração em cabos de aço. Esta relação

não-linear entre resistência à tração e comprimento do passo é apresentado na Figura 40, onde observa-se uma declividade na região entre 90 e 150 mm do comprimento do passo.

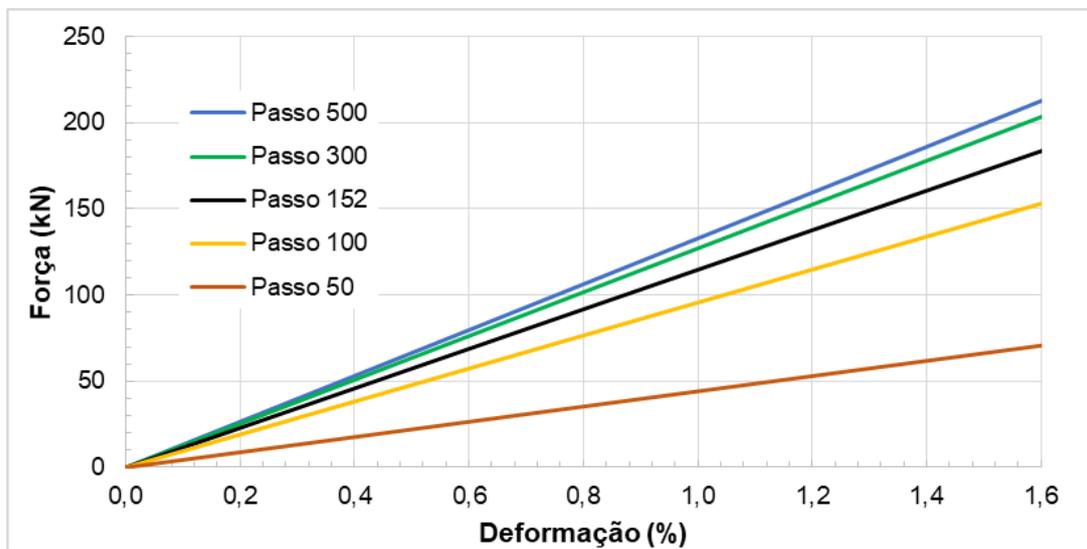


Figura 39 - Análise do cabo 1x7 CE35 com diferentes comprimentos de passo com carregamento em tração pura.

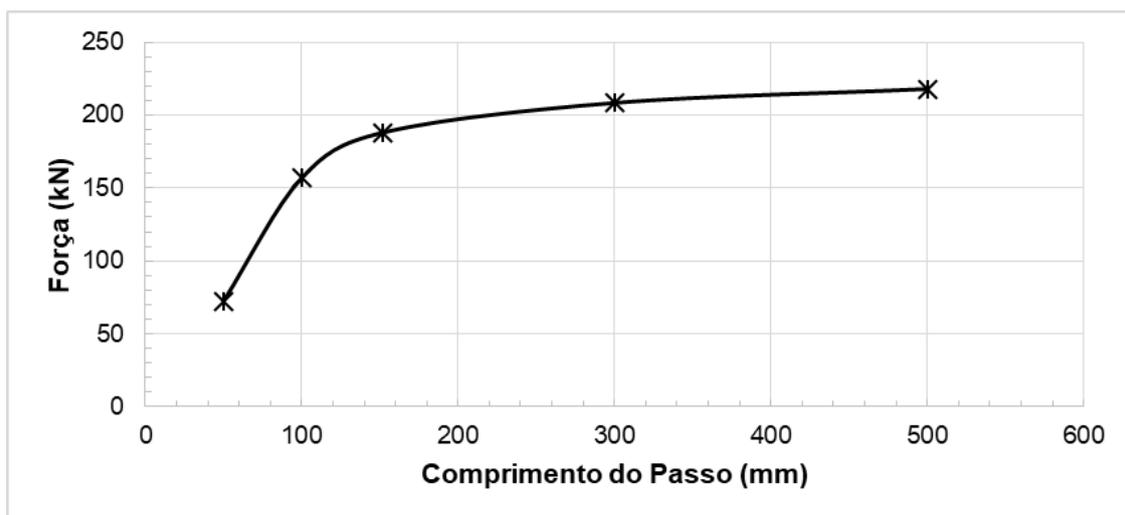


Figura 40 - Relação entre o comprimento do passo e a resistência à tração para o cabo 1x7 CE35.

A influência dos diferentes passos em flexão é observada nas Figura 41 e Figura 42. No gráfico Momento vs. Deformação (Figura 41), observa-se o comportamento distinto entre os diferentes comprimentos de passo, sendo o de 500 mm o mais rígido e o de 50 mm, o menos. Nas amostras 500 e 152 mm, é possível observar a declividade na curva, indicando a perda da seção transversal circular e conseqüentemente, a redução na rigidez. Este comportamento não foi observado nas amostras de menores passos, 100 e 50 mm, indicando que o momento gerado nestes cabos não foi o suficiente para ocorrer o escorregamento entre os fios. Ou seja, menores comprimentos de passos conferem maior flexibilidade em flexão ao cabo. O mesmo comportamento pode ser observado no gráfico Força vs. Deslocamento

(Figura 42), onde as amostras com os passos 500 e 152 mm apresentam escorregamento entre os fios, e as com passo 100 e 50 mm, não.

Neste mesmo gráfico, para um deslocamento de 10 mm, a força correspondente para o comprimento de passo 500 mm é de 1210 N, valor que reduz em 82% comparado ao cabo com comprimento de passo de 50 mm, 220 N. Ou seja, em flexão, uma redução de 90% no comprimento do passo (500 para 50 mm) gerou uma redução de 82% na força gerada do cabo. Esta relação não linear entre resistência à tração vs. comprimento do passo é apresentado na Figura 43, onde observa-se uma declividade, assim como na sollicitação em tração, na região entre 90 e 150 mm do comprimento do passo, indicando novamente um valor de passo com um bom compromisso entre a flexibilidade em flexão sem comprometer a resistência à tração.

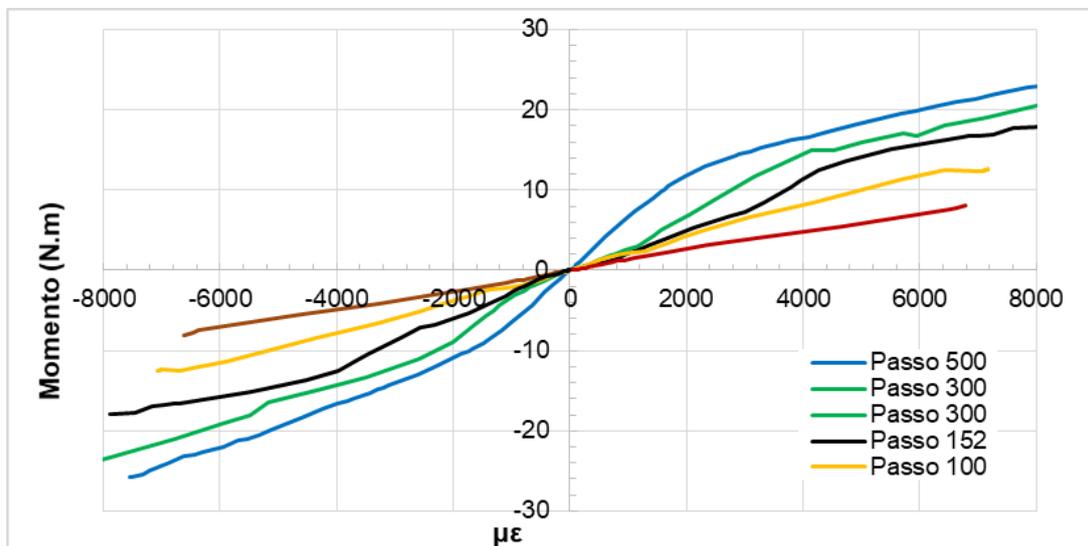


Figura 41 - Análise do cabo 1x7 CE35 com diferentes comprimentos de passo com carregamento em flexão.

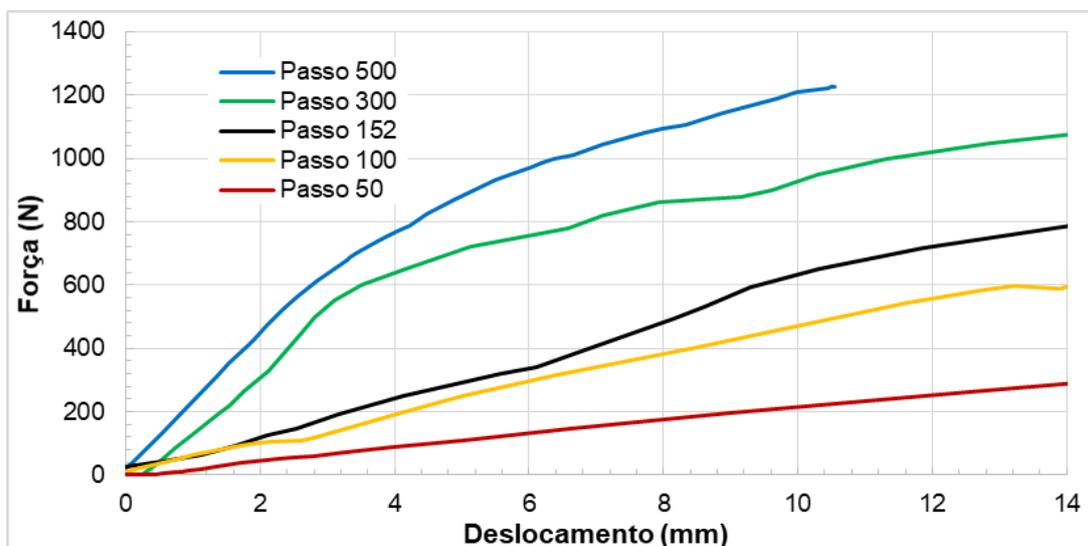


Figura 42 - Análise do cabo 1x7 CE35 com diferentes comprimentos de passo com carregamento em flexão.

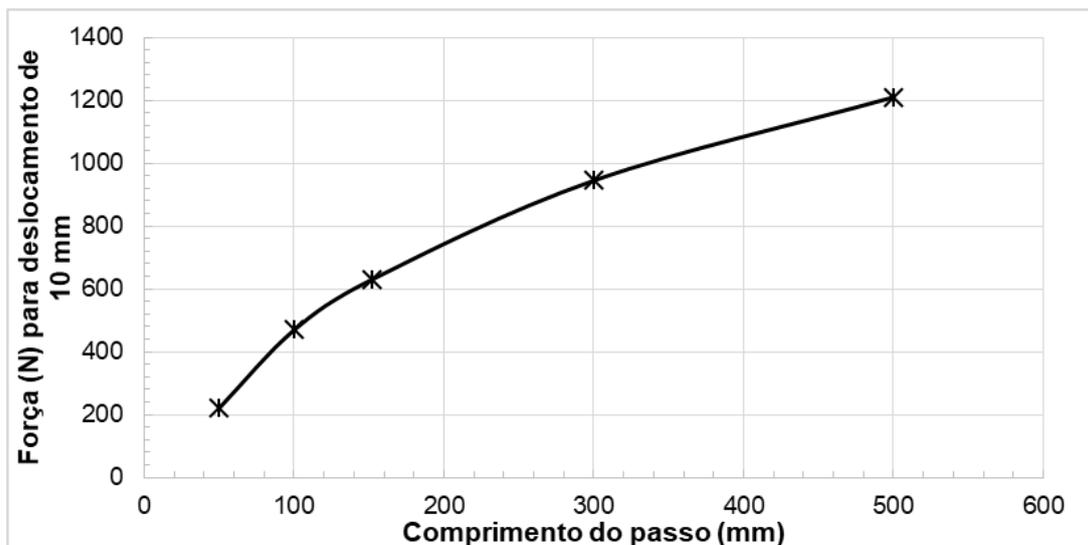


Figura 43 – Relação entre o comprimento do passo e a força em tração para o cabo 1x7 CE35.

A Figura 44 apresenta as seções transversais do cabo para um deslocamento de 10 mm para diferentes comprimentos de passos para análise de deformação longitudinal, a legenda de cores apresentada representa as distribuições de deformação longitudinal para todos os casos apresentados. Observa-se para os comprimentos de passo 50 e 100 mm que a seção ainda é circular, mas, para o de 152 mm, torna-se elíptica, conforme analisando anteriormente (aumento de 14% no diâmetro com relação ao cabo não deformado). Por fim, observa-se que o comprimento de passo de 500 mm gerou uma seção transversal muito irregular, mesmo para um deslocamento relativamente pequeno, o que concorda com a perda da rigidez e início da declividade precoce no gráfico Força vs. Deslocamento, e indica a sensibilidade do momento de inércia do cabo ao passo aplicado. Neste comprimento de passo, saliente-se que os pares de contato considerados inicialmente não contemplam mais todos os pares de contatos atuando no cabo. Assim, caso o objetivo fosse a convergência deste caso, novas condições de contorno deveria ser criadas para o modelamento de contato deste comprimento de passo.

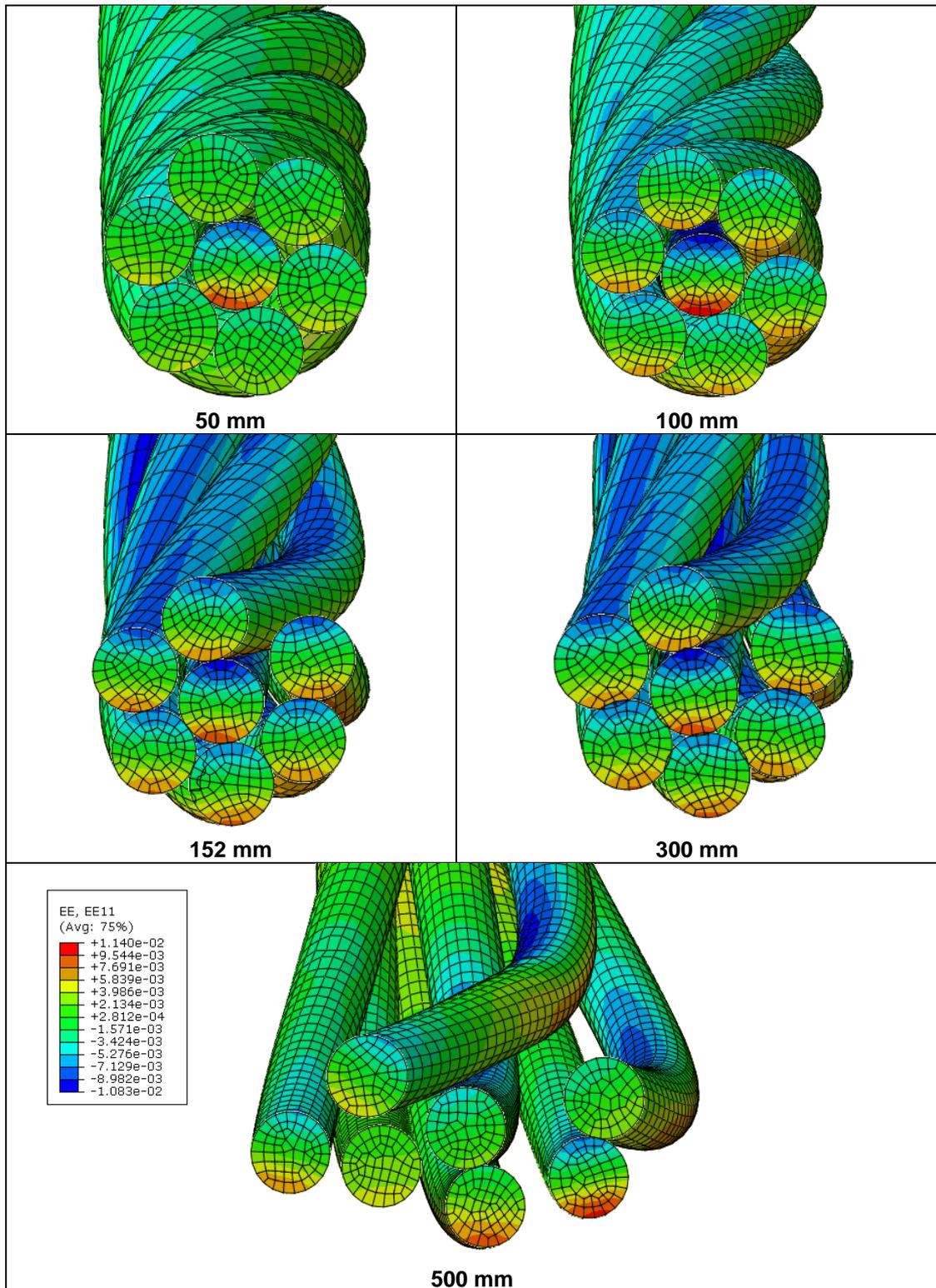


Figura 44 - Seções transversais do cabo 1x7 CE35 para diferentes comprimentos de passo.

### 5.6.2. Influência da Variação do COF

A análise estatística não evidenciou a sensibilidade do modelo a pequenas variações do COF ( $0,61 \pm 0,05$ ), contudo, se desconhece os efeitos de variações maiores nesta propriedade. Portanto, variou-se o valor de COF para o cabo 1x7 CE35 desde uma condição

sem atrito (COF = 0) até COF = 1,0, para tração e flexão, utilizando as mesmas condições analisadas anteriormente.

O gráfico da Figura 45 apresenta a curva Força vs. Deformação deste cabo sob um carregamento axial para as condições de ponta-fixa e ponta-livre. Observa-se que todas as curvas para uma determinada condição estão sobrepostas, indicando um mesmo comportamento para as variações nos valores de COF, confirmando o que havia sido previsto por Costello (1997), Utting e Jones (1987a, 1987b) e Ghoreishi (2007a). Contudo, para a condição de ponta-fixa os cabos apresentaram uma maior rigidez em comparação à condição de ponta-livre, conforme já observado em trabalhos como Utting e Jones (1987a, 1987b), Páczelt e Beleznai (2011) e Jiang et al. (1999).

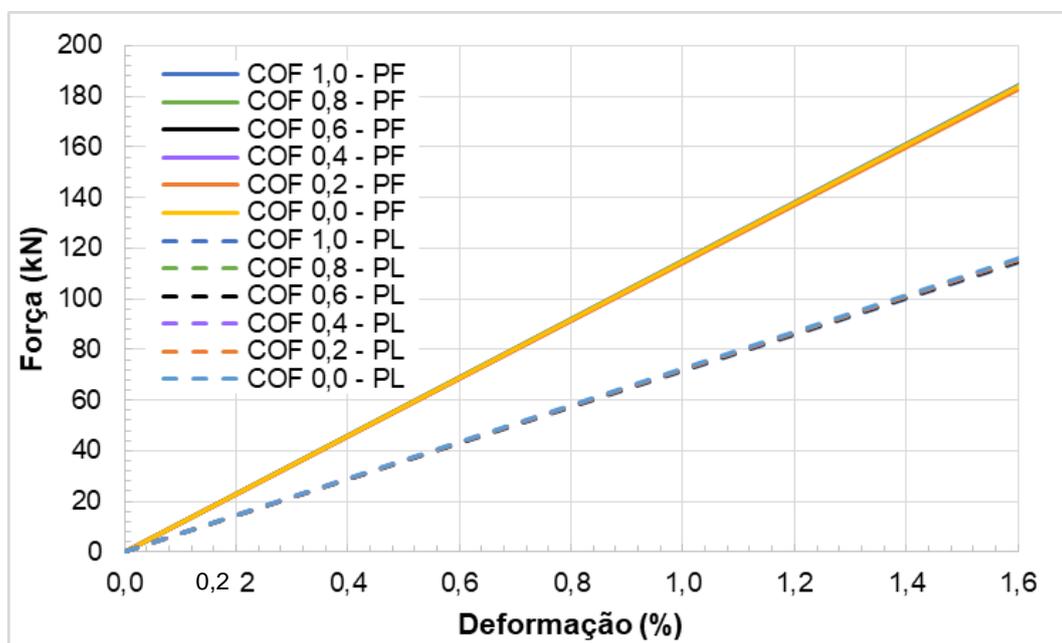


Figura 45 - Análise do cabo 1x7 CE35 com diferentes valores de COF com carregamento em tração nas condições PF e PL.

Os gráficos da Figura 46 e Figura 47 apresentam o comportamento do cabo para diferentes valores de COF sob flexão com condição PF. Observam-se sutis diferenças entre as diferentes curvas, diferentemente das análises em tração pura. No gráfico de Força vs. Deslocamento (Figura 47), para um deslocamento de 10 mm, a amostra com o valor de COF igual a 1,0 apresenta uma força de 653 N, no outro extremo, a amostra sem atrito, 580 N, uma diferença de 11%. Esta diferença relativamente pequena para uma variação considerável de COF entre as amostras, reforça o que havia sido indicado pelas variações do planejamento experimental, o coeficiente de atrito estático desempenha um papel pouco significativo no comportamento do cabo em tração e flexão. Possivelmente esta influência seria maior em cabos de arquitetura mais complexa, com uma quantidade de fios expressivamente maior.

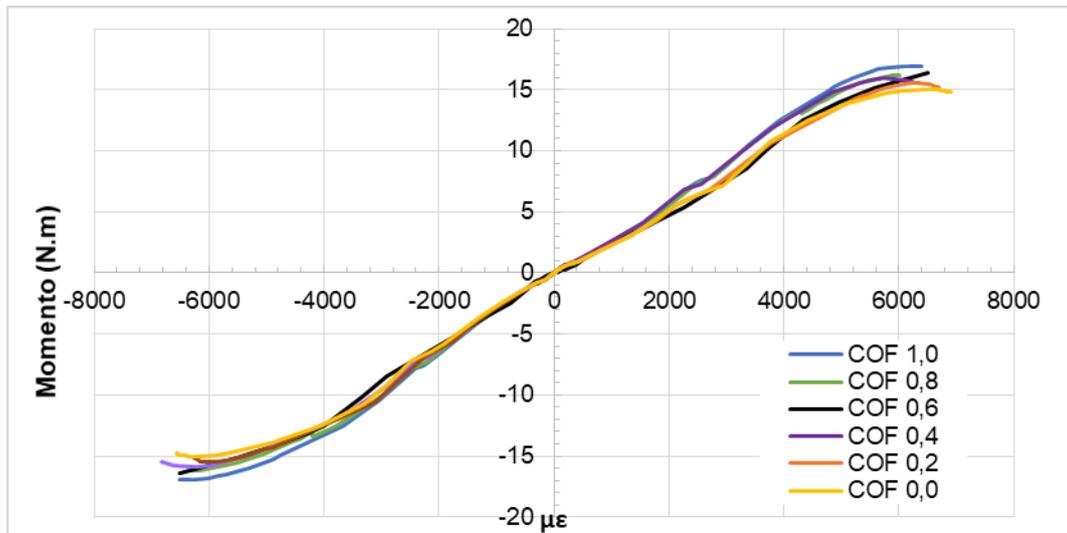


Figura 46 - Análise do momento do cabo 1x7 CE35 com diferentes valores de COF com carregamento em flexão.

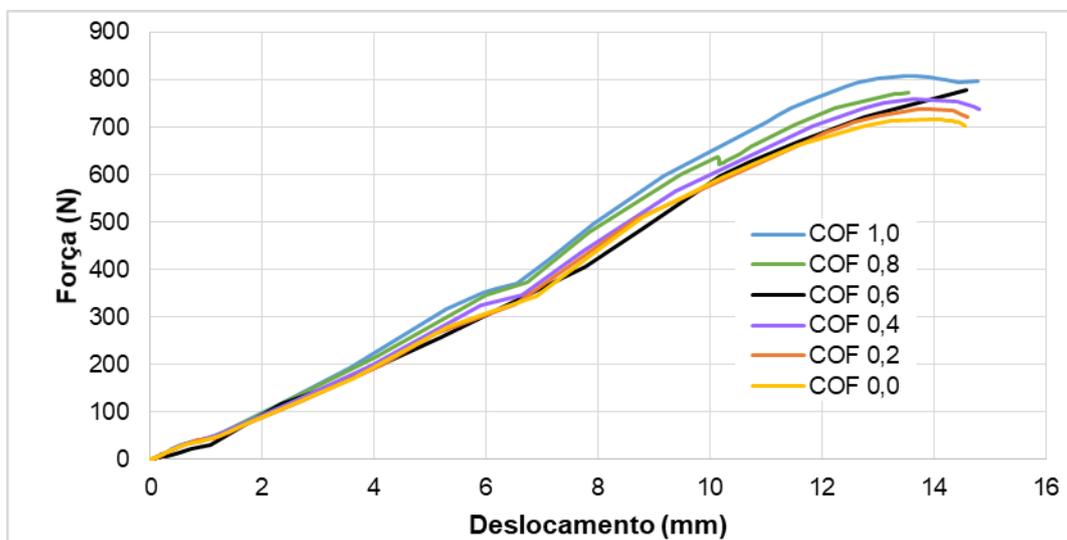


Figura 47 - Análise do deslocamento do cabo 1x7 CE35 com diferentes valores de COF com carregamento em flexão.

### 5.6.3. Construções Híbridas

A construção de cabos de compósitos é complexa e cara, principalmente devido à dificuldade em se fabricar hélices pultrudadas. Entretanto, o modelo numérico permite a criação de cabos virtuais utilizando diferentes materiais compósitos. Considerando que o fio da alma recebe o maior carregamento, construiu-se estruturas híbridas, utilizando (i) fios de CE35 como núcleo, por apresentar maior resistência comparado aos fios AE35 e VE35, e (ii) fios externos com os outros materiais compósitos previamente ensaiados (e.g. AE35 e VE35) por possuírem menor rigidez, melhorando as propriedades do cabo em flexão. A Tabela 17 apresenta as estruturas híbridas analisadas. Nestas análises considerou-se como critério de falha em tração a menor deformação de ruptura entre os fios empregados, neste caso o fio

CE35, e os valores de COF para os pares previamente medidos experimentalmente. O valor de COF para o par CFRP/AFRP (0,3) foi retirado de Chand e Fahim (2008).

Tabela 17 - Diferentes estruturas híbridas estudadas.

Cabo 1x7 CE35	Cabo 1x7 CE35/AE35	Cabo 1x7 CE35/VE35
Alma CE35	Alma CE35	Alma CE35
Fios externos CE35	Fios externos AE35	Fios externos VE35

O gráfico da Figura 48 apresenta o comportamento dos cabos em tração, com o cabo CE35 apresentado a maior rigidez e resistência (188 kN), como esperado baseado nas propriedades dos fios, o cabo CE35/AE apresentou a segunda maior resistência (104 kN), 45% menor que o CE35. O cabo CE35/VE35 apresentou uma força de ruptura em tração de 78 kN, 58% inferior ao CE35.

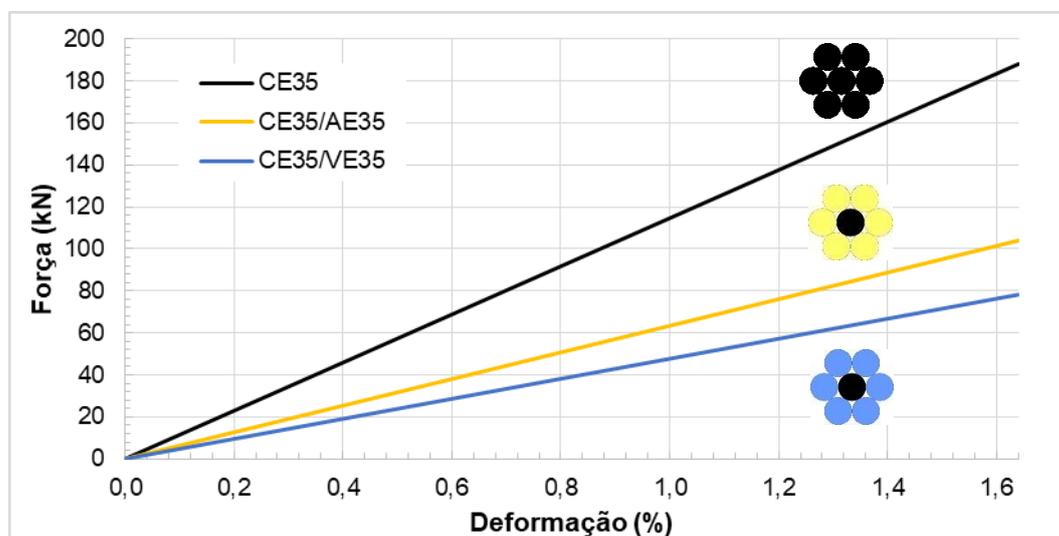


Figura 48 - Comportamento dos cabos 1x7 híbridos em comparação com o cabo CE35 para solicitação em tração.

Os gráficos das Figura 49 e Figura 50 apresentam o comportamento dos cabos sob flexão. Observa-se um comportamento similar dos cabos em tração, com o cabo CE35 sendo o mais rígido e o CE35\VE35, o menos rígido. No gráfico de Força vs. Deslocamento (Figura 50), para um deslocamento de 10 mm, o cabo CE35 apresenta uma  $\bar{F}^{U=10mm}$  de 605 N, e o cabo CE35\AE35, 367 N, 39% inferior. O cabo CE35\VE35 apresentou a maior flexibilidade em flexão, com uma  $\bar{F}^{U=10mm}$  de 262 N, 57% menor que o cabo CE35.

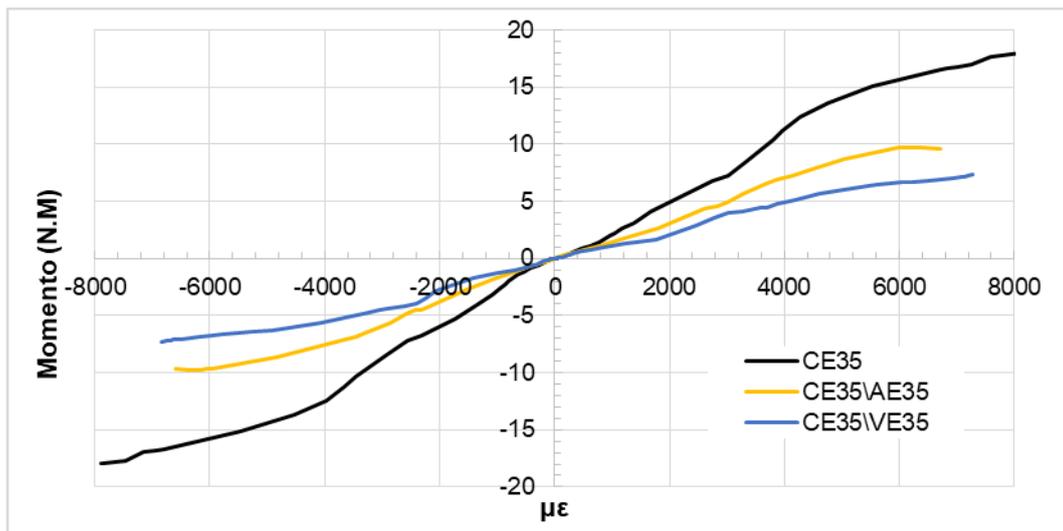


Figura 49 - Comportamento dos cabos 1x7 híbridos em comparação com o cabo CE35 para solicitação em flexão.

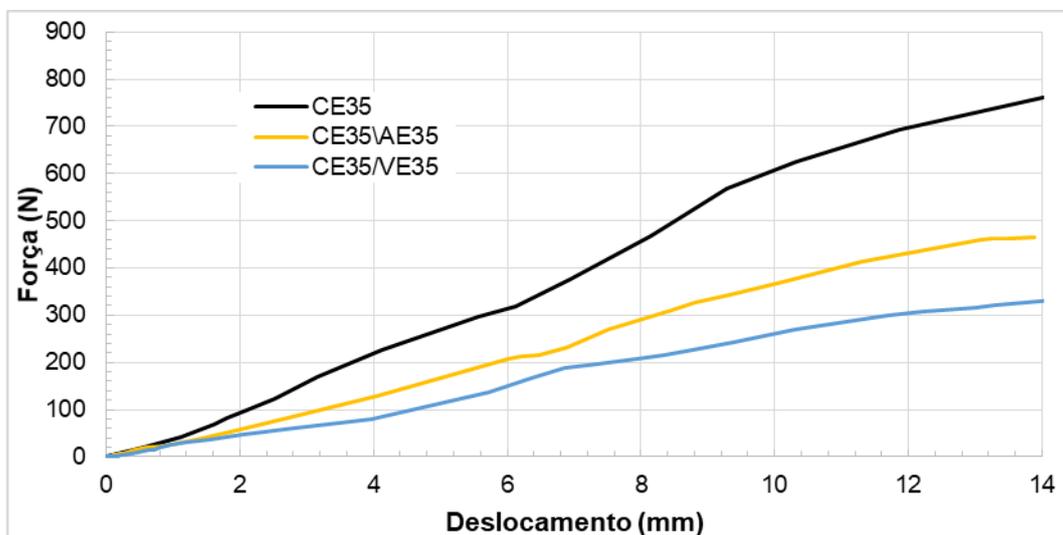


Figura 50 - Comportamento dos cabos 1x7 híbridos em comparação com o cabo CE35 para solicitação em flexão.

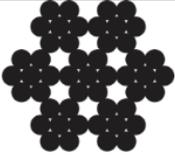
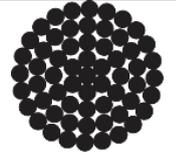
O cabo CE35/AE35 apresenta valores intermediários de resistência à tração e flexão comparados aos cabos CE35 e CE35/VE35. Porém o custo da fibra de aramida é similar ao da fibra de carbono de alta resistência. Neste aspecto, o cabo CE35/VE35 apresentou uma excelente relação entre alta flexibilidade e resistência em tração aceitável, comparável à cabos de aço de arquitetura similar, e com o material mais acessível entre os analisados.

#### 5.6.4. Cabo Multi-pernas 6x7 e Cabo Espiral 1x61

Conforme discutido anteriormente, não existem dados experimentais ou numéricos confiáveis disponíveis de cabos multicamadas de compósitos (i.e. espiral e multi-pernas). Logo, não se conhece o comportamento destes cabos, principalmente com relação à influência das diferentes arquiteturas de construção quando há mais de uma camada de fios

no cabo (i.e. torque balanceado, torção regular e torção *Lang*). Assim, empregou-se o modelo numérico para construção de dois diferentes cabos multicamadas utilizando o mesmo fio CE35: (i) cabo 6x7 CE35 – arquitetura multi-pernas com um total de 49 fios, e (ii) cabo 1x61 CE35 – arquitetura espiral com um total de 61 fios. Estas arquiteturas, apresentadas na Tabela 18, foram baseadas em cabos metálicos comerciais, que não em cabos de materiais compósitos no caso da arquitetura 6x7. Apesar destes dois cabos multicamadas apresentarem números de fios diferentes, ambos apresentam o mesmo diâmetro nominal, 31,5 mm.

Tabela 18 - Arquiteturas dos cabos multicamadas analisados.

		
	6x7 CE35	1x61 DE35
Arquitetura	Multi-pernas	Espiral
Nº de fios	49	61
Diâmetro do fio	3,5 mm	3,5 mm
Diâmetro nominal	31,5 mm	31,5 mm

Para diminuir a demanda computacional, realizaram-se simplificações no modelo, pois tentativas anteriores de simular o modelo sem simplificações não tiveram sucesso na convergência do problema. Foram estas: (i) aumentar o comprimento de passos, diminuindo assim a quantidade de nós em contato entre os fios; (ii) diminuir os comprimentos totais dos cabos, diminuindo conseqüentemente o número de elementos na malha; (iii) alterar o tipo de elemento; e (iv) não usar apoios nas análises em flexão, pois como o comprimento do cabo analisado diminuiu, as condições de distância entre os apoios não poderia mais ser mantida.

Para o cabo 6x7 CE35 usou-se o menor comprimento de passo de 1000 mm, mantendo a proporção entre diâmetro do cabo / comprimento do passo, ou seja, o passo da perna foi de 3000 mm. Para o cabo 1x61 CE35, manteve-se o menor passo em 1000 mm, para as camadas seguintes, também manteve-se a relação diâmetro do cabo / comprimento do passo, assim os demais passos são apresentados na Figura 51. Nestes cabos, é possível balancear o torque invertendo as torções dos passos entre as diferentes camadas (Torção Balanceada, TB), como visto na Figura 51, ou deixar todas as torções no mesmo sentido (Torção Não-Balanceada, TN). O comprimento de ambos os cabos foi 100 mm, 3,34% do comprimento do passo, este tamanho de amostra ainda permite boas interações entre os contatos e escorregamento (Jiang e Henshall, 1999). A malha utilizada bem como as arquiteturas empregadas nos cabos 6x7 CE35 e 1x61 CE35 são apresentadas na Figura 52,

elementos tetraédricos lineares com 4 nós e 3 graus de liberdade por nó foram empregados. Esta alteração foi necessária pois este elemento possui uma menor quantidade de nós, o que contribuiu para a convergência do problema em um tempo aceitável. Ressalta-se que este não é o elemento ideal para esta aplicação, principalmente devido a sua elevada rigidez e dificuldade em aplicar contato. Ao total, a malha para o cabo 6x7 CE35 foi composta por aproximadamente 15.700 nós e 53.000 elementos, e a do 1x61 CE35 por 21.300 nós e 71.800 elementos.

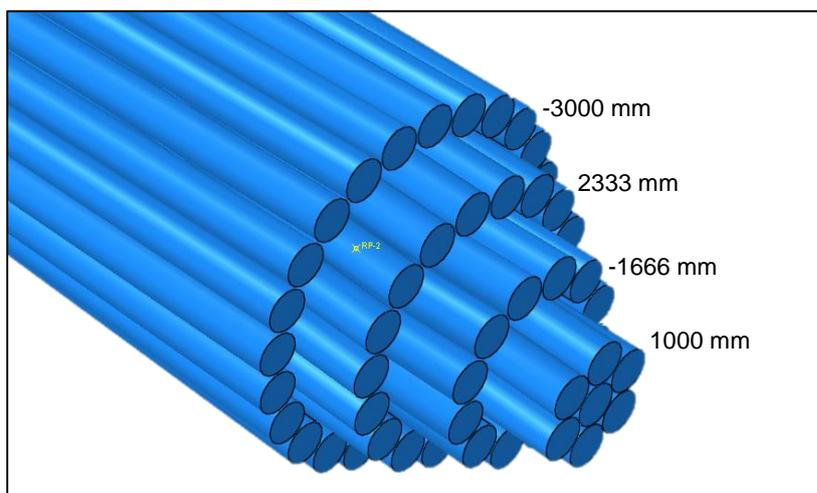


Figura 51 - Comprimento dos passos das diferentes camadas do cabo 1x61 CE35.

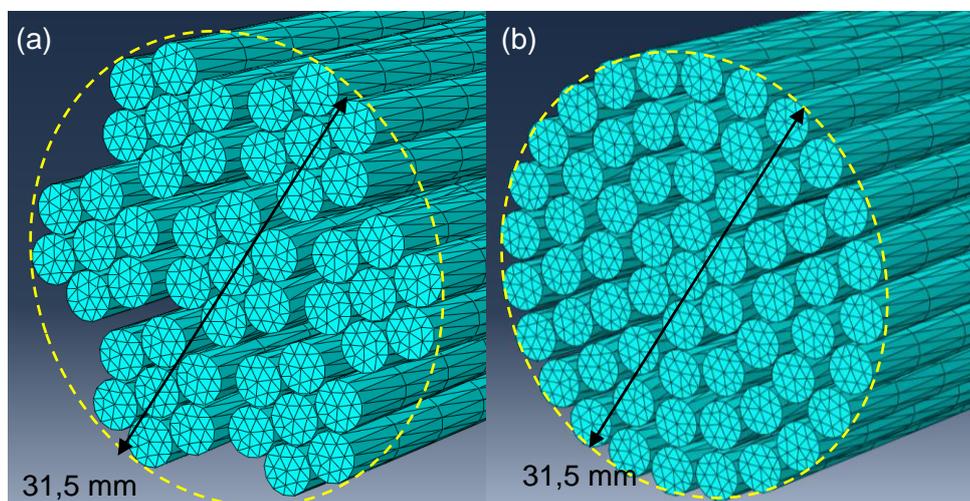


Figura 52 - Malhas construídas para a adaptação do modelo numérico para os cabos (a) 6x7 CE35 e (b) 1x61 CE35.

As condições de contorno para o esforço em tração foram as mesmas aplicadas anteriormente, porém adicionando a condição de permitir a rotação longitudinal na extremidade de aplicação da força (condição ponta-livre). Para flexão, uma das extremidades do cabo foi engastada, e na outra, restringiu-se rotação no eixo longitudinal e aplicou-se momento em toda a seção ao invés de deslocamento nos apoios. Nestes cabos multicamada,

também avaliou-se a resposta em torção quando carregado em tração pura para as diferentes arquiteturas TB e TN.

**a) Comportamento em Tração Pura:** Os cabos analisados em tração utilizaram o mesmo critério de máxima deformação do fio do núcleo, já que este fio continua sem torção nestas arquiteturas. A Figura 53 apresenta o comportamento dos cabos 1x61 CE35 e 6x7 CE35 em tração. Observa-se que as diferentes torções (TB e TN) para ambos os cabos, não apresentou influência nas resistências para este carregamento, no caso do cabo 1x61 CE35 TB e TN apresentaram linhas sobrepostas. Para o cabo 6x7 CE35, a condição de ponta-fixa torna a estrutura levemente mais rígida, por permitir um maior deslocamento longitudinal, como nos trabalhos de Utting e Jones (1987a, 1987b) e Elata et al. (2004).

O cabo 1x61 CE35 apresenta uma área de seção transversal de 587 mm<sup>2</sup> (61 fios) e suportou uma carga de ruptura maior, 870 kN (para TB), enquanto o cabo 6x7 CE35, de 471 mm<sup>2</sup> (49 fios), rompeu a uma carga inferior, 783 kN para as mesmas condições. Assim, mesmo com uma área da seção transversal 20% menor, a resistência do cabo 6x7 CE35 foi apenas 10% menor em comparação ao cabo 1x61 CE35, justificado pela distribuição não-linear das cargas ao longo dos fios e pelos efeitos não lineares de escorregamento entre eles.

Apesar de não haver valores experimentais para as resistências destes cabos, os valores encontrados pelo modelo numérico simplificado estão de acordo com o cabo ensaiado por Grace et al. (2003), com fios de CFRP de 5,7 mm de diâmetro o cabo 1x37 (37 fios) com diâmetro nominal de 330 mm, que apresentou uma carga de ruptura de 1070 kN (valor apresentado anteriormente na Tabela 4). O valor da tensão de ruptura deste cabo é 1413 MPa, 4,7% menor que a tensão do cabo 1x61 CE35, 1482 MPa.

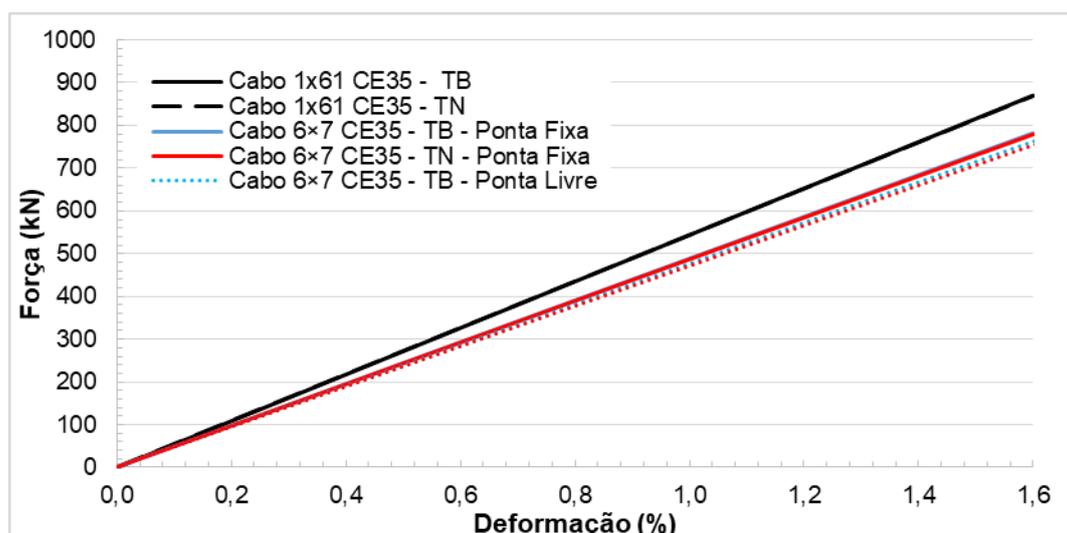


Figura 53 - Comportamento dos cabos 1x61 CE35 e 6x7 CE35 em tração para as condições torção balanceada, torção não-balanceada, ponta-fixa e ponta-livre.

**b) Torção de reação ao carregamento em tração pura:** Para estas análises, utilizou-se a condição de ponta-livre para permitir avaliar o deslocamento rotacional com a força axial para cada construção, que é apresentado no gráfico da Figura 54. Observa-se que a torção não-balanceada apresentou os maiores deslocamentos rotacionais para as duas arquiteturas de cabo. Para um carregamento de 600 kN, o deslocamento rotacional do cabo 6×7 CE35 - TN foi -0,21 rad, 43% menor comparado ao cabo com TB, -0,12 rad. Já para o cabo 1×61 CE35, a redução foi de 64%, passando de -0,42 rad (TN) para -0,15 rad (TB). Esta diferença no equilíbrio da torção para as diferentes arquiteturas deve-se ao maior número de camadas possíveis de contribuição para o equilíbrio de torque do cabo 1×61 CE35. Os resultados para os cabos 6×7 estão em concordância com os resultados obtidos por Usabiaga e Pagalday (2008), em termos da relação de proporção entre as arquiteturas TB e TN.

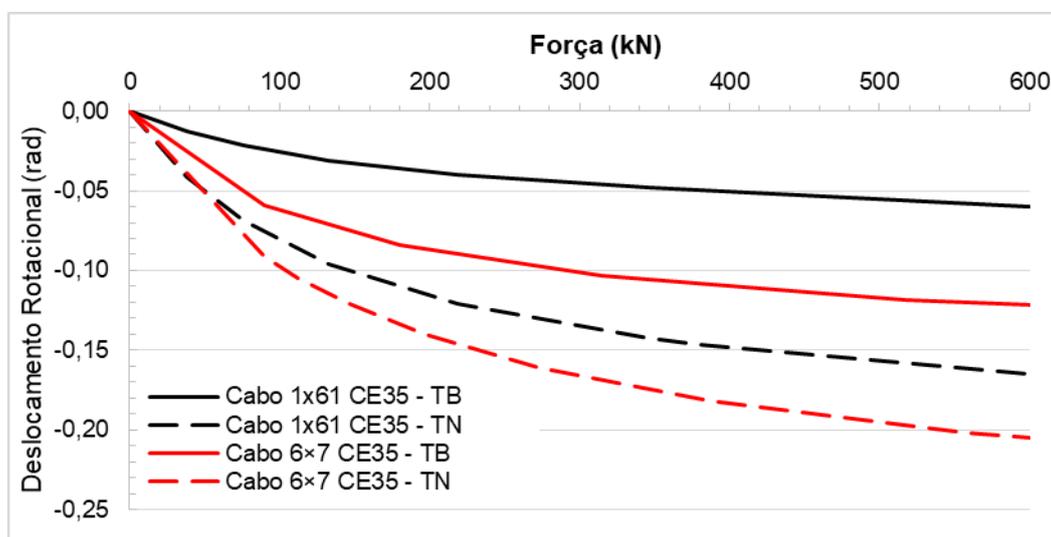


Figura 54 - Resposta da torção dos cabos 1×61 CE35 e 6×7 CE35 em carregamento axial para torção balanceada e torção não-balanceada.

**c) Comportamento em Flexão:** Nesta análise, aplicou-se um momento de  $1 \times 10^5$  N.mm para os dois cabos com arquitetura TB e avaliou-se a deformação nos fios mais externos das regiões de tração. A região de tração e compressão são apresentadas como exemplo na Figura 55 para o cabo 6×7 CE35 – TB.

A fim de facilitar a comparação entre as estruturas, considerou-se a máxima deformação do fio em tração como critério de falha. Ressalta-se que a falha em flexão é um fenômeno mais complexo comparado à falha em tração, e entende-se que este critério de falha não é o mais adequado, e necessita-se maiores estudos para se determinar o mais indicado para esta solicitação. Porém, é o mais acessível nesta comparação em termos de tempo de processamento computacional e propriedades experimentais confiáveis disponíveis.

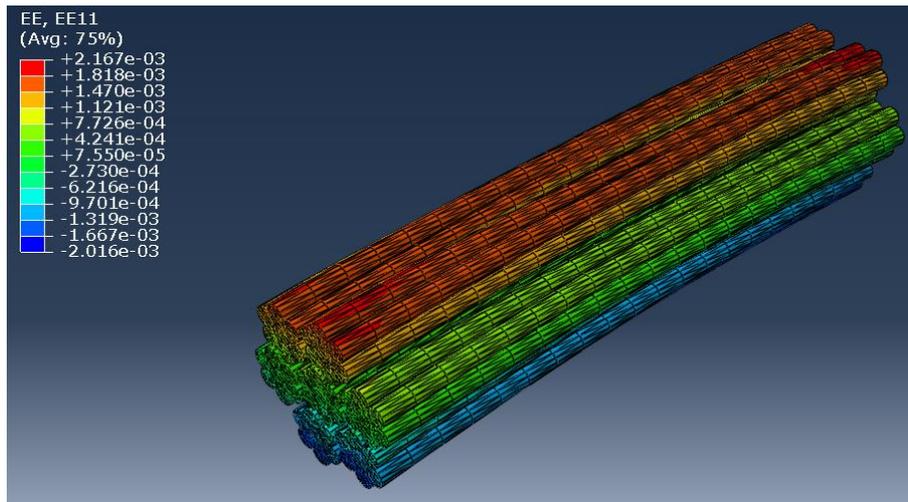


Figura 55 - Vista isométrica do cabo e 6x7 CE35 TB em flexão.

Os resultados computacionais para o deslocamento rotacional no eixo de aplicação do momento e a deformação dos fios mais externos dos cabos foram empregados para se calcular o raio de dobramento. A Figura 56 apresenta a variação do raio de dobramento para o cabo (a) 6x7 CE35 TB e (b) 1x61 CE35 TB. Uma extrapolação das curvas permite prever o raio de dobramento para um deformação de 1,64%. Entende-se que as curvas representam uma faixa reduzida de deformações, porém esta extrapolação foi necessária devido à complexidade destas simulações em flexão. Considerando as extrapolações, o cabo 6x7 CE35 TB apresentou um Raio Mínimo de Dobramento (RMD) levemente menor, 593 mm, comparado ao do cabo 1x61 CE35 TB, 618 mm. Esta redução de 4% no RMD, que representa uma melhora na flexibilidade do cabo, pode ser justificada pela quantidade menor de fios e ao diferente arranjo dos mesmos, mais propícios à flexão.

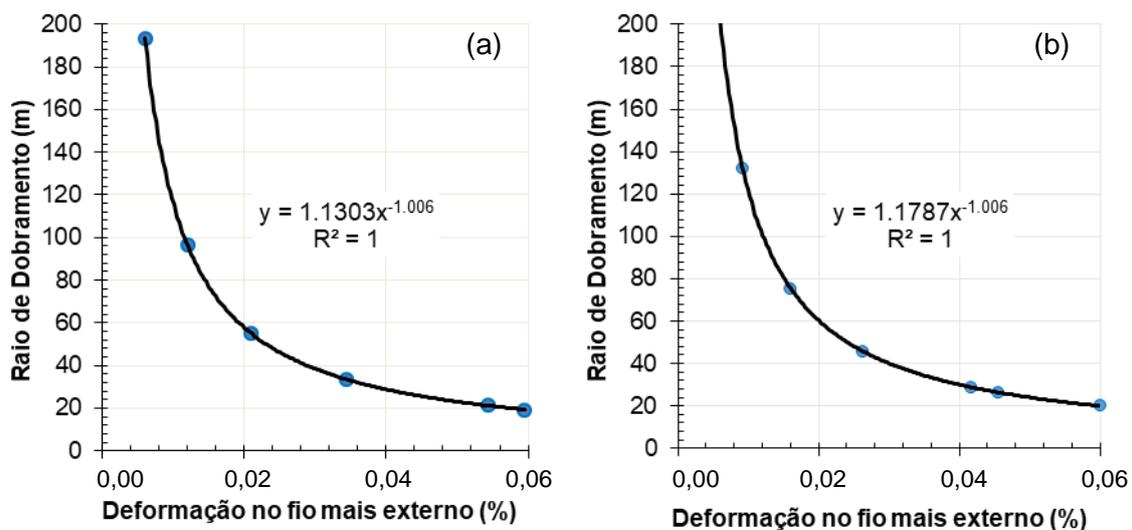


Figura 56 - Raio de dobramento vs. deformação no fio mais externo para os cabos (a) 6x7 CE35 TB e (b) 1x61 CE35 TB.

Assim, os dois diferentes cabos analisados apresentam comportamento e resistências distintos, o 1×61 CE35 apresentou uma maior rigidez e resistência em tração e um torque mais equilibrado para a arquitetura TB, como discutido na Tabela 1. Por outro lado, o cabo 6×7 CE35 apresentou uma maior flexibilidade, representada por um menor RMD, embora não tão significativo (4%) quanto a perda em resistência à tração (10%), mesmo com uma área de seção transversal 20% menor. Ambos os cabos mostram-se promissores para aplicações em engenharia, pois apresentam valores competitivos de resistência à tração, podendo ser dobrados em polias de diâmetros relativamente pequenos ( $RMD < 620$  mm).

Ressalta-se que há diversas limitações nas simplificações realizadas no modelo para a análise de cabos multicamadas, especialmente devido à falta de dados experimentais e dificuldades de convergência computacional. Contudo, as análises apresentam resultados ainda inexistentes na literatura e mostram um potencial de aplicação para cabos maiores de compósitos.

## 6. Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia de análise de cabos de materiais compósitos poliméricos para carregamentos estáticos independentes. Caracterizou-se três diferentes fios de materiais compósitos poliméricos em termos de resistência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, deformação na ruptura e coeficiente de atrito estático entre os pares envolvidos. Ensaiou-se experimentalmente também um cabo 1x7 CFRP em tração pura e flexão 4 pontos. A carga de ruptura média em tração foi 190,25 kN, em flexão o cabo apresentou uma força média de 598,5 N para um deslocamento de 10 mm, ambos com relativa baixa dispersão e concordando com resultados de outros autores. Evidenciou-se a ocorrência de escorregamento entre os fios nos ensaios de flexão e as medidas de deformação com SG mostraram-se não-representativas da amostra. Empregou-se o método da Lâmina Mestre para obter-se as demais constantes de engenharia necessárias para utilização dos modelos propostos e os resultados mostraram-se coerentes.

As incertezas probabilísticas foram inseridas no modelo numérico tridimensional dedicado e no modelo analítico simplificado através das variações das propriedades de entrada, utilizando um desvio padrão. O modelo numérico demandou cerca de 90 min para cada caso e mostrou-se muito confiável, com uma diferença de -1,15% (181,1 kN) em relação aos resultados experimentais médios para as análises em tração, e em flexão uma diferença de -3,11% (580,5 N), com um tempo médio de simulação de 180 min para cada caso. O modelo analítico simplificado apresentou diferenças acima de 10% em relação aos ensaios experimentais tanto para tração quanto para flexão, contudo o modelo gera uma resposta instantânea e as diferenças com relação aos resultados experimentais apresentadas são sistemáticas, e um fator de correção pode ser aplicado a fim de gerar resultados mais precisos. Além disso, se considerar os elevados fatores de correção geralmente aplicados à estes cabos em aplicações de ancoragem, estas diferenças entre os resultados se tornam ainda menores. Contudo, o desenvolvimento de um modelo analítico dedicado empregando as relações constitutivas para materiais transversalmente ortotrópicos poderia trazer resultados mais confiáveis.

O comportamento dos cabos em flexão foi devidamente previsto pelo modelo numérico, que teve sucesso em apresentar a curva força vs. deslocamento com as mesmas variações observadas experimentalmente. Ainda, através do modelo pode-se comprovar a ocorrência de escorregamento entre os fios do cabo levando a uma perda da seção transversal circular e diminuição do momento de inércia. O emprego do critério de falha da máxima deformação para as análises em tração pura mostrou-se confiável e simples de ser aplicado. Porém, a falha em flexão é um fenômeno mais complexo devido à maior

movimentação geométrica entre os fios, distribuições de tensões e dificuldades em se ter medidas experimentais confiáveis.

As análises estatísticas constataram não haver diferenças significativas entre os resultados do modelo numérico em relação ao experimental para ambas as solicitações analisadas. Por outro lado, há uma diferença estatística significativa entre os resultados experimentais e os gerados pelo modelo analítico. Concluiu-se também que todos as propriedades de entrada contribuem de maneira similar aos resultados dos dois modelos. Assim, comprovou-se que os modelos apresentaram boa concordância para os dois ensaios estáticos carregados independentemente.

Empregando o modelo numérico, concluiu-se que o melhor compromisso entre a maior flexibilidade em flexão sem comprometer a resistência à tração, para o cabo 1x7 CE35, foi para um comprimento do passo entre 90 e 150 mm. Concluiu-se também que a variação do COF não afeta significativamente o desempenho do cabo em tração e em flexão, apesar da resposta em flexão mostrar-se levemente mais afetada. Dos cabos híbridos analisados pelo modelo numérico constatou-se que o cabo CE35/VE35 apresentou uma excelente relação entre alta flexibilidade e resistência em tração aceitável, com menor custo entre os cabos analisados. Para a análise dos cabos multicamadas, o cabo 1x61 CE35 apresentou a maior rigidez e resistência em tração e um torque mais equilibrado para a arquitetura TB. Por outro lado, o cabo 6x7 CE35 apresentou uma maior flexibilidade, representada por um menor RMD. Contudo, o ganho em flexibilidade (4%) não é tão significativo quanto a perda em resistência à tração (10%), mesmo com uma área de seção transversal 20% menor. Ambos os cabos mostram-se promissores para aplicações em engenharia, pois apresentam valores competitivos de resistência à tração e podem ser dobrados em polias de diâmetros relativamente pequenos ( $RMD < 620$  mm).

A grande maioria das aplicações de cabos de materiais compósitos são para a indústria civil, evidenciando uma confiança no emprego destes materiais para a construção de grandes estruturas, sendo um material consolidado e amplamente empregado. Com base nas vantagens apresentadas, a aplicação no setor de Óleo & Gás apresenta-se como uma tendência possível e tangível. Os cabos em compósito possuem menor flexibilidade que os cabos de aço e de fibras sintéticas isoladas, porém possuem maior módulo e resistência específicos. Assim, considerando as opções de ancoragem atuais, as aplicações mais adequadas para este novo desenvolvimento são em ancoragem das plataformas SS no sistema taut-leg e em plataformas TLP, pois com as linhas esticadas, a baixa flexibilidade não seria um agravante (desconsiderando o sistema de transporte e instalação das linhas). Além disso, a elevada resistência no regime elástico facilitaria o processo de restauração da linha.

## 7. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Desenvolver um modelo analítico dedicado empregando as relações constitutivas para materiais transversalmente isotrópicos;
- Desenvolver um critério de falha para carregamento em flexão pura dedicado para cabos de compósitos;
- Desenvolver um modelo numérico empregando diferentes hipóteses de contato para diminuir o tempo de processamento e viabilizar simulações de cabos de maior diâmetro;
- Realizar ensaios experimentais de torção em cabos multicamadas para verificar o equilíbrio de torque em arquiteturas TB;
- Considerar carregamentos dinâmicos e/ou conjugados, utilizando o modelo apresentado neste trabalho como uma sugestão de modelo local e desenvolver um novo como modelo global.

## Referências

Adams, P. M., Farrow, G., Beers, D. Advanced-fiber applications: Properties and applications of fibers from fully aromatic polyesters. *Tappi Journal*, 78, 169-174, 1995.

Adnur, S., Mosallam, A. S., Shinozuka, M., Gumusel, L. A Comparative Study On Static And Dynamic Responses Of FRP Composite And Steel Suspension Bridges, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30, 1265-1279, 2011.

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*, 48, 1413–1423, 2011.

Balázs, G. L., Borosnyói, A. Long-term behavior of FRP. Proceedings of the international workshop on composites in construction: a reality. *American Society of Civil Engineers*, 84–91, 2001.

Beltrán, J. F., Williamson, E. B. Numerical procedure for the analysis of damaged polyester ropes. *Engineering Structures*, 33, 1698–1709, 2011.

Benmokrane, B., Zhang, B., Chennouf, A. Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications. *Construction and Building Materials* (14), 157–170, 2000.

Bert, C.W., Stein, R.A. Stress Analysis of Wire Rope in Tension and Torsion. *Wire & Wire Products*, 37, (5), 621-624, 1962.

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*, 68, 146-152, 2015.

Chand, N., Fahim, M. Tribology of Natural Fiber Polymer Composites. Woodhead Publishing, 1 ed., 2008.

Chaplin, C. R. Torsional failure of a wire rope mooring line during installation in deep water. *Engineering Failure Analysis* (6), 67-82, 1998.

Chaplin, C. R., Potts, A. E. Wire rope offshore (OTH 91 341) – A critical review of wire rope endurance research affecting offshore applications, University of Reading, 1991.

Chen, Y., Meng, F., Gong, X. Study on performance of bended spiral strand with interwire frictional contact. *International Journal of Mechanics Sciences* 128-129, 499-511, 2017.

Chen, Z. et al. Experimental research on bending performance of structural cable. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 279-288, 2015.

Conci, A., Silva, W.F. Nonlinear Tension Analysis of Wire Rope. *Anais do V Pan American Congress of Applied Mechanics - PACAM - Puerto Rico USA, 2-4, Jan.*, Edited by L.A. Godoy, M. Rysz, L. E. Soares, vol. 4: *Mechanics e Dynamics of Solids*, pp. 119-122, 1997.

Costello, G.A. *Theory of wire rope*, 2nd ed. New York: Springer, 1997.

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*, 40, 777-806, 2003.

De Corte, W., Van Bogaert, P. Evaluation of an experimental CFRP pre-stressed beam and slab road bridge. *Composites: Part B* (36), 91-98, 2005.

Del Vecchio, C. J. M. D., da Silva, A. H. M. F. T. Quasi-Static Properties of High Stiffness Fibre Ropes for Ultra-Deep Water Moorings. *OIPEEC Conference – College Station, Texas*, 2011.

Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S. J., Hui D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Compos. Part B-Eng.*, 73:166-180, 2015.

Dolan, W. D., Hamilton III, H. R., Bakins, C. E., Nanni, A. Design recommendations for concrete structures prestressed with FRP tendons. *FHWA contract Report*, 2001.

Domenico, N. G.: Bond properties of CFCC prestressing strands in pretensioned concrete beams. *Master's Thesis of Science in Civil Engineering. Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba*, 1995.

Durelli, A.J., Machida, S., Parks, V.J. Strains and Displacements on a Steel Wire Strand. *Naval Engineers Journal*, 84, (6), 85-93, 1972.

Elata, D., Eshkenazy, R., Weiss, M.P. The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core. *International Journal of Solids and Structures*, 41, 1157–1172, 2004.

El-Tayeb, N. S., Gadelrap, R. Friction and wear properties of E-glass fiber reinforced epoxy composites under different sliding contact conditions. *Wear*, 192, 112–117, 1996.

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.

Erdönmez C., Imrak C. E. Modeling And Numerical Analysis Of The Wire Strand. *Journal of Naval Science and Engineering*, 5, 1, 30-38, 2009.

Erdonmez, C., Imrak, C. A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads, *Sadhana*, 36(6), 995-1008, 2011.

Fabbrocino, F., Modano, M., Farina, I., Carpentieri, G., Fraternali, F. Optimal prestress design of composite cable-stayed bridges. *Compos. Struct.*, 169, 167-172, 2016.

Fontanari, V., Benedetti, M., Monelli, B. D. Elasto-plastic behavior of a Warrington-Seale rope: Experimental analysis and finite element modeling. *Engineering Structures*, 82, 113–120, 2015.

Friswell, M. I., Mottershead, J. E. *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Waterloo: Springer, 1996.

Fu., S. Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C. Y., Hu, Y. Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 1117-1125, 2000.

Gamstedt, E. K., Sandell, R., Berthold, F., Pettersson, T., Nordgren, N. Characterization of interfacial stress transfer ability of particulate cellulose composite materials. *Mech. Mater.* (43), 693–704, 2011.

Ghoreishi, R. S., Messenger, T., Cartraud, P., Davies, P. Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model. *International Journal of Mechanical Sciences* 49, 1251–1261, 2007a.

Ghoreishi, S. R., Cartraud, P., Davies, P., Messenger, T. Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part I: A new continuum model for multilayered fibrous structures. *International Journal of Solids and Structures*, 44, 2924–2942, 2007b.

Ghoreishi, S. R., Cartraud, P., Davies, P., Messenger, T. Analytical modeling of synthetic fiber ropes. Part II: A linear elastic model for 1 + 6 fibrous structures. *International Journal of Solids and Structures*, 44, 2943–2960, 2007c.

Girón, A. R. C. Aplicação de metodologias de projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers na exploração de petróleo offshore. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, 2009.

Grace N. F., Abdel-Sayed G., Navarre F. C., Nacey R. B. Bonus, W., Collavino L. Full-Scale Test of Prestressed Double-Tee Beam. *Concrete International* (25), 52-58, 2003.

Grace, N. F., Enomoto, T., Yagi, K. Behavior of CFCC and CFRP Leadline Prestressing Systems in Bridge Construction. *PCI Journal* (47), 90-103, 2002.

Grace, N., Enomoto, T., Mohti, A. A., Tokal, Y., Puravankara, S. Flexural behavior of precast concrete box beams post-tensioned with unbonded, carbon-fiber-composite cables. *PCI Journal*, 62-82, 2008.

Hall, H.M. On the Stresses in Small Wire Ropes. *Wire e Wire Products*, 26, 766-767, 799-801, 1961.

Hashin, Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *J Appl Mech*, 47, 329–34, 1980.

Hobbs R. E., Raof, M. Interwire slippage and fatigue prediction of in stranded cables for TLP tethers. *Behaviour of offshore structures*, 2, 77–99, 1982.

Hruska, F. H. Radial forces in wire ropes. *Wire and wire products*, 5, 459–463, 1952.

Hruska, F. H. Tangential forces in wire ropes. *Wire and wire products*, 28(5), 455–60, 1953.

Hruska, F.H. Tangential Forces in Wire Ropes. *Wire e Wire Products*, 28, 455-460, 1953.

Huang, X., Vinogradov, O. Analysis of dry friction hysteresis in a cable under uniform bending. *Structural Engineering and Mechanics*, 2, 1, 63-80, 1994.

Huang, X., Vinogradov, O. Interwire slip and its influence on the dynamic properties of tension cables. 2nd Int. Offshore and Polar Eng. Conference, ISOPE 92-T5-01, São Francisco, 14-19 Junho , 1992.

Imrak, C.E., Erdönmez C. On The Problem Of Wire Rope Model Generation With Axial Loading. *Mathematical and Computational Applications*, 15, 2, 259-268, 2010.

Jackson, D., Dixon, M., Shephard, B., Keadze, E., Teles, R., Rossi, R., Gonçalves, R. C. The Development of a Carbon Fibre Mooring Line for Modu and Permanent Mooring in Deep and Ultra-Deepwater. *Offshore technology conference*, 2005.

Jackson, D., Shephard, B., Keadze, E., Teles, R., Rossi, R., Gonçalves, R. C.: CFRP mooring lines for modu applications. *Offshore technology conference*, 2004.

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.

Jiang, W. G., Henshall, J. L. The analysis of termination effects in wire strand using finite element method. *J. Strain Anal. Eng.*, 34(1), 31-38, 1999.

Jiang, W. G., Henshall, J. L., Walton, J. M. A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42, 63-86, 2000.

Jiang, W. G., Warby, M. K., Henshall, J. L. Statically indeterminate contacts in axially loaded wire strand. *Euro. J. Mech. A/Solids*, 27:69-78, 2008.

Jun, M. A., Shi-rong, G. E., Zhang, D. Distribution of wire deformation within strands of wire ropes. *J China Univ Mining & Technol*, 18, 0475–0478, 2008.

Kim, S. B., Yi, N. H., Kim, H. Y., Kim, J. J., Song, Y. C. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32, 232-240, 2010.

Knapp, R.H. Derivation of a new stiffness matrix for helically armoured cables considering tension and torsion. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 14:515–20, 1979.

Kumar, K., Cochran, Jr J. E. Closed-form analysis for elastic deformations of multilayered strand. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 54, 898–903, 1987.

Labrosse, M. Contribution à l'étude du rôle du frottement sur le comportement et la durée de vie des câbles monocouches. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, France, 1998.

Leissa, A. W. Contact Stresses in Wire Ropes. *Wire and Wire Products*, 34, 307-314, 1959.

Li, Y., Xian, X. J., Choy, C. L., Guo, M., Zhang, Z. Compressive and flexural behavior of ultra-high-modulus polyethylene fiber and carbon fiber hybrid composites. *Compos Sci Technol*, 59, 13–18, 1999.

Liang, P., Wu, X. Nonlinear Properties of carbon fiber-reinforced plastic Stay Cables. *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 2011.

Liu, D., Chen, P., Mu, J., Yu, Q., Lu, C. Improvement and mechanism of interfacial adhesion in PBO fiber/bismaleimide composite by oxygen plasma treatment. *Applied Surface Science*, 15, 6935-6940, 2011.

Love, A. *Mathematical Theory of Elasticity*. 1<sup>a</sup>. ed. New York: Dover Pub, 1944.

Lublóy, E., Balázs, G. L., Borosnyói, E., Nehme, S. G. Bond of CFRP wires under elevated temperature. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS)*, 2005.

Ma, Z. C., Zhu, Y. X., Peng, G. A. Chen. Computer-aided modeling of wire ropes bent over a sheave. *Advances in Engineering Software*, 90, 11–21, 2015.

Machida, S., Durelli, A. J. Response of a strand to axial and torsional displacements. *Journal of Mechanical Engineering science*, 15, 241–51, 1973.

Marais, C., Feillard, P. Manufacturing and mechanical characterization of unidirectional polyethylene-fibre/polyethylene-matrix composites. *Composites Science and Technology*, 45, 247-255, 1992.

Matsunaga, S., Matsubara, T., Wang, W., Takao, Y. Effects of Reciprocation Number on the Friction Behaviors of Carbon/Epoxy for Various Fiber Orientations and High Contact Pressures. Proc. ICCM-13, CDROM ID-1346, pp. 1-10, 2001.

McConnell, K. G., Zemeke, W.P. A model to predict the coupled axial torsion properties of ACSR electrical conductors. Journal of Experimental Mechanics, 22:237–44, 1982.

Meier, U. Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If?. Arab J Sci Eng, 37:399–411, 2012.

Menezes, E. A. W., Silva, L V., Cimini Jr., C. A., Luz, F. F., Amico, S. C. Numerical and Experimental Analysis of the Tensile and Bending Behaviour of CFRP Cables. Polymers & Polymer Composites, Vol. 25, No. 9, 2017b.

Menezes, E. A. W., Silva, L V., Marczak, R. J., Amico, S. C. Numerical model updating applied to the simulation of carbon fiber–reinforced polymer cables under bending and tensile stress. J Strain Analysis, 52(6) 356–364, 2017a.

Montes-Morán, M. A., Martínez-Alonso, A., Tascón, J. M. D., Young, R. J. Effects of plasma oxidation on the surface and interfacial properties of ultra-high modulus carbon fibres. Composites A, 32, 361–371, 2001.

Motoya, H., Ohta, T., Ohn, T., Moriya, K.: Dynamic Tensile Properties of CFRP Cables subjected to High-speed Loads. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University (62), 113-127, 2002.

Naito, K., Tanaka, Y., Yang, J. M., Kagawa, Y. Tensile properties of ultrahigh strength PAN-based, ultrahigh modulus pitch-based and high ductility pitch-based carbon fibers. Carbon, 46, 189-195, 2008.

Nanni, A. Bakis, C. E., O’Neil, E. F., Dixon, T.O. Performance of FRP tendon-anchor systems for prestressed concrete Structures, PCI Journal, 34-44, 1996.

Nanni, A., Bakis, C. E., O’Neil, E. F., Dixon, T. O. Short-term sustained loading of FRP tendon-anchor systems. Construction and Building Materials, (10), 255-266, 1995.

Nath, R. B., Fenner, D. N., Galiotis, C. Elasto-plastic finite element modelling of interfacial failure in model Kevlar 49 fibre-epoxy composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 27, 821-832, 1996.

Nawrocki, A., Labrosse, M. A finite element model for simple straight wire rope strands. Computers and Structures (77), 345-359, 2000.

Noisternig, J. F. Carbon Fibre Composites as Stay Cables for Bridges. Applied Composite Materials (7), 139–150, 1999.

Ochia, T., Okubob, S. , Fukuib, K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29, 448-455, 2007.

Ortega, N. F., Moro, J. M., Meneses, R. Corrosion in Concrete Structures with Permanent Deformation in Marine Environment. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 11, 14-24, 2017.

Páczelt, I., Beleznai, R. Nonlinear contact-theory for analysis of wire rope strand using high-order approximation in the FEM. *Computers and Structures*, 89, 1004–1025, 2011.

Pan, N. Development of a Constitutive Theory for Short Fiber Yarns Part II: Mechanics of Staple Yarn With Slippage Effect. *Textile Res. Journal*, 63, 504-514, 1993.

Pan, N. Development of a Constitutive Theory for Short Fiber Yarns Part IV: Mechanics of Blended Fibrous Structures. *J. Text. Inst.*, 87, 467-483, 1996.

Pan, N. Development of a Constitutive Theory for Short Fiber Yarns: Mechanics of Stable Yarn Without slippage Effect. *Textile Res. Journal*, 62, 749-765, 1992.

Pan, N., Brookstein, D. Physical Properties of Twisted Structures II. Industrial Yarns, Cords, and Ropes. *Journal of Applied Polymer Science*, 83, 610–630, 2002.

Peijs, A. A. J. M., Kok, L. M M. Hybrid composites based on polyethylene and carbon fibres. Part 6: Tensile and fatigue behaviour. *Composites*, 24, 19-32, 1993.

Phillips, J. W., Costello, G. A. Axial Impact of Twisted Wire Cables. *Journal of Applied Mechanics*, Trans. American Society of Mechanical Engineere, 44, 127-131, 1977.

Phillips, J.W., Costello, G. A. Contact Stresses in Twisted Wire Cables, *Proceedings ASCE, Journal Eng. Mech. Div.*, 99 (EM2), 81-841, 1973.

Potyrała, P. B. Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. *Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Politécnica da Catalunya*, 2004.

Pozzi, P., Taurino, R., Zanasi, T., Andreola, F., Barbieri, L., Lancellotti, I.: New polypropylene/glass composites: Effect of glass fibbakinsers from cathode ray tubes on thermal and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 435-440, 2010.

Puck, A., Schurmann, H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Compos Sci Technol*, 58(7), 1045–67, 1998.

Ramsey, H. Analysis of interwire friction in multilayered cables under uniform extension and twisting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 32(8), 709–16, 1990.

Raof, M., Kraincanic, I. Determination of wire recovery length in steel cables and its practical applications. *Computers and Structures*, 68, 445-459, 1998.

Rohleder, W. J., Tang, B., Doe, T. A., Grace, N. F., Burgess, C. J.: CFRP Strand Application on Penobs cot Narrows Cable Stayed Bridge. *Transportation Research Record* 2050, 169–176, 2008.

Samras, R. K., Shop, R. A., Miulburn, D. A. An analysis of coupled extensional-torsional oscillations in wire ropes. *Journal of Engineering for Industry*, 74, 1130–5, 1974.

Sathikh, S., Moorthy, M. B. K, Krishnan, M. A symmetric linear elastic model for helical wire strands under axisymmetric loads. *Journal of Strain Analysis*, 31(5), 389–99, 1996.

Sayed-Ahmed, E. Y. Single- and multi-strand steel anchorage systems for CFRP tendons/stays. 4<sup>th</sup> Structural Speciality Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 2002.

Schmidt, J. W., Bennitz, A., Täljsten, B., Pedersen, H. Development of Mechanical Anchor for CFRP Tendons Using Integrated Sleeve, *Journal Of Composites For Construction*, 14, 397-405, 2010.

Schmidt, J. W., Täljsten, B., Bennitz, A., Pedersen, H. FRP tendon anchorage in post-tensioned concrete strutures, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, 2009.

Schmidt, J.W., Bennitz, A., Täljsten, B., Pedersen, H.: Development of mechanical anchor for CFRP tendons using integrated sleeve. *ASCE J Compos Constr* (14), 397–405, 2010.

Schön, J. Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite. *Wear*, vol. 257, pp. 395–407, 2004.

Schulze, D. Burnout of organics components of glass ceramic composite tapes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 52, 211-19, 1998.

Shi, J., Wang, X., Wu, Z., Zhu, Z. Effects of radial stress at anchor zone on tensile properties of basalt fiber-reinforced polymer tendons. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(23), 1937–1949, 2015.

Shubhra, Q. T. H., Alam, A. K. M. M.: Effect of gamma radiation on the mechanical properties of natural silk fiber and synthetic E-glass fiber reinforced polypropylene composites: A comparative study. *Radiation Physics and Chemistry*, 80, 1228-1232, 2011.

Silva, D. A., Betioli, A. M., Gleize, P. J. P., Roman, H. R., Gómez, L. A., Ribeiro, J. L. D.: Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 35, 1741-1746, 2005.

Silva, L. V., Silva, F. W., Tarpani, J. R., Forte, M. M. C., Amico, S. C. Ageing Effect On The Tensile Behavior Of Pultruded Cfrp Rods. *Materials & Design*. IN PRESS. DOI 10.1016/j.matdes.2016.07.139., 2017.

Site matweb.com: <http://www.matweb.com/reference/tensilestrength.aspx>, acessado em dezembro de 2017.

Site [www.vectranfiber.com/BrochureProductInformation/TensileProperties](http://www.vectranfiber.com/BrochureProductInformation/TensileProperties), acessado em dezembro de 2011.

Son, B. J, Lee, S. Y., Ji, H. S. Long-term performance of a fiber-reinforced polymer slab bridge superstructure-field load test and ratings. *Compos. Part B-Eng.*, 45(1), 644-656, 2013.

Song, P. S., Hwang, S., Sheu, B. C. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, 1546-1550, 2005.

Sparks, C., Zivanovic, I., Luyckx, J., Hudson, W. Carbon fibre composite tendons for deepwater tension leg platforms. *Proc. OTC 15164*, 2003.

Stanova, E., Fedorko, G., Fabian, M., Kmet, S. Computer modelling of wire strands and ropes part I: Theory and computer implementation, *Adv. Eng. Softw.*, 42(6), 305-315, 2011a.

Stanova, E., Fedorko, G., Fabian, M., Kmet, S. Computer modelling of wire strands and ropes part II: Finite element-based applications, *Adv. Eng. Softw.*, 42(6), 322-331, 2011b.

Stanova, E., Fedorko, G., Kmet, S., Molnar, V., Fabian, V. Finite element analysis of spiral strands with different shapes subjected to axial loads. *Advances in Engineering Software* 83, 45–58, 2015.

Starkey, W.L., Cress, H.A. An analysis of critical stresses and mode of failure of a wire rope, *Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME* 81,307–316, 1959.

Sun, J.F., Wang, G.L., Zhang, H.O. FE analysis of frictional contact effect for laying wire rope. *Journal of materials processing technology*, 202, 170–178, 2008.

Suresha, B., Chandramohan, G., Samapthkumaran, P., Seetharamu, S., Vynatheya, S. Fiber Composites Friction and Wear Characteristics of Carbon-epoxy and Glass-epoxy Woven Roving. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 25, pp. 771, 2006.

Szabó, B., Babuska, I. *Introduction to Finite Element Analysis*. 1<sup>a</sup>. ed. Chichester: Wiley Series on Computational Mechanics, 2011.

Tsai, S., Melo, J. An invariant-based theory of composites. *Composites Science and Technology*, 100, 237-243, 2014.

Tuakta, C. Use of fiber reinforced polymer composite in bridges structures. Master's Thesis of Engineering in Civil and Environmental Engineering at Massachusetts Institute of Technology, 2005.

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*, 45, 5503–5520, 2008.

Utting, W. S., Jones, N. Tensile testing of a wire rope strand. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 20, 151, 1985.

Utting, W. S., Jones, N. The Response Of Wire Rope Strands To Axial Tensile Loads - Part I. Experimental Results And Theoretical Predictions. *Int. J. Mech. Sci.*, 29, 9, 605-619, 1987a.

Utting, W. S., Jones, N. The Response Of Wire Rope Strands To Axial Tensile Loads - Part II. Comparison Of Experimental Results And Theoretical Predictions. *Int. J. Mech. Sci.*, 29, 9, 621-636, 1987b.

Utting, W.S. Experimental and theoretical studies on stresses in and deformation of wire ropes under axial tensile loads. PhD Thesis, University of Liverpool, 1984.

Velinsky, S. A., Anderson, G. L., Costello, G. A. Wire Rope With Complex Cross Section, *Journal of Engineering Mechanics, Trans. ASME*, 110 (8), 880-891, 1984.

Voigt, R. *Lehrbuch der Kristallphysic.* -Verlag, 179, 1987.

Vu, T. D., Durville, D., Davies, P. Finite element simulation of the mechanical behaviour of synthetic braided ropes and validation on a tensile test. *International Journal of Solids and Structures*, 58, 106-116, 2015.

Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63, 1259-1264, 2003.

Wan, Y. Z., Wang, Y. L., He, F., Huang, Y., Jiang, H. J. Mechanical performance of hybrid bismaleimide composites reinforced with three-dimensional braided carbon and Kevlar fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 495-504, 2007.

Wan, Y. Z., Wang, Y. L., Huang, Y., Luo, H. L., He, F., Chen, G. C. Moisture absorption in a three-dimensional braided carbon/Kevlar/epoxy hybrid composite for orthopaedic usage and its influence on mechanical performance. *Composites: Part A*, 37, 1480-1484, 2006.

Wang, X., Wu, Z. Design considerations of FRP stay cable for extra long span cable-stayed bridge. Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University , Hitachi, 316-8511, 2008.

Wang, X., Wu, Z. Integrated High-Performance Thousand-Metre Scale Cable-Stayed Bridge With Hybrid FRP Cables, *Composites: Part B*, 41, 166-175, 2010.

Wang, Z. Y., Wang, Q. Y. Fatigue strength of CFRP strengthened welded joints with corrugated steel plates. *Compos. Part B-Eng.*, 72, 30-39, 2015.

Won, J. P., Jang, C. I., Lee, S. W., Lee, S. J., Kim, H. Y. Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 24, 660-665, 2010.

Wonderly, C., Grenestedt, J., Fernlund, G., Cepus, E. Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites. *Composites: Part B*, 36, 417–426, 2005.

Woo, S., Nam, J., Kim, J. J., Han, S., Byun, K. J. Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design. *Engineering Structures* (30), 3751-3763, 2008.

Woodhead, L. H.; *Handbook of Polymer Composites for Engineers*. Cambridge: Publishing Limited, 1994.

Wu, G. M., Shyng, Y. T. Surface modification and interfacial adhesion of rigid rod PBO fibre by methanesulfonic acid treatment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35, 1291-1300, 2004.

Wu, H., Yan, A. Time-dependent deterioration of FRP bridge deck under freeze/thaw conditions. *Composites: Part B*, 42, 1226–1232, 2011.

Wu, Z. S., Wang, X. Investigation on a thousand-meter scale cable-stayed bridge with fibre composite cables. *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 2008.

Xiong, W., Cai, C. S., Zhang, Y., Xiao, R. Study of super long span cable-stayed bridges with CFRP components. *Engineering Structures* 33, 330–343, 2011.

Yoo, Y., Spencer, M. W., Paul, D. R.: Morphology and mechanical properties of glass fiber reinforced Nylon 6 nanocomposites. *Polymer*, 52, 180-190, 2011.

Zhang, B. R., Benmokrane, B., Chennouf, A., Mukhopadhyaya, P.: Tensile behavior of FRP tendons for prestressed grouted anchors. *J Compos Constr ASCE*, 5(2), 85–93, 2001.

Zhang, C. H., Huang, Y. D., Zhao, Y. D. Surface analysis of [gamma]-ray irradiation modified PBO fiber. *Materials Chemistry and Physics*, 92, 245-250, 2005.

Zhang, L. C., Zarudi, I., Xiao, K. Q. Novel behaviour of friction and wear of epoxy composites reinforced by carbon nanotubes. *Wear*, vol. 261, pp. 806–811, 2006.

Zhang, W., Guo, W., Zhang, C., Lu, Z., Xu, X. Research on wire rope stress distribution of WR-CVT. *Materials Science and Engineering*, 241, 12-14, 2017.

Zhou, E., Tian, H. A novel finite element model for single-layered wire strand. *J. Cent. South Univ.*, 20, 1767–1771, 2013.