



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

SIMCABLE

Atrito entre Corda e Bainha em
Cabos para a Indústria Automóvel

Helder Wilson Oliveira

Porto, Fevereiro 2009

Faculdade Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
SIMCABLE

Atrito entre Corda e Bainha em Cabos
para a Indústria Automóvel Helder Wilson Oliveira

Trabalho supervisionado por

Orientador: Doutor Jorge Humberto Oliveira Seabra
Prof. Associado da FEUP

Co-orientador: Doutor Luís Leite Magalhães
Prof. Adjunto do ISEP-IPP

Porto, Fevereiro 2009

Sumário

A transmissão de força e movimento por actuação de cabos é largamente usada na indústria automóvel em aplicações tais como o accionamento de portas, bancos, travões e caixas de velocidade. Contudo, o seu rendimento é fortemente reduzido devido ao atrito entre a corda de aço e a bainha interior devido à curvatura correspondente a um determinado *lay-out*.

O comportamento dinâmico dos cabos pode ser estudado em detalhe e uma correlação matemática pode ser obtida relacionando a carga aplicada e resistente com o ângulo de curvatura, para um *lay-out* definido por um arco de círculo. Contudo, em *lay-outs* complexos tais como os encontrados na indústria automóvel, é necessário uma aproximação mais sofisticada baseada na aproximação de um “elemento de arco de cabo”.

Por outro lado, os diferentes materiais que compõem o cabo implicam diferentes coeficientes de atrito logo, diferentes rendimentos. Para a avaliação do modelo sugerido foram realizados inúmeros ensaios experimentais num banco de ensaios fabricado exclusivamente para esse propósito.

Com efeito, para além da definição de um modelo de previsão das forças, foram optimizados os valores característicos de diferentes tipos de combinações corda/bainha, analisados ensaios com *lay-out* apoiado e não-apoiado e realizou-se uma análise do desgaste dos diferentes componentes do cabo.

Abstract

The force and movement transmission by cable actuation is widely used in automotive applications like doors, seats, brakes and gearbox operation, for example. However, cable efficiency is strongly reduced by the friction between the rope and the conduit due to cable bending in a prescribed *lay-out*.

The dynamic behaviour of cables can be studied in detail and a mathematical relation can be obtained relating the applied and resistant loads to the curvature angle, in a simple circular *lay-out*. However, in complex *lay-outs* such as those found in automotive applications, a more sophisticated approach is necessary, based on a “cable arc element” approach.

On the other side, different materials from cables composition induce different friction coefficient thus, different efficiency. To validate the suggested model, numerous experimental tests were made in a specific mechanism built for the purpose.

Indeed, besides the definition of a force prediction model, optimal values for the different types of rope/conduit combinations were determined, tests with supported and non-supported *lay-out* were studied and an wear analysis of the different components of the cable were examined.

Résumé

La transmission de force et mouvement par l'action d'un câble est largement utilisé dans l'industrie automobile dans des applications telles que le fonctionnement des portes, des sièges, des freins et de la boîte de vitesses. Cependant, leur rendement est largement réduites en raison du frottement entre la gaine du câble et de l'intérieur à cause de la courbure d'un *lay-out*.

Le comportement dynamique des câbles à été étudié en détail et une corrélation mathématique à été obtenue entre la force appliquée et l'angle de courbure d'un *lay-out* défini par un arc de cercle. Toutefois, pour les *lay-outs* complexes, tels que ceux trouvés dans l'industrie automobile une approche plus sophistiquée est nécessaire, basée sur l'approximation d'un "élément d'arc de câble".

En outre, les différents matériaux qui composent le câble ont une influence significative sur le coefficient de frottement ainsi que sur le rendement. Pour la mise en forme et la corrélation du modèle proposé, de nombreuses expériences ont été réalisées sur un banc d'essai fabriqué exclusivement pour cet usage.

En effet, au-delà de la définition d'un modèle de prévision des forces motrices de chaque *lay-out*, des valeurs typiques du coefficient de frottement ont été optimisés pour différents combinaisons câble/gaine, l'usure des différents composants du câble a été analysée.

Palavras Chave

Cabo de aço
Rendimento
Coeficiente de Atrito
Estimação de força

Keywords

Steel cable
Efficiency
Friction Coefficient
Strength prediction

Mots-clés

Fil d'acier
Rendement
Coefficient de Frottement
Estimations de la force

Agradecimentos

Gostaria de expressar um agradecimento especial ao professor Jorge Seabra pelo permanente apoio, orientação e disponibilidade mostrada no decorrer deste trabalho.

Aos colegas e amigos do CETRIB-INEGI, Luís Magalhães, Armando Campos, Beatriz Graça, Jorge Castro, José Brandão e Ramiro Martins tanto pelo excelente ambiente de trabalho e camaradagem que proporcionaram como pelo permanente apoio prestado.

Aos colegas e amigos Tiago Cousseau, Daniel Carvalho e Cristiano Locateli pela constante boa disposição e camaradagem.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), à Fundação da Ciência e Tecnologia (FCT) e à *Fico Cables, Lda.* pela bolsa concedida e pelos recursos disponibilizados no decorrer deste trabalho.

À Catarina pela grande ajuda na elaboração deste documento e pelo constante incentivo e apoio ao longo de todo o meu percurso académico.

aos meus avós

Conteúdo

Sumário	v
Abstract	vii
Résumé	ix
Palavras Chave/Key Words	xi
Agradecimentos	xiii
Lista de Figuras	xxi
Lista de Tabelas	xxv
Nomenclatura	xxix
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
3. Materiais e Configurações	13
3.1. Cabo	13
3.1.1. Corda de Aço	13
3.1.2. Bainha	16
3.1.3. Espiral de Aço	16
3.1.4. Revestimento	17
3.1.5. Terminais	17
3.2. Máquina	17
3.2.1. Disco Estrutural de Apoio	18
3.2.2. Cilindro Pneumático	18
3.2.3. Células de Carga	20
3.2.4. Discos de Apoio	22
3.2.5. Suporte de Cabos	22
3.2.6. Pesos	23
3.2.7. Módulo de Aquisição	24
3.3. Software <i>Cable Test System</i>	24
3.3.1. <i>Produção</i>	25
3.3.2. <i>Configuração</i>	26
3.3.3. <i>Calibração</i>	26
3.3.4. <i>Manutenção</i>	32
3.4. Software <i>Matlab</i>	33
3.4.1. <i>SimCable2</i>	33
3.4.2. <i>Cycle Dynamic</i>	34
3.4.3. <i>Friction Coefficient</i>	35

3.4.4. <i>Speed & Acceleration</i>	36
4. Modelo Dinâmico da Máquina	39
4.1. Equilíbrio Dinâmico do Mecanismo Actuador de Cabos	39
4.1.1. Movimento Ascendente – <i>Up</i>	40
4.1.2. Movimento Descendente – <i>Down</i>	43
4.1.3. Comportamento Dinâmico do Mecanismo na Ausência de Atrito (Cabo em Linha Recta sem Curvatura)	44
4.1.4. Comportamento Dinâmico do Mecanismo (Cabo com Curvatura)	47
5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais	51
5.1. Nomenclatura	51
5.1.1. Identificação do Cabo	51
5.1.2. Identificação do Ensaio	52
5.1.3. Registo de Ensaios	52
5.2. Metodologia	53
5.3. <i>Lay-outs Simple</i> s	53
5.3.1. Plano de Ensaios para <i>Lay-outs Simple</i> s	54
5.3.2. Resultados	54
5.4. <i>Lay-outs Complex</i> os	71
5.4.1. Plano de Ensaios para <i>Lay-outs Complex</i> os	72
5.4.2. Resultados	73
5.5. Validação do modelo	80
5.6. Comparação dos Cabos	81
6. Desgaste	85
7. Conclusões	89
7.1. Trabalhos Futuros	91
Bibliografia	93
A. Norma NP-1843	95
B. Desenhos Técnicos das Cordas dos Cabos Analisados	105
C. Desenhos Técnicos das Bainhas dos Cabos Analisados	109
D. Desenho Técnico da Espiral de Aço dos Cabos Analisados	113
E. Suportes Fabricados	117
F. Funções de Optimização	123

G. Curvas F_M^{up} e F_R^{dw} para <i>Lay-outs Simples</i>	129
G.1. Ensaios Apoiados	130
G.1.1. CABO <i>RA</i>	130
G.1.2. CABO <i>RF</i>	132
G.1.3. CABO <i>EA</i>	134
G.1.4. CABO <i>EF</i>	136
G.2. Ensaios Não-Apoiados	138
G.2.1. CABO <i>RA</i>	138
G.2.2. CABO <i>RF</i>	140
G.2.3. CABO <i>EA</i>	142
G.2.4. CABO <i>EF</i>	144
H. Curvas F_M^{up} e F_R^{dw} para <i>Lay-outs Complexos</i>	147
H.1. CABO <i>RA</i>	148
H.2. CABO <i>RF</i>	150
H.3. CABO <i>EA</i>	152
H.4. CABO <i>EF</i>	154
I. Resultados dos Ensaios TF nas Curvas F_M^{up} e F_R^{dw} para <i>Lay-outs Complexos</i>	157
I.1. CABO <i>RA</i>	158
I.2. CABO <i>RF</i>	159
I.3. CABO <i>EA</i>	160
I.4. CABO <i>EF</i>	161
J. Comparação dos Cabos	163
J.1. Carga 30 <i>N</i>	165
J.2. Carga 50 <i>N</i>	166
J.3. Carga 75 <i>N</i>	167
K. Código <i>Matlab</i>	169
K.1. Optimização 1 Apoiado	171
K.2. Optimização 2 Apoiado	178
K.3. Optimização 3 Apoiado	185
K.4. Optimização 4 Apoiado	193
K.5. Optimização 5 Apoiado	200
K.6. Optimização 6 Apoiado	206
K.7. Optimização 7 Apoiado	212
K.8. <i>SimCable2</i>	218
K.9. <i>Cycle Dynamic</i>	226
K.10. <i>Friction Coefficient</i>	234

Lista de Figuras

2.1. a) Tensão num cabo com curvatura no plano horizontal; b) Resultante das tensões do cabo numa curva horizontal.	5
2.2. Casos propostos por Rifenburg com ângulos medidos a partir da vertical: a) Curva convexa no sentido ascendente; b) Curva côncava no sentido descendente.	6
2.3. Troço de um <i>lay-out</i> , conectando os pontos p_0 e p_m no espaço. . . .	7
2.4. Variação do coeficiente de atrito em função da a) Força resistente aplicada; b) Pressão na parede.	8
2.5. Desgaste da conduta em função da força motora. ($1mil = 25,4\mu m$)	10
2.6. Efeito do desgaste da conduta da área de contacto	10
3.1. Representação esquemática em corte de um cabo.	14
3.2. Perspectiva global de um cabo utilizado nos ensaios e dos seus constituintes.	14
3.3. Constituintes de uma corda de aço.	15
3.4. Enquadramento dos tipos de enrolamento das cordas estudadas entre outras secções comuns.	16
3.5. Terminais aplicados às cordas de aço dos cabos utilizados: a) Terminal de cabo Zamak; b) Terminal de cabo olhal.	17
3.6. Banco de Ensaios.	18
3.7. Limitação do sistema para ensaios com ângulos compreendidos entre 235 e 360°	19
3.8. Solução sugerida para aumentar a força máxima do cilindro.	19
3.9. Célula de carga.	21
3.10. Discos de apoio da máquina de ensaios.	22
3.11. Suportes de cabos.	23
3.12. Pesos disponíveis.	23
3.13. Interface <i>Produção</i> do <i>software</i> da máquina <i>Cable Test System</i>	25
3.14. Interface <i>Configuração</i> do <i>software</i> da máquina <i>Cable Test System</i> . .	27
3.15. Interface <i>Calibração</i> do <i>software</i> da máquina <i>Cable Test System</i> . . .	28
3.16. a) Posicionamento do cilindro para a calibração da Célula de Carga 1 no ponto de carga nula; b) Posicionamento da Célula de Carga 2, suspensão, para a calibração do ponto de carga nula.	29
3.17. a) Esquema da montagem para definir o segundo ponto de calibração; b) Fotografia da montagem para definir o segundo ponto de calibração.	30
3.18. Interface <i>Manutenção</i> do <i>software</i> da máquina <i>Cable Test System</i> . .	32

3.19. Interface principal do programa <i>SimCable</i>	34
3.20. Interface <i>Cycle Dynamic</i> do programa <i>SimCable</i>	35
3.21. Interface <i>Friction Coefficient</i> do programa <i>SimCable</i>	36
3.22. Representação gráfica da velocidade e da aceleração de um ciclo com o programa <i>SimCable</i>	37
4.1. Representação esquemática do modelo do sistema actuador de cabos.	40
4.2. Efeito do peso da célula de carga na força registada no ponto B (F_B).	41
4.3. Força dinâmica devida ao amortecimento e à rigidez do cabo no movimento ascendente.	46
4.4. Força dinâmica devida ao amortecimento e à rigidez do cabo no movimento descendente.	46
4.5. Aceleração $\ddot{x}$ nos movimentos ascendente e descendente.	47
4.6. Forças motora, resistente e de atrito no movimento ascendente.	49
4.7. Forças motora, resistente e de atrito no movimento descendente.	49
5.1. Ficheiro de registo dos ensaios realizados.	53
5.2. Evolução da força motora no movimento ascendente num ensaio de 2500 ciclos.	54
5.3. Evolução da força motora média de um ensaio apoiado com um cabo EA a 360° , raio $300mm$ e carga $50N$ com cedência da bainha.	58
5.4. Força motora no movimento ascendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).	68
5.5. Força resistente no movimento descendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).	68
5.6. Força motora no movimento ascendente para o cabo RA não-apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).	69
5.7. Força resistente no movimento descendente para o cabo RA não- apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).	69
5.8. Alguns <i>lay-outs complexos</i> estudados.	72
5.9. Força motora no movimento ascendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} =$ $0,146$).	78
5.10. Força resistente no movimento descendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} =$ $0,146$).	78
5.11. <i>Lay-out</i> de um ensaio TF : a) Representação esquemática; b) Fo- tografia do <i>lay-out</i>	80
5.12. Força motora no movimento ascendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} =$ $0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.	82
5.13. Força resistente no movimento descendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} =$ $0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.	82
5.14. Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para en- saio solicitados a $30N$	83
5.15. Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaio solicitados a $30N$	83

6.1. Secção transversal da bainha (ampliação: 2x).	86
6.2. Secção transversal da bainha (ampliação: 5x).	86
6.3. Secção longitudinal na extremidade da bainha (ampliação: 20x). . .	87
6.4. Secção longitudinal a meio da bainha (ampliação: 20x).	87
6.5. Impureza presente entre dois arames de um cordão da corda de aço (ampliação: 10x).	88
6.6. Zona oxidada no cabo de aço (ampliação: 10x).	88
G.1. Força Motora no movimento ascendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0, 147$).	130
G.2. Força Resistente no movimento descendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0, 147$).	130
G.3. Força Motora no movimento ascendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0, 224$).	132
G.4. Força Resistente no movimento descendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0, 224$).	132
G.5. Força Motora no movimento ascendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0, 129$).	134
G.6. Força Resistente no movimento descendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0, 129$).	134
G.7. Força Motora no movimento ascendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0, 127$).	136
G.8. Força Resistente no movimento descendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0, 127$).	136
G.9. Força Motora no movimento ascendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0, 146$).	138
G.10. Força Resistente no movimento descendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0, 146$).	138
G.11. Força Motora no movimento ascendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0, 210$).	140
G.12. Força Resistente no movimento descendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0, 210$).	140
G.13. Força Motora no movimento ascendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0, 124$).	142
G.14. Força Resistente no movimento descendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0, 124$).	142
G.15. Força Motora no movimento ascendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0, 126$).	144
G.16. Força Resistente no movimento descendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0, 126$).	144
H.1. Força Motora no movimento ascendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} =$ $0, 146$).	148

H.2.	Força Resistente no movimento descendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$)	148
H.3.	Força Motora no movimento ascendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$)	150
H.4.	Força Resistente no movimento descendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$)	150
H.5.	Força Motora no movimento ascendente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$)	152
H.6.	Força Resistente no movimento descendente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$)	152
H.7.	Força Motora no movimento ascendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$)	154
H.8.	Força Resistente no movimento descendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$)	154
I.1.	Força motora no movimento ascendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.	158
I.2.	Força resistente no movimento descendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.	158
I.3.	Força motora no movimento ascendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$) e representação dos valores experimentais obtidos.	159
I.4.	Força resistente no movimento descendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$) e representação dos valores experimentais obtidos.	159
I.5.	Força motora no movimento ascendente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$) e representação dos valores experimentais obtidos.	160
I.6.	Força resistente no movimento descendente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$) e representação dos valores experimentais obtidos.	160
I.7.	Força motora no movimento ascendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$) e representação dos valores experimentais obtidos.	161
I.8.	Força resistente no movimento descendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$) e representação dos valores experimentais obtidos.	161
J.1.	Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para ensaios solicitados a $30N$	165
J.2.	Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaios solicitados a $30N$	165
J.3.	Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para ensaios solicitados a $50N$	166
J.4.	Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaios solicitados a $50N$	166
J.5.	Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para ensaios solicitados a $75N$	167
J.6.	Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaios solicitados a $75N$	167

Lista de Tabelas

3.1. Características técnicas do Cilindro Pneumático de accionamento. .	20
3.2. Características das Células de Carga.	21
3.3. Massas e respectivos pesos das cargas resistentes disponíveis. . . .	24
4.1. Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na ausência de atrito no movimento ascendente.	45
4.2. Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na ausência de atrito no movimento descendente.	45
4.3. Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na presença de atrito no movimento ascendente.	48
4.4. Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na presença de atrito no movimento descendente.	48
5.1. Identificação no projecto do tipo de cabo.	52
5.2. Plano de ensaios para testes apoiados e não-apoiados.	55
5.3. Resultados das forças motoras e resistentes para os ensaios apoiados.	56
5.4. Resultados das forças motoras e resistentes para os ensaios não-apoiados.	57
5.5. Resultados das forças de atrito para os ensaios apoiados.	59
5.6. Resultados das forças de atrito para os ensaios não-apoiados. . . .	60
5.7. Erro da aproximação do modelo teórico para os ensaios não-apoiados. (Valores multiplicados por um factor de 1000)	61
5.8. Resultados dos coeficientes de atrito para os ensaios apoiados. . . .	62
5.9. Resultados dos coeficientes de atrito para os ensaios não-apoiados. .	63
5.10. Coeficientes de atrito médios tendo em conta o sentido de movimento (<i>up</i> ou <i>down</i>) para cada tipo de cabo, apoiado (<i>AP</i>) ou não-apoiado (<i>NAP</i>).	64
5.11. Coeficientes de atrito médios globais para cada tipo de cabo, apoiado (<i>AP</i>) e não-apoiado (<i>NAP</i>), respectivo desvio padrão e erro relativo entre caso apoiado e não-apoiado.	64
5.12. Erros máximos e mínimos dos valores do coeficiente de atrito obtidos experimentalmente relativos ao valor médio global.	65
5.13. Valores dos coeficientes de atrito médios otimizados e respectivos erros máximos, mínimos e médios dos valores obtidos experimentalmente.	66
5.14. Optimização da função $\frac{\dot{F}_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + d \cdot F}$	67

5.15. Valores numéricos das forças motora e resistente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).	67
5.16. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).	68
5.17. Valores numéricos das forças motora e resistente para o cabo RA não-apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).	70
5.18. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA não-apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).	70
5.19. Ensaio onde ocorre o erro relativo máximo (em valor absoluto). . .	71
5.20. Plano de ensaios para <i>lay-outs complexos</i>	73
5.21. Resultados das forças motoras e resistentes para os ensaios com <i>lay-outs complexos</i>	74
5.22. Resultados das forças de atrito para os ensaios complexos.	75
5.23. Resultados dos coeficientes de atrito para os ensaios complexos. . .	76
5.24. Coeficientes de atrito médios globais para cada tipo de cabo, respectivos desvios padrões e erros máximo, mínimo e médio.	76
5.25. Valores dos coeficientes de atrito médios otimizados e respectivos erros máximos, mínimos e médios das forças experimentais face ao respectivo valor numérico considerando apenas <i>lay-outs simples</i> (Tabela 5.13) e <i>lay-outs simples + complexos</i>	77
5.26. Valores numéricos das forças motora e resistente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).	79
5.27. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).	79
5.28. Ensaio onde ocorre o erro relativo máximo (em valor absoluto). . .	79
5.29. Erros dos valores experimentais das forças dos ensaios TF relativos ao valor numérico correspondente determinado a partir do modelo teórico apresentado para os coeficientes de atrito da Tabela 5.25. . .	81
F.1. Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta}$	125
F.2. Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + b \cdot R + c \cdot R \cdot \beta + d \cdot F}$	125
F.3. Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + b \cdot R + d \cdot F}$	126
F.4. Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + b \cdot R}$	126
F.5. Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + d \cdot F}$	126
F.6. Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + e} + f$	126
F.7. Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + g \cdot V}$	127

G.1. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0, 147$).	131
G.2. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0, 147$).	131
G.3. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0, 224$).	133
G.4. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0, 224$).	133
G.5. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0, 129$).	135
G.6. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0, 129$).	135
G.7. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0, 127$).	137
G.8. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0, 127$).	137
G.9. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0, 146$).	139
G.10. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0, 146$).	139
G.11. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0, 210$).	141
G.12. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0, 210$).	141
G.13. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0, 124$).	143
G.14. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0, 124$).	143
G.15. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0, 126$).	145
G.16. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0, 126$).	145
H.1. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0, 146$).	149
H.2. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0, 146$).	149
H.3. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0, 210$).	151
H.4. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0, 210$).	151
H.5. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0, 132$).	153

H.6. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$).	153
H.7. Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$).	155
H.8. Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$).	155

Nomenclatura

Parâmetros

Símbolo	Designação	Unidades
c	Coefficiente de amortecimento do cabo	
$Corr.PC1$	Correcção do Peso da Célula de Carga 1	N
$D.P.$	Desvio Padrão	
e	Erro	$\%$
F	Força aplicada ao cabo	N
k	Rigidez do cabo	
l	Comprimento da corda de aço do cabo	m
m_c	Massa de uma célula de carga	g
$\hat{p}$	Versor da direcção tangente à curva	
$\hat{p}$	Versor da direcção normal à curva	
$PC1$	Peso da Célula de Carga 1	N
$PC2$	Peso da Célula de Carga 2	N
r	Raio de arco de círculo	mm
RA	Cabo com bainha POM e corda 1x19	
RF	Cabo com bainha POM e corda 7x7	
EA	Cabo com bainha PEHD e corda 1x19	
EF	Cabo com bainha PEHD e corda 7x7	
w	Peso da corda de aço do cabo	g/m
β	Ângulo do arco de círculo	rad
ϕ	Ângulo de elevação da curva	rad
φ	Ângulo da azimuth da curva	rad
μ	Coefficiente de atrito	

Índices

Símbolo	Designação
at	Atrito
$CPLX$	Complexo
dw	Descendente
$max.$	Máximo
$min.$	Mínimo
M	Motor
R	Resistente
up	Ascendente

1. Introdução

Os automóveis dos dias de hoje têm inúmeras aplicações com recurso a accionamento por cabos como é o caso da abertura das portas, do ajustamento dos bancos, da actuação do travão-de-mão, da regulação dos espelhos retrovisores ou da operação de caixa da velocidades. Porém, a sua eficiência é fortemente reduzida pelo atrito entre a corda de aço e a bainha devido à curvatura de um determinado *lay-out*.

O crescente aumento da automatização destas aplicações levou a que a empresa *Fico Cables, Lda.* do grupo *FICOSA*, se preocupasse com o tamanho e potência dos motores eléctricos que accionam estas aplicações. Grandes e potentes motores implicam, para além de custos mais elevados, um aumento do peso do veículo que se reflectirá num aumento de consumo e diminuição das suas prestações. É por este motivo importante compreender como se processa a transmissão de movimento por accionamento de cabos, quais as perdas de força envolvidas e como estas podem ser minimizadas.

Desta forma, a *Fico Cables, Lda.* preocupou-se, não só com o estudo dos inúmeros componentes para cabos que recebe dos seus fornecedores, como entender em que medida um determinado *lay-out* afecta o seu rendimento. Para isso, esta empresa contratualizou com o *Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – INEGI* – através da sua *Unidade de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial – CETRIB* – um estudo detalhado dos seus equipamentos para vários *lay-outs* tendo em conta variáveis como temperatura e humidade ambiente. Porém, devido à complexidade do problema, ficou estipulado que, numa primeira fase, apenas seriam considerados os materiais dos diferentes componentes e a geometria do *lay-out* e as suas variáveis implícitas como raio, ângulo, troços rectos, etc.

Este projecto foi, assim, realizado no *CETRIB*, onde é feita investigação na área da mecânica do contacto, lubrificação e desgaste, entre outras, e onde foi instalado um banco de ensaios especificamente concebido e construído para este projecto e onde decorreram os seus ensaios.

É assim objectivo deste trabalho definir um modelo de previsão da força necessária realizar para mover uma determinada carga resistente através de um *lay-out* conhecido. Este modelo deverá ter em conta as variáveis que definem este *lay-out* bem como os diferentes materiais que constituem um cabo.

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, incluindo o presente des-

1. Introdução

tinado a uma introdução sobre o tema e aos objectivos propostos, distribuídos da seguinte forma:

- **Capítulo 2** – Destinado à revisão bibliográfica, é feita uma análise do estado da arte sobre métodos de cálculo de forças em troços curvos;
- **Capítulo 3** – Neste capítulo são apresentados os diferentes elementos intervenientes neste estudo. Começando pela apresentação do cabo e dos seus constituintes, também aqui é exposto os diferentes componentes da máquina de ensaios, o funcionamento dos *softwares* utilizados e o procedimento de calibração;
- **Capítulo 4** – A descrição do tipo de movimento que a máquina de ensaios aplica e a correlação entre as diferentes variáveis obtidas a partir desta permitem a definição de um modelo dinâmico apresentado neste capítulo;
- **Capítulo 5** – Este capítulo dedica-se à parte experimental deste trabalho. Nele são apresentados o plano de ensaios seguido, os resultados obtidos aplicando o modelo da máquina descrito no Capítulo 4 e a comparação destes resultados com o modelo teórico desenvolvido;
- **Capítulo 6** – Devido ao inconstante desempenho do cabo, foi feita uma análise ao desgaste das diferentes partes do cabo neste capítulo onde são apresentadas vários elementos que podem afectar o seu rendimento;
- **Capítulo 7** – Para finalizar, são apresentadas as conclusões obtidas com este estudo e sugeridos alguns trabalhos futuros que poderão permitir um aperfeiçoamento do modelo de previsão apresentado.

2. Revisão Bibliográfica

Em 1879 nos Estados Unidos da América, Thomas Alva Edison (1847 - 1931) fez uma das descobertas mais extraordinárias de sempre: a luz eléctrica. Nas décadas seguintes, a procura crescente dos cidadãos por energia eléctrica e a necessidade de iluminação pública provocou um forte aumento das redes de distribuição de energia principalmente nos centros urbanos. Por este motivo, a urgência em aliviar estas redes levou à procura de uma alternativa aos postes eléctricos. Assim, surgiu a necessidade de criar uma rede no subsolo de túneis utilitários que permitissem a passagem tanto de cabos eléctricos como de telefone. Para possibilitar o seu acesso e instalação foi necessária a criação de pontos de acesso, “*manholes*”, e de juntas de união, “*splices*”, ao longo da rede. Porém, o forte aumento do preço destas infra-estruturas em meados do século XX levou a que a distância entre estas fosse cada vez maior o que, por sua vez, requer forças mais elevadas para a sua instalação. Foi a partir desta dificuldade que começaram a surgir os primeiros estudos sobre o contacto entre cabo e conduta, com o intuito de prever quais as forças necessárias para a instalação deste tipo de cabos e qual o melhor traçado (*lay-out*) para minimizar essas forças.

Até 1949, a fórmula utilizada para calcular a tensão de um cabo numa conduta ou tubo era

$$T = \mu w l \quad (2.1)$$

em que l é o comprimento do cabo em metros, w o peso em Newton por metro e μ o coeficiente de atrito entre o cabo e a conduta. Porém, a fórmula (2.1) é válida apenas para troços rectos, pois não tem em consideração a curvatura da conduta ou tubo. Nesse ano, F. H. Buller [1], da General Electric Company, é o primeiro a propor uma solução analítica para o cálculo da tensão em cabos para troços curvos.

Quando um cabo contorna uma curva, surge uma força de atrito adicional, provocada pela componente normal das tensões (Figura 2.1a). Esta faz com que o cabo deslize sobre a conduta até encontrar uma posição de equilíbrio entre a resultante da força normal com o seu peso, e a reacção normal respectiva a essa resultante, caso esteja na horizontal (Figura 2.1b).

Para uma curva com um raio de r metros e um ângulo de β radianos, considere-se o elemento de arco $d\beta$ representado na Figura 2.1a. Resolvendo o equilíbrio

2. Revisão Bibliográfica

de forças que actuam no cabo, obtiveram-se as componentes normal e tangencial que definem respectivamente a força de atrito dentro da conduta e a força que efectivamente puxa o cabo.

$$\begin{aligned} ComponenteNormal &= (F + dF) \sin \frac{1}{2}d\beta + F \sin \frac{1}{2}d\beta \\ &= (2F + dF) \sin \frac{1}{2}d\beta \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} ComponenteTangencial &= (F + dF) \cos \frac{1}{2}d\beta - F \cos \frac{1}{2}d\beta \\ &= dF \cos \frac{1}{2}d\beta \end{aligned} \quad (2.3)$$

Para $d\beta$ muito pequeno, $\sin \frac{1}{2}d\beta = \frac{1}{2}d\beta$ e $\cos \frac{1}{2}d\beta = 1$ de modo que as equações (2.2) e (2.3) resultam

$$\begin{aligned} ComponenteNormal &= (2F + dF) \frac{1}{2}d\beta \\ &= \left(F + \frac{1}{2}dF\right) d\beta \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$ComponenteTangencial = dF \quad (2.5)$$

A força resultante entre a componente normal e o peso do cabo (igual a $wrd\beta$) é obtida conforme o mostrado na Figura 2.1b, sendo igual a $\sqrt{(F + \frac{1}{2}dF)^2 + (wr)^2}d\beta$. Desprezando os termos de segunda ordem, isto é, os produtos de dF por $d\beta$, a equação da resultante fica $\sqrt{F^2 + (wr)^2}d\beta$ e a da correspondente força de atrito $\mu \cdot \sqrt{F^2 + (wr)^2}d\beta$. Logo, $dF = \mu \cdot \sqrt{F^2 + (wr)^2}d\beta$ é o incremento de tensão para um ângulo infinitamente pequeno $d\beta$. Ao fazer-se uma mudança de variável $x = \frac{F}{wr}$, pode-se reescrever a equação da seguinte forma

$$\begin{aligned} \mu d\beta &= \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \mu \int_0^\beta d\beta &= \int_{F_1/wr}^{F_2/wr} \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

cuja solução é

$$\mu\beta = \sinh^{-1} \frac{F_2}{wr} - \sinh^{-1} \frac{F_1}{wr}$$

Resolvendo em ordem a F_2

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{wr}{F_1} \left[\sinh \left(\mu\beta + \sinh^{-1} \frac{F_1}{wr} \right) \right] \quad (2.7)$$

A expressão (2.7) foi a primeira equação sugerida para a determinação das tensões de um cabo com curvatura no plano horizontal.

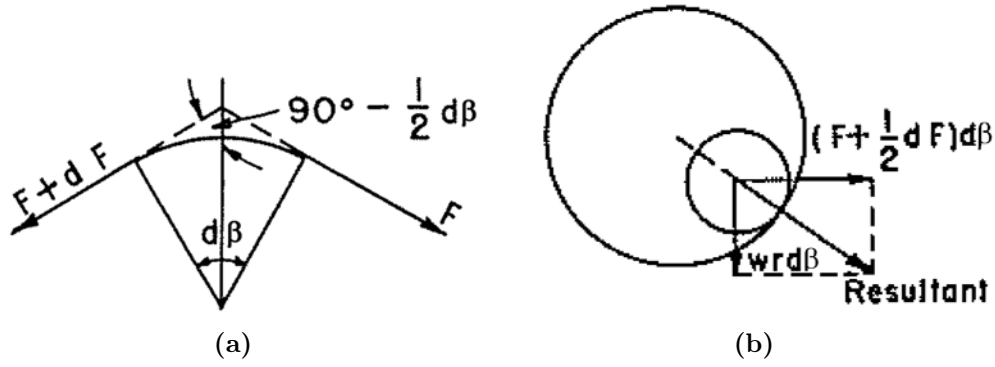


Figura 2.1.: a) Tensão num cabo com curvatura no plano horizontal; b) Resultante das tensões do cabo numa curva horizontal.

Para as curvas verticais passa a ser necessária a distinção do tipo de curva e do sentido do movimento. Assim, existem quatro possibilidades que passam pela combinação de curvas convexas¹ e côncavas² com os sentidos ascendente e descendente. Para não tornar esta exposição excessivamente longa, expõem-se aqui, sem demonstrar, as soluções analíticas sugeridas por Buller para cada um dos casos.

Conduta convexa, sentido de tracção descendente

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta} + \frac{wr}{F_1(1 + \mu^2)} \left[2\mu \sin \beta - (1 - \mu^2) (e^{\mu\beta} - \cos \beta) \right] \quad (2.8a)$$

Conduta convexa, sentido de tracção ascendente

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta} + \frac{wr}{F_1(1 + \mu^2)} \left[(1 - \mu^2) \sin \beta + 2\mu (e^{\mu\beta} - \cos \beta) \right] \quad (2.8b)$$

Conduta concava, sentido de tracção descendente

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta} - \frac{wr}{F_1(1 + \mu^2)} \left[(1 - \mu^2) \sin \beta + 2\mu (e^{\mu\beta} - \cos \beta) \right] \quad (2.8c)$$

Conduta concava, sentido de tracção ascendente

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta} - \frac{wr}{F_1(1 + \mu^2)} \left[2\mu \sin \beta - (1 - \mu^2) (e^{\mu\beta} - \cos \beta) \right] \quad (2.8d)$$

¹Curvas convexas - quando o cabo exerce pressão sobre o inferior da conduta

²Curvas côncavas - quando o cabo exerce pressão sobre o topo da conduta

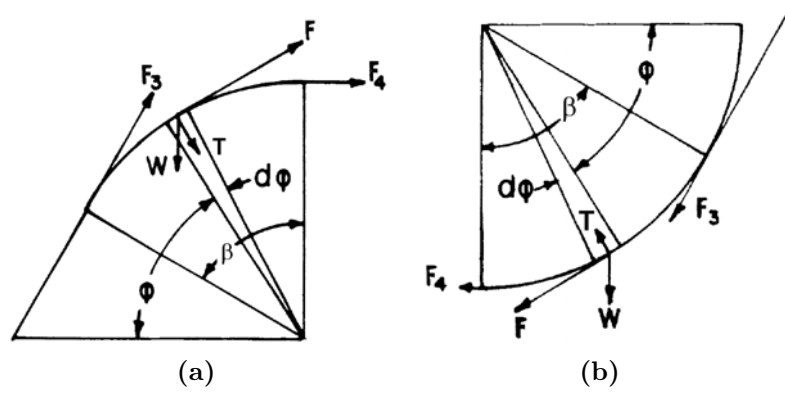


Figura 2.2.: Casos propostos por Rifenburg com ângulos medidos a partir da vertical:
a) Curva convexa no sentido ascendente; b) Curva côncava no sentido descendente.

As equações (2.7) e (2.8) foram, assim, as primeiras soluções analíticas para o cálculo da tensão necessária a exercer sobre um cabo para que este deslize sobre uma conduta com uma determinada curvatura [1].

Em 1953, R. C. Rifenburg [2], membro da AIEE (American Institute of Electrical Engineers), num estudo totalmente independente do de F. H. Buller, propõe outras soluções analíticas para o mesmo problema, inclusive para curvas horizontais e verticais (também estas distintas entre curvas convexas ou côncavas e movimento ascendente ou descendente). As suas soluções são em tudo semelhantes às anteriores, embora este tenha acrescentado mais dois casos possíveis de solicitação. Um para as curvas verticais convexas no sentido ascendente e outro para côncavas no sentido descendente mas com o ângulo medido a partir da vertical (Figuras 2.2a e 2.2b).

Conduta convexa, sentido de tracção ascendente

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta} + \frac{wr}{F_1(1+\mu^2)} \left[2\mu e^{\mu\beta} \sin \beta + (1-\mu^2)(1-e^{\mu\beta} \cos \beta) \right] \quad (2.9a)$$

Conduta concava, sentido de tracção descendente

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta} - \frac{wr}{F_1(1+\mu^2)} \left[2\mu e^{\mu\beta} \sin \beta + (1-\mu^2)(1-e^{\mu\beta} \cos \beta) \right] \quad (2.9b)$$

Estas propostas foram de extrema importância na medida em que permitiram fazer uma estimativa da força necessária para puxar um cabo segundo a grande maioria dos *lay-outs*. A excepção verificava-se para segmentos de cabo não planares e também para segmentos que não tivessem curvaturas constantes. Porém, em 1973,

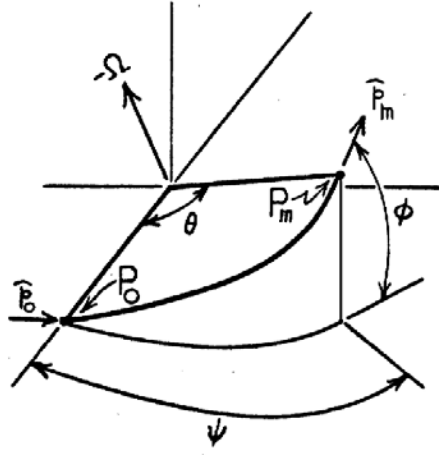


Figura 2.3.: Troço de um *lay-out*, conectando os pontos p_0 e p_m no espaço.

David G. Smith [3], a partir de uma análise geométrica diferencial de um *lay-out* espacial aleatório, determina uma solução genérica representada pela equação (2.10) em que $\vec{W}$ representa o vector relativo ao peso do cabo; $\hat{p}$ e $\dot{\hat{p}}$ os versores da direcção tangente e normal à curva, respectivamente; k a curvatura e dp o comprimento diferencial do cabo.

$$F_m = \int_{\varphi_0}^{\varphi_e} \left[\vec{W} \cdot \hat{p} + \mu_e \left| \left(\vec{W} - Fk\dot{\hat{p}} \right) \times \hat{p} \right| \right] dp + F_0 \quad (2.10)$$

Desta forma, o integral de (2.10) pode ser aproximado com qualquer precisão, ajustando o intervalo Δp da equação (2.11).

$$F_m \approx \sum_{n=0}^m \left[\vec{W} \cdot \hat{p}_n + \mu_e \left| \left(\vec{W} - F_{n-1}k\dot{\hat{p}}_n \right) \times \hat{p}_n \right| \right] \Delta p + F_0 \quad (2.11)$$

Assim, resta apenas definir o *lay-out*. Considere-se um arco circular que liga os pontos p_0 e p_m no espaço, conforme representado na Figura 2.3. Ao longo deste arco, a sua tangente vai rodar segundo um ângulo β , que pode ser decomposto no ângulo azimuth ψ e num ângulo de elevação ϕ . Sejam A_0 e E_0 os ângulos de azimuth e elevação de $\hat{p}_0$. Então, em p_m , $A_m = A_0 + \psi$ e $E_m = E_0 + \phi$, logo

$$\hat{p}_m = \cos(A_0 + \psi) \cos(E_0 + \phi) \hat{i} + \sin(A_0 + \psi) \cos(E_0 + \phi) \hat{j} + \sin(E_0 + \phi) \hat{k} \quad (2.12)$$

Desta forma, para A_0 e E_0 definidos por $\hat{p}_0$, qualquer arco no espaço pode ser definido conhecendo ψ, ϕ e o seu raio r . Se ambos ψ e ϕ forem zero, não existe um

2. Revisão Bibliográfica

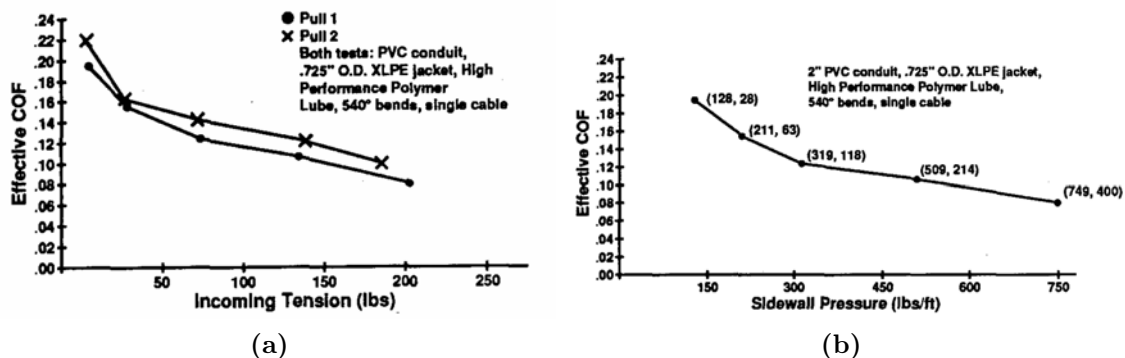


Figura 2.4.: Variação do coeficiente de atrito em função da a) Força resistente aplicada; b) Pressão na parede.

arco e passa-se a ter um segmento recto, especificando-se assim um comprimento em vez de um raio.

Até esta data, os coeficientes de atrito utilizados para fazer as estimativas da força necessária para puxar um cabo segundo um determinado *lay-out*, eram determinados pelo método do plano inclinado que consistia essencialmente em determinar o tempo que um cabo demorava a deslizar por uma superfície inclinada recta [4]. Apenas em 1984, Seman [5] determina os coeficientes de atrito fazendo ensaios com uma curva de 90° embora não dê a conhecer os valores obtidos.

Em 1992, J.M. Fee e D. J. Quist [6] determinam coeficientes de atrito a partir de ensaios realizados num sistema criado com esse propósito, onde é fácil a reprodutibilidade dos ensaios. Embora fosse possível variar o tipo de cabo, o tipo de conduta, o tamanho da conduta, o tipo de lubrificante e o número de cordas de aço por cabo, tinha muitas limitações quanto à variação da geometria do *lay-out*, na medida em que os ângulos apenas podiam ser do tipo $\pi + 2n\pi$ com $n \in \mathbb{N}$, enquanto que o raio era essencialmente o mesmo. Os resultados obtidos por estes autores permitiram determinar a influência de alguns destes parâmetros, nomeadamente o coeficiente de atrito diminui com o aumento da força resistente ou, por outras palavras, com o aumento da pressão na parede³ (Ver Figuras 2.4a e 2.4b).

Assim, em meados de 1990, era consistente a opinião de vários autores (tais como [6] [7] [5] [4]) quanto à dependência do coeficiente de atrito com o tipo de cabo, o tipo de bainha e a presença de lubrificante, e também quanto à inde-

³Pressão na parede - é a força radial exercida pelo cabo sobre a conduta quando este é puxado através de uma curva, e é definida pelo quociente da força aplicada ao cabo, F , pelo raio da curva r . Na realidade é definida pela soma dos vectores da tensão na parede devido à tensão no cabo (F/R) que actua na horizontal, e pelo peso do cabo que actua na vertical. Nos casos em que a tensão na parede é suficientemente elevada para ser considerada, a diferença entre F/R e $\sqrt{(F/R)^2 + W^2}$ é desprezável.

pendência deste com o peso do cabo e o seu diâmetro. Também se acreditava que o coeficiente de atrito era independente da velocidade embora os resultados obtidos até então não fossem satisfatórios.

Mais delicada é a compreensão da dependência do coeficiente de atrito com a força resistente. Embora seja indubitável a sua dependência, não se conhecesse ao certo a sua magnitude e natureza. Desta forma, alguns desses autores sugeriram a utilização de diferentes coeficientes de atrito para diferentes cargas aplicadas, ou seja, valores mais elevados para cargas mais baixas e vice-versa. Embora não seja consensual, muitos assumem o valor de $2190N/m$ ($150\text{ lbs}/ft$) como transição entre baixa e alta tensão na parede.

Em 1997, E. C. Bascom III, J. R. Stewart e L. Y. Tang [8], ao estudar o desgaste das cordas de aço usadas para puxar os cabos eléctricos devido ao contacto destas com uma conduta também de aço, fazem uma avaliação da variação do coeficiente de atrito em função da distância acumulada de vários ensaios e para diferentes valores da tensão na parede. Os referidos autores observaram que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento do deslocamento realizado pelo cabo sobre a conduta e, também, com o aumento da tensão na parede, conforme representado na Figura 2.5. É ainda possível observar nessa mesma figura que, para ambos os valores das tensões na parede, a velocidade do aumento do coeficiente de atrito diminui com o comprimento. Isto deve-se ao desgaste da conduta provocado pelas sucessivas passagens da corda que lhe vão arrancando material, fazendo aumentar a área de contacto, conforme se observa nas Figuras 2.6a e 2.6b, de tal modo que a pressão diminui. Na primeira a área de contacto entre a corda e a conduta é reduzida. Porém, devido ao desgaste da conduta, essa área vai aumentando, conforme ilustrado na segunda figura, fazendo diminuir a pressão para um mesmo valor da tensão na parede que, por sua vez, faz com que a velocidade de desgaste também diminua.

Por outro lado, ao estudar o desgaste da corda, realizaram uma inspecção visual onde observaram partículas metálicas nos arames da corda, para além de abrasão dos arames nas zonas de contacto com a conduta.

Alguns autores aplicam uma simplificação das equações sugeridas por Buller e Rifenburg em que desprezam o termo dependente do peso do cabo afirmando que o erro cometido é muito baixo [9]. Desta forma todas as equações assumem a mesma forma inclusive para a situação horizontal como vertical, ou seja, a relação das forças passa a ser obtida por:

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{\mu\beta} \quad (2.13)$$

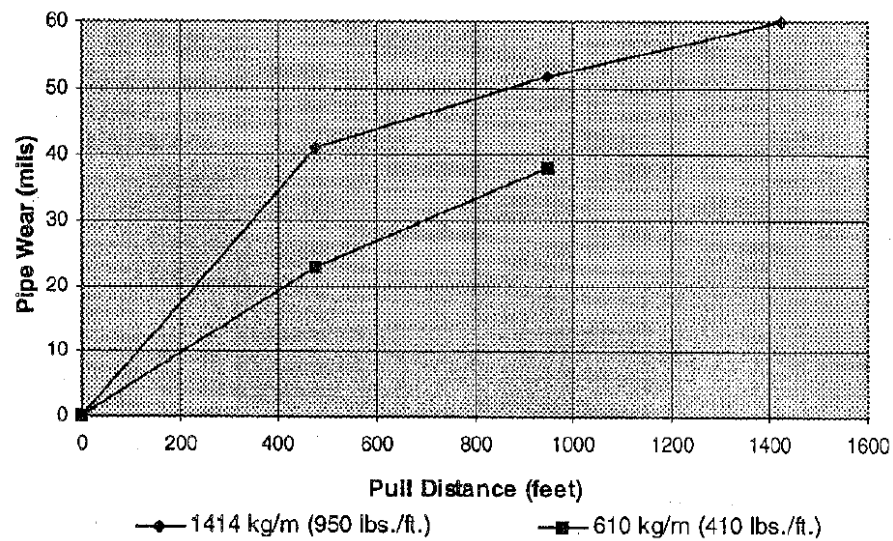


Figura 2.5.: Desgaste da conduta em função da força motora. ($1\text{mil} = 25,4\mu\text{m}$)

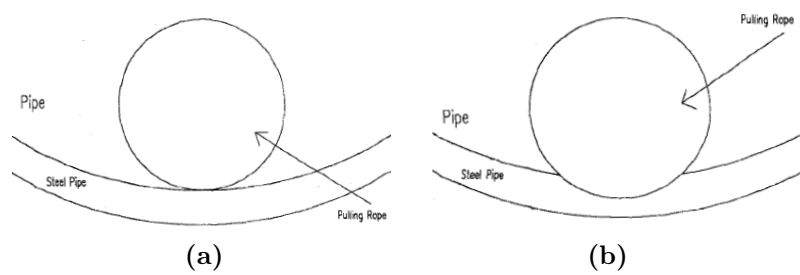


Figura 2.6.: Efeito do desgaste da conduta da área de contacto

Embora o presente trabalho trate de cabos totalmente distintos dos estudados pelos autores atrás referidos, o problema que trata este trabalho é em tudo idêntico ao destes autores. Assim, o recurso à literatura mencionada serviu como uma orientação e contextualização importantes. Por outro lado, a formulação apresentada, como é possível observar na demonstração, é válida para qualquer tipo de cabo ou corda independentemente da sua dimensão ou material.

3. Materiais e Configurações

O presente capítulo serve como apresentação dos materiais utilizados para o estudo do coeficiente de atrito em cabos para a indústria automóvel. A realização dos ensaios experimentais requer a utilização de uma máquina específica e a aquisição e visualização dos dados necessita de um *software* especial. Estes materiais são analisados nesta secção. Por outro lado, é importante conhecer o objecto em estudo e, por isso, é essencial fazer uma análise detalhada dos cabos usados e dos seus constituintes.

3.1. Cabo

Este trabalho é relativo ao estudo do coeficiente de atrito em *cabos* da indústria automóvel. É por isso conveniente conhecer com algum detalhe este componente mecânico e definir desde já quais os seus diferentes constituintes bem como apresentar alguns dos parâmetros que possam ter influência no coeficiente de atrito.

Um cabo é constituído essencialmente por cinco componentes:

1. Corda de aço (ou cabo de aço);
2. Bainha (ou tubo interior);
3. Espiral de aço;
4. Revestimento;
5. Terminais.

Estes componentes são apresentados com mais detalhe nas secções seguintes, mas para que se tenha uma melhor noção do conjunto, as Figuras 3.1 e 3.2 apresentam, respectivamente, uma vista esquemática e um exemplo de um cabo utilizado num ensaio.

3.1.1. Corda de Aço

É a estrutura principal do cabo, o elemento que transmite o movimento e o seu nome pode ser facilmente confundido com o termo geral “cabo”. É por isso conveniente designar este elemento por *corda de aço* ou simplesmente *corda*, já que esta

3. Materiais e Configurações

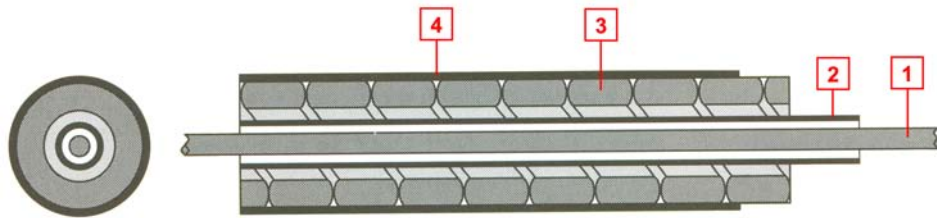


Figura 3.1.: Representação esquemática em corte de um cabo.



Figura 3.2.: Perspectiva global de um cabo utilizado nos ensaios e dos seus constituintes.

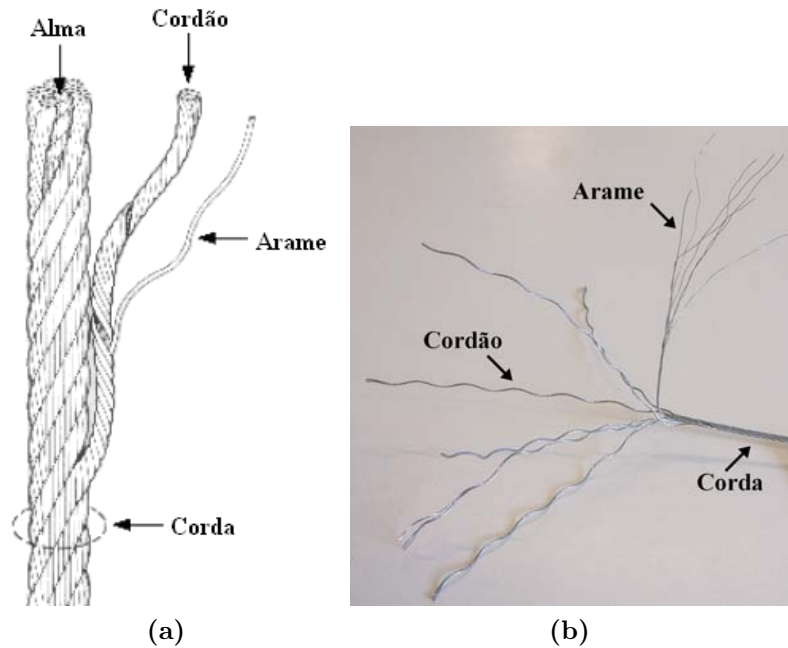


Figura 3.3.: Constituintes de uma corda de aço.

é feita a partir de vários arames de aço ou de vários cordões¹. Estes arames são a essência de um *cabo* pois são eles que suportam a carga a que este é sujeito. Veja-se a Figura 3.3 para se ter uma melhor noção destes elementos.

A construção de uma corda de aço depende de inúmeras variáveis tais como o material e o acabamento do arame, a secção do arame e/ou dos cordões, a alma da corda e/ou cordões (metálica ou em fibra) e ainda o tipo de enrolamento dos cordões e/ou da corda. Um estudo exaustivo de todas estas variáveis seria interessante embora muito moroso. Para mais informações sobre estes parâmetros recomenda-se a leitura da norma portuguesa NP-1843 disponível no Anexo A.

Como não foi possível estudar todas as variáveis referidas devido à sua elevada variedade, seleccionaram-se dois tipos de corda usados com maior frequência pela *Fico Cables, Lda.*: uma 1x19 (uma corda composta por 19 arames entrançados) e uma 7x7 (uma corda composta por 7 cordões, cada um destes composto por 7 arames), ambas em aço galvanizado. Na Figura 3.4 é possível ver a sua secção entre outras configurações comuns enquanto no Anexo B é apresentado a informação técnica destes dois elementos².

¹Um cordão é uma pequena corda de arames que por sua vez é entrançada formando uma corda principal

²O desenho relativo à corda 1x19 no anexo tem a referência CA120291 e não a CA19G00120A do tipo utilizado. Contudo, ambas são muito semelhantes e permite uma análise com detalhe do componente do cabo.

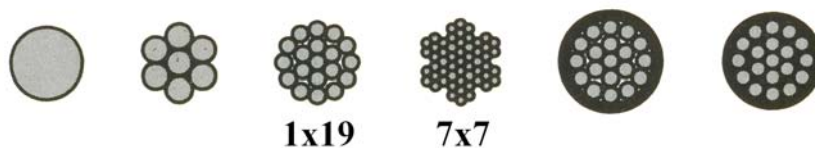


Figura 3.4.: Enquadramento dos tipos de enrolamento das cordas estudadas entre outras secções comuns.

Para os tipos de corda de aço referidos, foi medido o seu peso tendo-se obtido cerca de $8g/m$ para a corda $1x19$ e $7g/m$ para a $7x7$. Como se pode observar, trata-se de um elemento bastante leve tendo em conta que a maioria dos ensaios realizados foram com cabos com menos de $1m$ de comprimento.

3.1.2. Bainha

A bainha é um tubo feito num material polimérico que separa a corda da espiral de aço evitando assim o seu contacto que, caso ocorrê-se, seria extremamente prejudicial tanto a nível de atrito como de desgaste das partes. A bainha é, assim, um dos intervenientes principais no estudo realizado na medida em que o coeficiente de atrito analisado é entre esta e a corda.

Neste trabalho foram analisadas bainhas de dois materiais: uma em polioximetileno copolímero (POM) e outra em polietileno de alta densidade (PEHD) cujas especificações técnicas são apresentadas no Anexo C³.

3.1.3. Espiral de Aço

A espiral de aço é o componente que dá maior robustez e rigidez ao cabo e funciona como elemento protector dos componentes interiores na medida em que os protege de contactos externos e deformações excessivas garantindo o bom desempenho global do cabo.

Existem dois tipos de espiral usadas neste tipo de aplicação: de arame normal e de arame laminado. Porém, só o segundo tipo foi considerado nos ensaios realizados não tendo sido esta uma variável a considerar.

O desenho técnico deste componente encontra-se disponível no Anexo D.

³O desenho relativo à bainha *PEHD* é referente ao modelo *TB1EN00251*, um modelo anterior ao *TB1EN00250C* utilizado nos ensaios.



Figura 3.5.: Terminais aplicados às cordas de aço dos cabos utilizados: a) Terminal de cabo Zamak; b) Terminal de cabo olhal.

3.1.4. Revestimento

O revestimento exterior é uma pequena película em PVC que serve principalmente para prevenir a contaminação e oxidação dos restantes elementos do cabo.

3.1.5. Terminais

Os terminais dos cabos são pequenos acessórios que servem para de algum modo ligar ou conectar o cabo a outros elementos. Existe uma grande variedade de terminais mas os cabos recebidos, para que possam ser montados na máquina de ensaios, possuem dois terminais específicos: um denominado por Zamak (Figura 3.5a) que apoia na célula de carga fixa ao cilindro e um olhal (Figura 3.5b) onde é suspensa a segunda célula de carga.

3.2. Máquina

Para a realização dos ensaios de medição do coeficiente de atrito foi especificamente desenvolvido e fabricado pela empresa *Fico Cables, Lda.* o banco de ensaios apresentado na Figura 3.6. Este sistema actuador de cabos, permite fixar um cabo numa determinada posição e, após aplicação de uma determinada carga resistente, traccionar o cabo ao longo de 50mm de curso e medir a força necessária para elevar essa carga. A Figura 3.6 mostra a máquina em questão onde é possível observar os seus diferentes componentes que a constituem e descritos em detalhe nas secções seguintes.

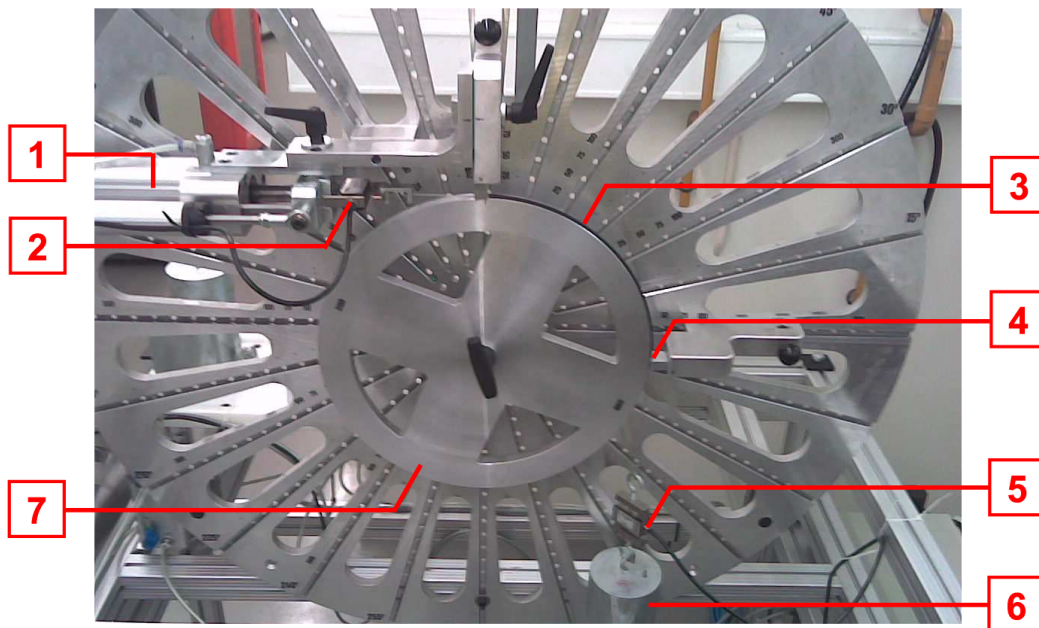


Figura 3.6.: Banco de Ensaio. 1) Cilindro Pneumático; 2) Célula de Carga 1; 3) Cabo; 4) Suporte de cabos; 5) Célula de Carga 2; 6) Peso; 7) Disco de apoio.

3.2.1. Disco Estrutural de Apoio

Este elemento da máquina é, na realidade, parte da sua estrutura. A sua função é servir de apoio aos restantes componentes de forma a que estes definam o *lay-out* pretendido. Graças aos inúmeros furos que este possui, é possível “desenhar” arcos de círculo de 15 em 15° com raios até 300mm em intervalos de 25mm. Na realidade, montagens com ângulos compreendidos entre 225 e 360° não são possíveis conforme mostrado na Figura 3.7. Como se pode observar, acima de 225° o movimento do cilindro interfere com o peso resistente impedindo a realização do ensaio. Entenda-se que esta limitação não impede a realização de ensaios com ângulos de 360° ou superiores já que a sua montagem é semelhante à de 0° ou equivalente.

3.2.2. Cilindro Pneumático

O elemento actuador da banca de ensaios é um cilindro DNC, da *Festo*, de dupla acção com amortecimento regulável (PPV) nas posições finais, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 3.1. Neste caso, o movimento motor da máquina, ou seja, quando puxa o cabo, ocorre no movimento de recuo do cilindro e, por isso, para uma pressão na rede de ar comprimido de 6bar, o cilindro consegue desenvolver uma força máxima de 990N. Inicialmente, o accionamento do cilindro era feito exclusivamente por ar comprimido, e a sua resposta dinâmica era pouco estável, não sendo possível gerar um movimento suave e uniforme. Para uniformizar o movimento do cilindro, optou-se por alimentar uma das câmaras com óleo de

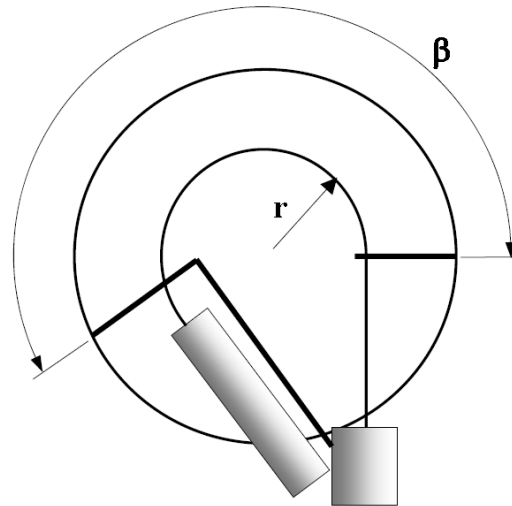


Figura 3.7.: Limitação do sistema para ensaios com ângulos compreendidos entre 235 e 360° .

modo a que houvesse algum amortecimento. Esta solução mostrou-se bastante razoável quanto à estabilidade do sistema mas, quando se realizaram ensaios mais exigentes, verificou-se que a força máxima que o cilindro conseguia desenvolver não eram os 990N anunciados pelo fabricante mas sim de apenas 210N, aproximadamente. Este valor deve-se à afinação dos estranguladores de caudal do cilindro que foram feitas no início do projecto e que foram mantidas mesmo quando se detectou este problema de modo a manter-se coerência nos ensaios realizados. Este tipo de estrangulador interno do cilindro não são recomendáveis na medida em que regulam/limitam o caudal tanto na entrada como na saída da câmara. Uma melhor solução é apresentada na Figura 3.8 que representa um estrangulador de caudal à entrada de fluido nas câmaras mas possui um *by-pass* que permite o caudal fluir sem resistência no ramal de saída.

Para permitir a leitura da posição do cilindro, foi instalado um transdutor de deslocamento linear LVDT de 50mm.

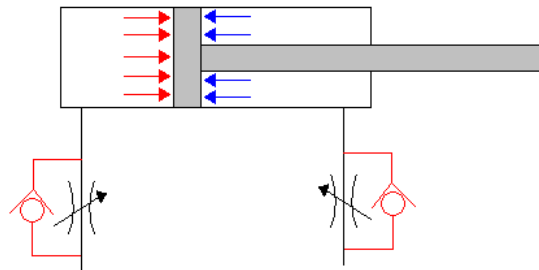


Figura 3.8.: Solução sugerida para aumentar a força máxima do cilindro.

Tabela 3.1.: Características técnicas do Cilindro Pneumático de accionamento.

Tipo de accionamento	ar comprimido filtrado, com ou sem lubrificação			
Elemento de accionamento	cilindro com êmbolo			
Pressão máxima de trabalho	10 <i>bar</i>			
Faixa de temperatura	−20 a +80°C			
Materiais	cabeçotes: alumínio injectado Si 12; camisa do cilindro: alumínio anodizado; haste: aço cromo (X20 Cr 13); execução R3: X6 CrNiMoTi 17 12 2; gaxetas: poliuretano.			
Força transversal FQ admitida na haste	160N			
ϕ do cilindro [mm]	Curso [mm]	Força de avanço 6bar* [N]	Força de retorno 6bar* [N]	Conexão
50	50	1178	990	G 1/4

3.2.3. Células de Carga

As células de carga são o elemento de leitura dos valores das forças envolvidas. O banco de ensaios necessita de duas destas células: uma para medir a força realizada ao puxar o cabo e outra para medir a força resistente. Na realidade, esta segunda é dispensável se for conhecido o peso resistente aplicado mas, por outro lado, é uma referência para a outra célula pois permite, por exemplo, estimar as suas flutuações de medição.

Assim, é necessário instalar uma célula de carga em cada extremidade do cabo. Enquanto uma se encontra encastrada no cilindro – Célula 1 – a outra serve de ligação entre o cabo e o peso resistente aplicado – Célula 2.

Estas células de carga da *Scaime* (ver Figura 3.9) têm as propriedades da Tabela 3.2 e trabalham tanto à tracção como à compressão. É aliado a esta propriedade e às suas dimensões e densidade que estas apresentam um inconveniente que se poderia tornar crasso caso não fosse tido em consideração: as células de carga medem-se a elas próprias. Isto é, excepto quando na posição horizontal, as células medem o seu próprio peso mesmo quando não têm nenhuma outra carga aplicada. Por este motivo, foi necessário introduzir um termo de correcção na formulação do modelo da máquina que será explicado com mais detalhe no Capítulo 4.

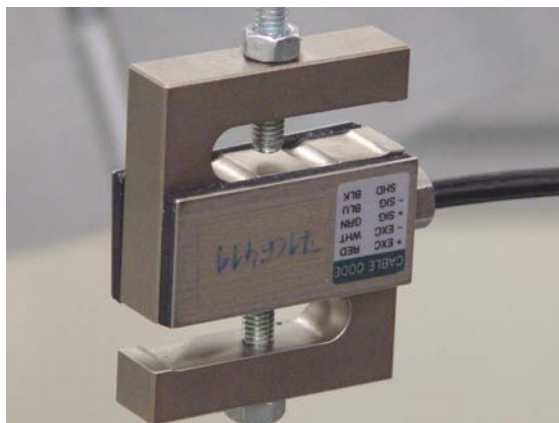


Figura 3.9.: Célula de carga.

Tabela 3.2.: Características das Células de Carga.

<i>Metrológicas</i>		
Capacidade Nominal (Cn)	50	kg
Erro combinado	$\pm 0,03$	$\%Cn$
Efeito da temperatura sobre o zero	$\pm 0,002$	$\%Cn/^{\circ}C$
Efeito da temperatura sobre a sensibilidade	$\pm 0,002$	$\%Cn/^{\circ}C$
<i>Eléctricas</i>		
Gama nominal de tensão de alimentação	1 ... 15	V
Sensibilidade nominal (à Cn)	$3 \pm 0.5\%$	mV/V
Resistência de entrada/saída	$385 \pm 10 / 350 \pm 5$	Ω
Resistência de isolamento	> 2000	$M\Omega/50V$
<i>Gerais</i>		
Gama de temperatura compensada	$-10 \dots + 50$	$^{\circ}C$
Gama de temperatura de funcionamento	$-20 \dots + 60$	$^{\circ}C$
Carga limite admissível	120	$\%Cn$
Carga de cedência	150	$\%Cn$
Classe de protecção	IP65	EN 60529
Material	Aço niquelado	
Comprimento do cabo	5	m



Figura 3.10.: Discos de apoio da máquina de ensaios.

3.2.4. Discos de Apoio

Quando os cabos são solicitados, principalmente por cargas elevadas, e estes se encontram apoiados apenas nas extremidades, a sua geometria altera-se ligeiramente nem que seja apenas com uma pequena vibração durante a inversão do movimento. Para que seja possível estudar se esta vibração influencia ou não o desempenho do cabo, realizaram-se ensaios totalmente apoiados. Para isso é possível utilizar uns discos com umas calhas onde o cabo fica apoiado de forma justa. Desta forma garante-se uma geometria constante durante o ensaio que é o mesmo que dizer, um raio constante.

Cada disco tem duas calhas, uma com um diâmetro de 5 e outra com 6mm de modo a que seja possível apoiar ambos os tipos de cabo. Por outro lado, cada disco de apoio tem um dado diâmetro o qual, como é óbvio, não pode variar. É por isso necessário um disco diferente para geometrias com raio diferentes. Embora limitados, considera-se suficiente dentro da capacidade da máquina a quantidade de discos de apoio disponíveis cujos diâmetros são 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 e 300 conforme se pode observar na Figura 3.10.

3.2.5. Suporte de Cabos

Para apoiar a espiral metálica dos cabos de modo a que esta não influencie o ensaio, existem uns pequenos suportes específicos para cada um dos *lay-outs*. Assim, para realizar um ensaio, são necessários dois suportes, um para cada extremidade do cabo. Por outro lado, para cada *lay-out* diferente são necessários dois tipos de suportes diferentes, um para ensaios apoiados e outro para não-apoiados pois



Figura 3.11.: Suportes de cabos.

na primeira situação, a rodela de apoio serve como “meio”-suporte do cabo. Isto verifica-se mesmo em casos específicos em que só é necessário um suporte para realizar o ensaio como, por exemplo, no caso de 360° em que o cabo sai e entra pelo mesmo suporte. A Figura 3.11 mostra os diferentes suportes utilizados. Repare-se que excepto para o caso do ensaio a 360° (suportes maiores) todos os outros têm dois furos. Tal deve-se à possibilidade de fazer ensaios com cabos de 5 e de 6 mm de diâmetro embora só tenham sido estudados os do primeiro tipo. Os quatro suportes do lado direito da Figura 3.11 foram feitos durante o decorrer do projecto e os seus desenhos de construção encontram-se no Anexo E. A necessidade da sua produção deveu-se à incorrecta construção dos suportes fornecidos para ensaios a 360° e à inexistência de suportes capazes de realizar ensaios a 540° apoiados.

3.2.6. Pesos

Para controlar a carga resistente aplicada existem diferentes pesos (Figura 3.12) cujos valores são apresentados na Tabela 3.3. A sua selecção teve em conta as cargas verificadas nas aplicações da *Fico Cables, Lda.* e não nas propriedades mecânicas do cabo, capazes de suportar cargas bastante mais elevadas.



Figura 3.12.: Pesos disponíveis.

Tabela 3.3.: Massas e respectivos pesos das cargas resistentes disponíveis.

Ref.	Massa [g]	Peso [N]
1	104	1,02
10	1028	10,07
20	2037	19,96
30	3070	30,09
40	4089	40,07
50	5105	50,03
75	7664	75,11
100	10238	100,33

Estes pesos são suspensos na Célula de Carga 2 e a sua utilização obriga a que a montagem desta célula de carga seja sempre na vertical para o seu correcto funcionamento.

3.2.7. Módulo de Aquisição

A máquina tem ainda um módulo de aquisição de sinal onde é feito todo o seu controlo desde um *power switch* a um *auto/manual switch* e uma botoneira para actuação manual do cilindro. É também a partir deste módulo que é feito o controlo da electro-válvula que controla o movimento do cilindro e de onde são enviados os sinais do LVDT e das células de carga para um computador que possui um *software* onde faz o seu processamento.

3.3. Software *Cable Test System*

Como interface entre a máquina e o utilizador, existe um *software* que permite a leitura dos dados do ensaio e o seu registo. Após a correcção de alguns *bugs*, este *software* mostrou-se estável e capaz de uma correcta monitorização em tempo real dos valores das células de carga e da posição do cilindro. Estes valores são registados em três ficheiros por ensaio: enquanto um deles regista as forças médias de cada ciclo, os outros dois registam as variáveis *Tempo*, *Deslocamento*, *Força 1* e *Força 2* em intervalos de deslocamento especificado pelo utilizador para todos os ciclos, um para o movimento ascendente e outro para o descendente.

Porém, como este *software* não faz o pós-processamento dos resultados, foi necessário criar um outro programa para essa função que será explicado com maior detalhe na secção seguinte.

O *software Cable Test System* disponibiliza quatro interfaces, cada uma delas com funções diferentes:

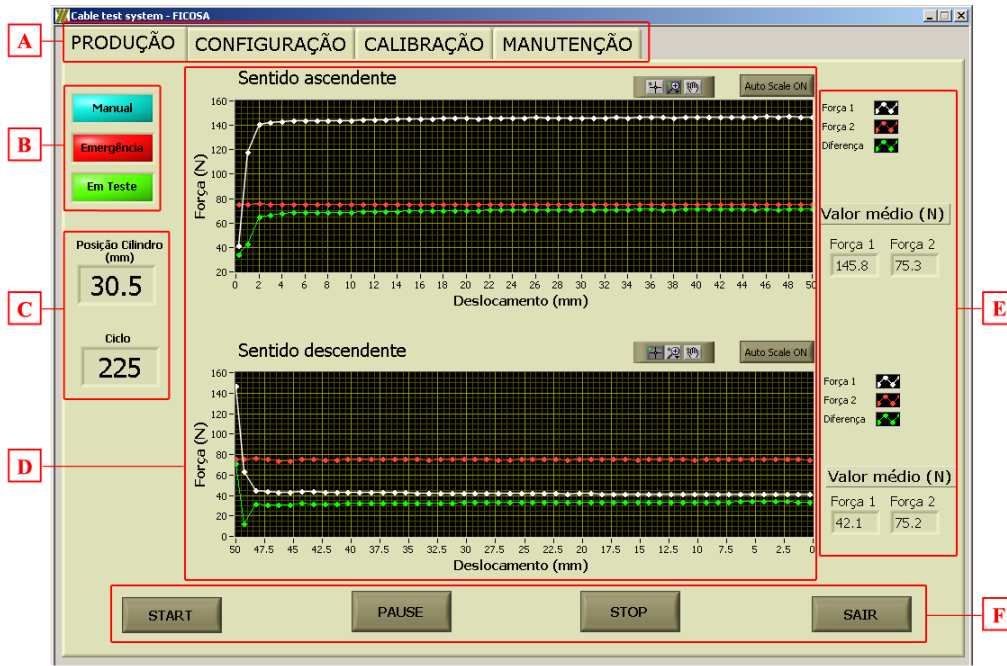


Figura 3.13.: Interface *Produção* do software da máquina *Cable Test System*.

1. *Produção* – é a interface principal do programa. Permite visualizar em tempo real os valores das diferentes variáveis e representa graficamente esses valores;
2. *Configuração* – permite configurar o ensaio a ser realizado;
3. *Calibração* – permite calibrar os componentes da máquina com o software;
4. *Manutenção* – permite visualizar os valores das células em *Volt* e controlar o cilindro manualmente.

3.3.1. *Produção*

É a interface principal do programa. Quando o utilizador inicia o *software* é esta a janela que surge no ecrã embora o mais correcto fosse a janela de *Configuração* pois é sempre necessário configurar o ensaio a realizar. Conforme se pode ver na Figura 3.13, esta interface contém vários painéis com funções diferentes. No nível superior tem-se as etiquetas de selecção das diferentes interfaces (painel A). Esta zona é comum às quatro janelas com que o utilizador pode interagir.

Do lado esquerdo existem três *displays* (painel B) que indicam informação sobre o estado da máquina e do ensaio e podem apresentar as mensagens “Manual”, “Emergência” e “Em Teste” seguido de outros dois *displays* (painel C) que indicam a posição do cilindro em tempo real e do ciclo que está a ser realizado nesse momento.

3. Materiais e Configurações

Na zona central da janela é possível visualizar graficamente os valores de ambas as células de carga e a sua diferença no último movimento ascendente e descendente (painel *D*). É possível alterar as escalas destes gráficos recorrendo às ferramentas disponíveis no canto superior direito de cada um deles.

Por último, do lado direito apresenta-se, para além da legenda dos gráficos, os valores médios respectivos do ciclo representado nos gráficos de ambas as células de carga (painel *E*) enquanto que na zona inferior existem quatro botões que permitem controlar o ensaio (painel *F*). O primeiro, da esquerda para a direita, inicia o ensaio pedindo primeiro para escolher o directório onde devem ser guardados os ficheiros de resultados e o seu nome. O segundo e o terceiro permitem, respectivamente, criar uma pausa no ensaio ou interrompe-lo definitivamente enquanto que o quarto e último botão, presente em todas as interfaces, permite sair do programa.

3.3.2. Configuração

Antes de se iniciar um ensaio é necessário configurá-lo. Para tal pode-se, através desta interface, controlar alguns parâmetros tais como o número de ciclos e a quantidade de valores a desprezar no cálculo da média das forças. Repare-se na Figura 3.14. Para além das etiquetas na zona superior tal como na interface *Produção*, existem três zonas principais. A primeira delas e talvez a mais interessante, permite controlar um parâmetro essencial dos ensaios: o número de ciclos (painel *G*). Para além disso permite também alterar o intervalo de medição da posição do cilindro, o tempo de pausa entre inversão de sentido de movimento e a periodicidade. Normalmente os seus valores predefinidos são os aconselhados a utilizar com excepção do número de ciclos.

A segunda zona (painel *H*) permite regular a percentagem dos valores lidos para o cálculo dos valores médios. Isto é útil na medida em que é possível ignorar os efeitos dinâmicos devido ao coeficiente de atrito estático no início de cada movimento aos quais correspondem valores diferentes dos verificados no resto do ciclo.

Por último tem-se o conjunto de botões do lado direito (painel *I*) que permite guardar uma configuração para uso futuro e, da mesma forma, abrir uma configuração que já tenha sido guardada. Contudo o programa ainda apresenta alguns problemas com estas funcionalidades bem como com o botão da ajuda.

3.3.3. Calibração

Para haver uma correcta interpretação dos valores das células de carga e do cilindro pelo *software*, é necessário fazer uma calibração do sistema antes de este poder ser utilizado. A calibração não é um procedimento muito expedito devido ao facto de ser necessário calibrar ambas as células de carga ao mesmo tempo e também, como

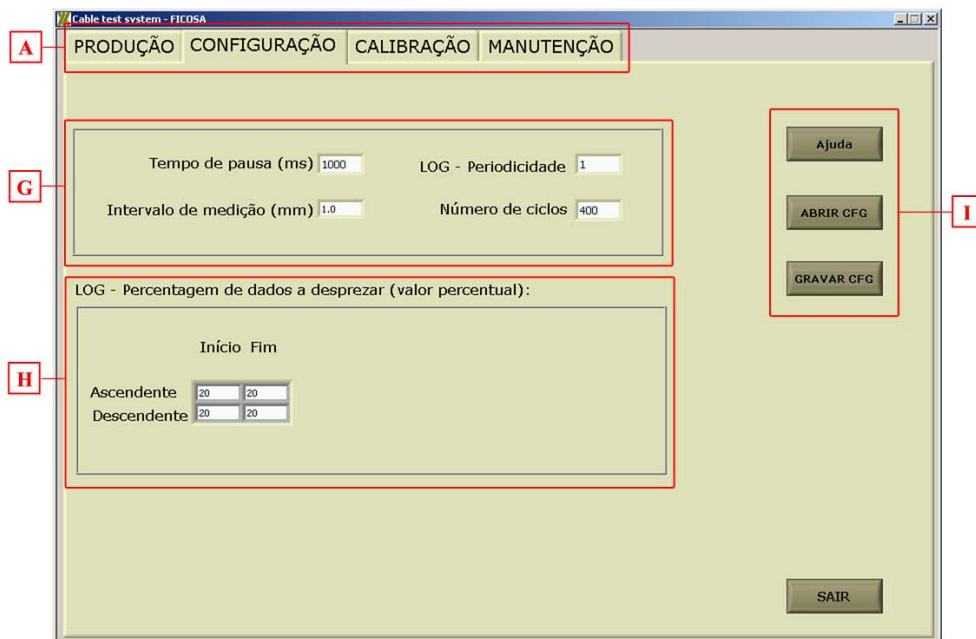


Figura 3.14.: Interface *Configuração* do *software* da máquina *Cable Test System*.

já foi referido, a estas se medirem a si próprias.

De forma a tornar a sua explicação o mais simples possível, enumeram-se aqui os vários passos necessários para a sua realização, primeiro para as células de carga e de seguida para o cilindro pneumático.

Células de Carga

O procedimento de calibração passa por definir dois pontos de referência cujos valores sejam conhecidos de modo a que o sistema trace uma recta de calibração que vai usar durante as medições. Para isso, os pontos extremos, máximo e mínimo, costumam ser os recomendados.

É assim necessário realizar a calibração em duas etapas, uma para cada ponto da calibração. Para isso, utiliza-se o painel *J* indicado na Figura 3.15, que permite realizar este procedimento em seis etapas descritas em pormenor de seguida:

- **Ponto 0:** Definição dos pontos de calibração da máquina. Por predefinição, os pontos utilizados são o de $0N$ e $100N$ porém estes podem ser alterados recorrendo aos botões “Mudar $0N$ ” e “Mudar $100N$ ”. Relativamente ao primeiro não há dificuldade pois só é necessário garantir que as células estejam sem

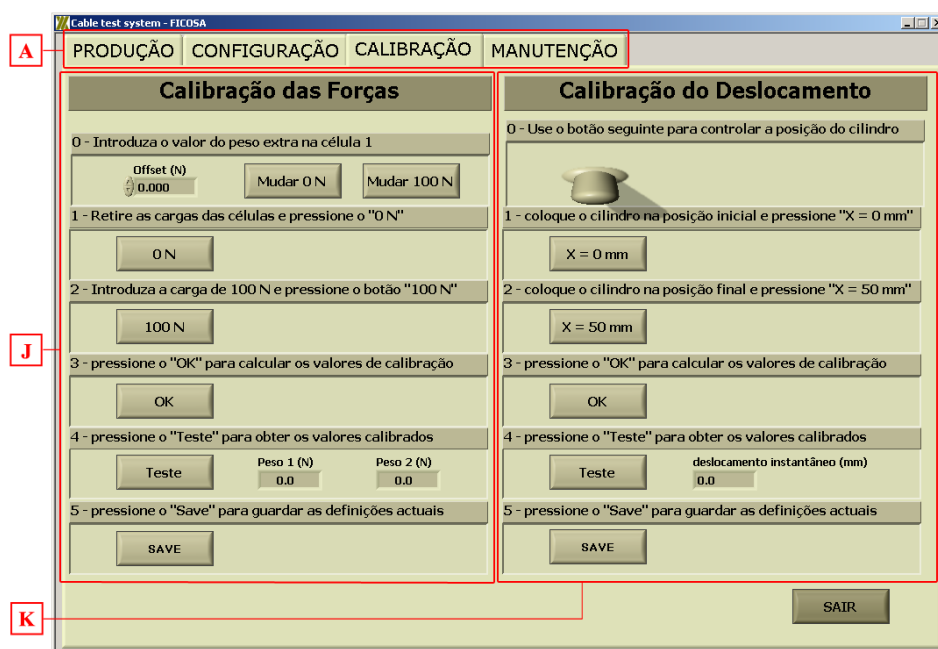


Figura 3.15.: Interface *Calibração* do software da máquina *Cable Test System*.

qualquer carga aplicada. Quanto ao segundo, se se reparar na Tabela 3.3, o peso de 100N tem, na realidade, 100,33N. Para a obtenção de um maior rigor, é recomendado a alteração para este valor utilizando o botão “Mudar 100N”.

Quanto ao valor e significado do *offset*, talvez seja mais claro a sua explicação um pouco mais à frente mas a sua introdução deve ser feita nesta altura do processo de calibração;

- **Ponto 1:** Definição do primeiro ponto da recta de calibração das células de carga. Para tal, ambas as células têm de estar sem carga quando se realizar este passo. Porém isso não é condição suficiente. Como foi dito, a célula mede-se a si mesma e por isso, mesmo sem nenhum peso aplicado, caso ela esteja suspensa ou apoiada na vertical, ela sofre, respectivamente, uma tracção ou uma compressão devido ao seu próprio peso. Para que as células estejam realmente a carga nula têm de estar na horizontal, preferencialmente pousadas de modo a que não estejam sujeitas a deformação. Ora, para evitar a desmontagem da Célula de Carga 1 do cilindro, pode-se montar este a 90° conforme apresentado na Figura 3.16a, garantindo assim a horizontalidade da célula embora, devido à flexão a que a esta fica sujeita, há sempre um pequeno erro introduzido nesta montagem. Quanto à Célula de Carga 2, esta pode ser pousada na horizontal sem dificuldade garantindo-se assim a total ausência de deformação. Desta forma garante-se que as células estão isentas de qualquer deformação logo, ausentes de carga.

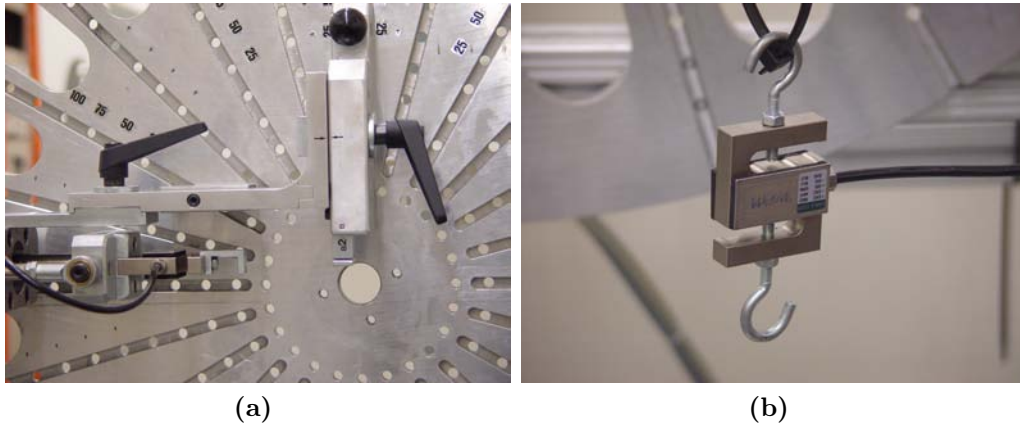


Figura 3.16.: a) Posicionamento do cilindro para a calibração da Célula de Carga 1 no ponto de carga nula; b) Posicionamento da Célula de Carga 2, suspensa, para a calibração do ponto de carga nula.

Embora possa parecer um contra-senso, recomenda-se a calibração da Célula de Carga 2 suspensa na vertical conforme mostrado na Figura 3.16b. Na realidade, como esta célula vai suportar o peso, independentemente do tipo de *lay-out* do ensaio, ela tem de estar sempre na mesma posição: suspensa na vertical. Desta forma garante-se que o valor medido por esta célula corresponde ao valor do peso introduzido. Porém, quando a definição do modelo da máquina, há que ter em atenção a introdução do seu peso que é conhecido e não varia.

Para definir o primeiro ponto da recta de calibração deve-se pressionar o botão “0N” com as respectivas células de carga nas posições mencionadas.

- **Ponto 2:** Definição do segundo ponto da recta de calibração das células de carga. Para realizar este passo no procedimento da calibração das células de carga, é necessário fazer uma montagem específica conforme representado no esquema da Figura 3.17a e na ilustração da Figura 3.17b. Estas duas Figuras representam o Cilindro Pneumático (CP) montado na vertical, a 0° , com a sua célula de carga fixa (C1) onde é suspenso um cabo cujo peso seja conhecido que, por sua vez, sustenta a Célula de Carga 2 (C2) e esta o peso de 100N (M). No fundo é uma montagem normal, a 0° , sem os suportes dos cabos.

Conhecidos os pesos de todos os componentes na montagem, pode-se determinar os valores que cada célula lê. Assim, tendo em conta que o zero da Célula de Carga 2 foi também definido nesta posição, o acréscimo de carga é o correspondente ao peso aplicado, ou seja, 100,33N. Quanto à Célula de Carga 1,

3. Materiais e Configurações

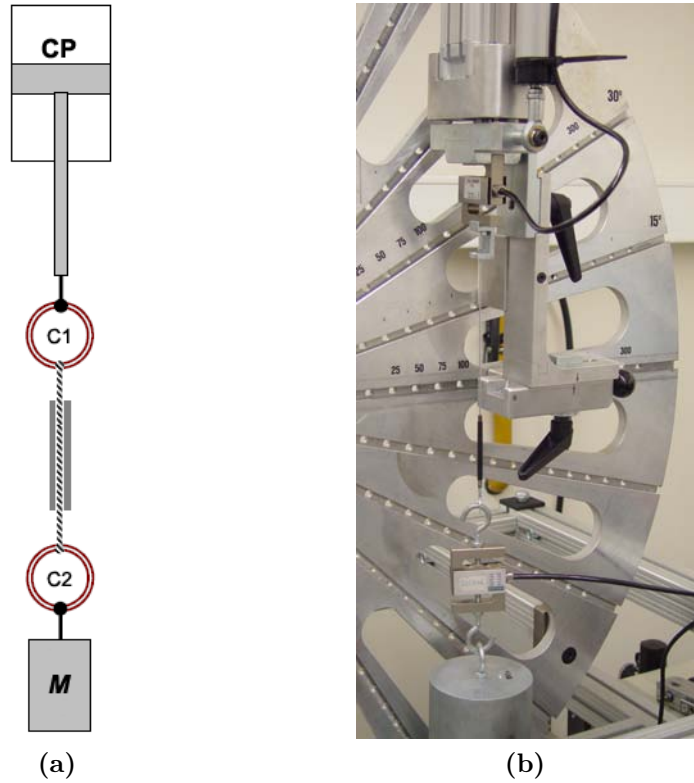


Figura 3.17.: a) Esquema da montagem para definir o segundo ponto de calibração;
b) Fotografia da montagem para definir o segundo ponto de calibração.

como foi definido anteriormente o zero real da célula, agora é necessário contabilizar o efeito do seu próprio peso para além dos restantes componentes. Assim vem que

$$\text{Peso na Célula de Carga 1} = \frac{1}{2} \cdot \text{Peso}_{C1} + \text{Peso}_{\text{cabo}} + \text{Peso}_{C2} + \text{Peso}_M \quad (3.1)$$

ou seja, para um cabo com $209mm$ de comprimento que pesa $18,3g$

$$\begin{aligned} \text{Peso na Célula de Carga 1} &= 1,44 + 0,18 + 2,47 + 100,33 = \\ &= 104,42N \end{aligned} \quad (3.2)$$

Este é o valor medido pela Célula de Carga 1. Assim, a diferença de pesos entre esta célula e a Célula de Carga 2 é o chamado *offset* e é igual a

$$\begin{aligned} \text{offset} &= \text{Peso na Célula de Carga 1} - \text{Peso na Célula de Carga 2} = \\ &= 104,42 - 100,33 \\ &= 4,09N \end{aligned} \quad (3.3)$$

Este *offset*, conforme referido anteriormente, deve ser introduzido no ponto 0 do painel *J*, no início da calibração e, conforme demonstrado, desde que conhecido o peso do cabo e dos restantes componente, é facilmente calculado. A necessidade da sua utilização deve-se ao facto de se fazer a calibração de ambas as células ao mesmo tempo tal como já foi mencionado.

Resumindo, após a realização da montagem apresentada nas Figuras 3.17a e 3.17b, pressiona-se o botão “100N” para definir o segundo e último ponto de calibração;

- **Ponto 3:** Cálculo da recta de calibração. Após a definição dos dois pontos de calibração é necessário dar instrução ao *software* para calcular a recta de calibração que vai ser usada qualquer que seja a carga introduzida no ensaio. Para isso basta pressionar o botão “OK” neste ponto do painel *J*;
- **Ponto 4:** Verificação da calibração. Neste ponto é possível visualizar em tempo real o valor das células de carga de modo a verificar se a calibração foi correctamente realizada observando os valores das células de carga para diferentes cargas. Verificou-se que realizar a calibração com esta função accionada não cria qualquer tipo de problema por isso, se o utilizador assim preferir, pode realizar todo o procedimento de calibração com esta função activa;
- **Ponto 5:** Salvar a calibração. Resta por fim guardar as definições para que estas sejam carregadas no arranque do *software*. Para isso basta premir o botão “*Salvar*” neste ponto do painel *J*.

Embora não seja especificado no *software*, aconselha-se o reiniciar do programa antes de realizar qualquer ensaio e voltar a verificar através da opção do ponto 4, os valores das células de carga em várias posições conhecidas.

Cilindro Pneumático

A calibração do Cilindro Pneumático é bastante mais simples na medida em que este não depende da montagem ou orientação como acontecia com as células de carga. Para executar este procedimento recorre-se ao painel *K* assinalado na Figura 3.15.

- **Ponto 0:** Controlo manual do cilindro. Para se poder controlar a posição do cilindro é necessário alterar o *switch* do módulo de aquisição da máquina para *manual*. Assim, é possível seleccionar o sentido do movimento recorrendo ao botão disponível no painel *K*;
- **Ponto 1:** Definição do início de curso. Tal como foi feito para as células de carga, tem-se que definir os dois pontos extremos da recta de calibração. Assim, neste caso, o ponto de deslocamento correspondente a $0mm$ é quando o cilindro se encontra avançado, ou seja, em repouso. Após a certificação de que este se encontra nesta posição, pressiona-se o botão “ $X = 0mm$ ”;

3. Materiais e Configurações

- **Ponto 2:** Definição do fim de curso. Para definir o outro ponto de calibração é apenas necessário pressionar o botão que controla a posição do cilindro no ponto 0 e esperar que este atinja o seu fim de curso. Com o cilindro nessa posição, premi-se o botão “ $X = 50mm$ ”;
- **Ponto 3:** Cálculo da recta de calibração. Após a definição dos dois pontos de calibração, pressiona-se “OK” para o programa definir a recta de calibração;
- **Ponto 4:** Verificação da calibração. Tal como na calibração das células de carga, também aqui é possível pré-visualizar o valor do deslocamento do cilindro de modo a verificar se a calibração está bem definida. Também aqui pode-se manter esta opção activa durante o decorrer do procedimento se assim se achar conveniente;
- **Ponto 5:** Salvar a calibração. Por último resta guardar as definições e, tal como recomendado para as células de carga, também aqui se sugere o reinício do programa.

3.3.4. Manutenção

Esta interface tem mais interesse na óptica do programador do que na do utilizador na medida em que a informação prestada por esta não acrescenta informação em termos de resultados mas permite saber como está a ser feita a interpretação do sinal dos diferentes componentes da máquina.



Figura 3.18.: Interface *Manutenção* do software da máquina *Cable Test System*.

3.4. Software *Matlab*

Numa fase inicial deste projecto foi utilizada uma folha de cálculo para analisar os ficheiros de resultados obtidos porém, com o aumento de dados e devido à facilidade de se cometerem erros com este tipo de solução, optou-se por criar um programa em *Matlab* mais versátil e com mais rigor de cálculo. Para facilitar a sua utilização recorreu-se ao uso de interfaces *GUI* ao invés da habitual linha de comandos. Este *software* sofreu uma constante evolução estando presentemente apto a tratar praticamente qualquer tipo de ficheiro de resultados embora ainda apresente alguns *bugs* cujas correcções são, de uma maneira geral, simples. O seu código é apresentado no Anexo K apenas disponível em formato digital.

Também este *software* é composto por quatro interfaces com as quais o utilizador pode trabalhar. A sua explicação detalhada é feita de seguida à semelhança do realizado na secção anterior.

3.4.1. *SimCable2*

Quando se arranca o programa, entra-se directamente na janela principal onde irão ser apresentados os valores das forças motoras e resistentes e dos coeficientes de atrito entre outras informações. Na Figura 3.19 é possível visualizar o seu aspecto mas tenha-se em atenção que, ao arrancar o programa, não existem quaisquer valores ou gráficos apresentados.

Repare-se porém nos dois valores apresentados na zona superior. Estes estão sempre presentes e correspondem respectivamente aos valores dos pesos da Célula de Carga 1 (*PC1*) e Célula de Carga 2 (*PC2*). Imediatamente abaixo do peso da primeira das células referidas existe uma caixa de texto. Esta serve para introduzir o valor do ângulo do ensaio, informação necessária para fazer o pós-processamento dos resultados obtidos no ensaio.

Para seleccionar o ficheiro de resultados a analisar escolhe-se a opção *Open File* e surgirá uma janela de navegação onde é possível procurar o ficheiro pretendido. O ficheiro a seleccionar de um determinado ensaio deve ser o das forças médias dos três disponíveis. Repare-se que após a sua selecção o seu nome surge na janela de *Status*, abaixo dos botões, e abaixo deste, a data em que foi realizado o respectivo ensaio.

O próximo passo será a selecção da opção *Cycle Dynamic* fazendo aparecer uma nova janela com outra interface. Esta será explicada em detalhe na próxima secção não apresentando grande dificuldade no seu domínio.

Após voltar à interface principal, o programa está apto a determinar os coeficientes de atrito médios, as forças de atrito e também as forças motoras e resistentes.

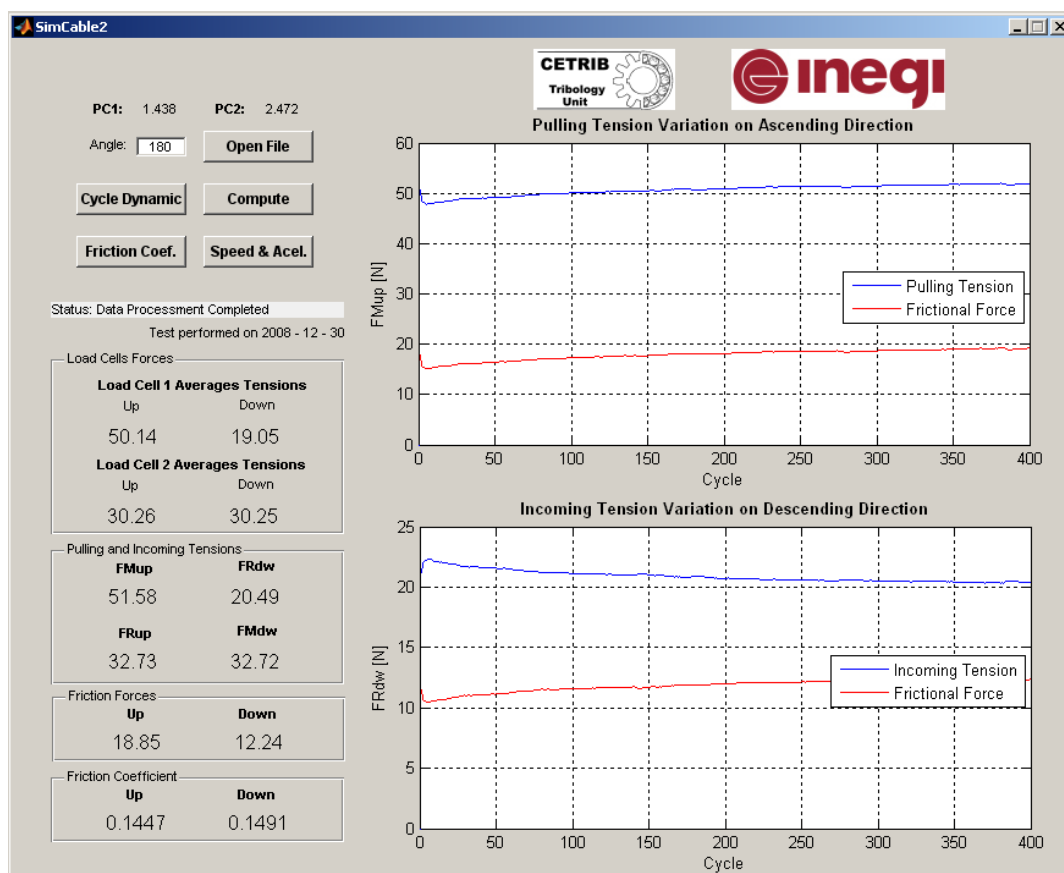


Figura 3.19.: Interface principal do programa *SimCable*.

Para tal basta pressionar o botão *Compute* e esperar pelo primeiro gráfico. Este gráfico representa a evolução da Força Motora média de cada ciclo, ao longo dos vários ciclos do ensaio, para o movimento ascendente. Nesta altura o programa está em *Stand-By*, à espera que o utilizador selecione o intervalo de ciclos que quer considerar para a determinação dos valores finais. Para isso basta clicar com o rato no valor inicial e final pretendidos. A partir daqui o programa retoma o processamento de dados e apresentará os resultados finais.

3.4.2. *Cycle Dynamic*

Conforme referido atrás, antes de o programa poder determinar os valores finais, é necessário vir a esta secção (ver Figura 3.20).

Como foi referido na Secção 3.3.2, o *software* da máquina permite seleccionar a quantidade de pontos de cada ciclo a desprezar no cálculo dos valores médios das forças. Ora nem todos os ensaios são iguais e enquanto uns estabilizam rapidamente, outros chegam a precisar de mais de 25mm de curso até o fazerem. Assim, é difícil saber a quantidade de dados que devem ser desprezáveis antes de iniciar o

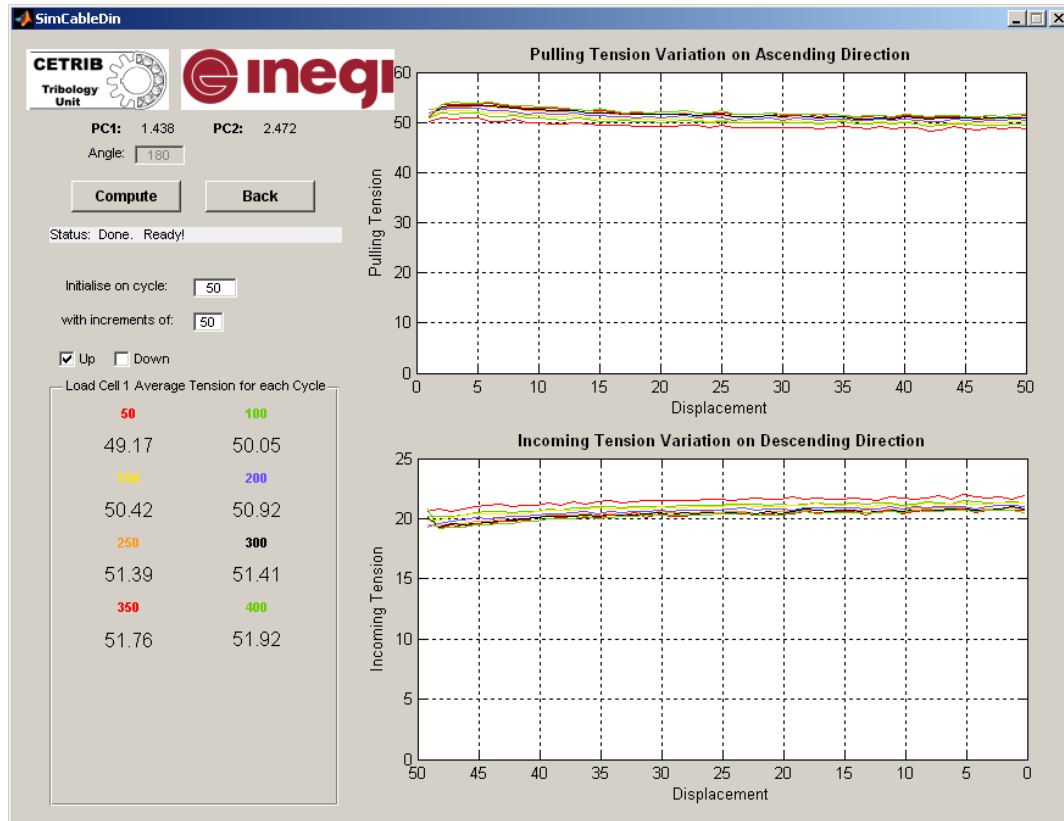


Figura 3.20.: Interface *Cycle Dynamic* do programa *SimCable*.

ensaio. Como todos os valores ficam registados nos dois ficheiros relativos ao movimento ascendente e descendente, este *software* representa-os todos graficamente permitindo o utilizador seleccionar com o rato a zona estável do ensaio que deverá ser considerada na determinação das forças médias de cada ciclo, ou seja, este *software* não recorre ao ficheiro de valores médios pois ele recalcula esses valores.

Por predefinição, são representados os ciclos 50, 100, 150, ... embora estes valores possam ser alterados ao gosto do utilizador. Porém o programa está limitado à representação de 12 ciclos por gráfico.

Após concluir esta análise ciclo-a-ciclo, deve-se voltar à interface principal utilizando o botão *Back* e proceder conforme já foi explicado.

3.4.3. *Friction Coefficient*

Esta funcionalidade extra serve para visualizar a evolução do coeficiente de atrito e os seus valores médios ao longo do deslocamento para alguns ciclos. É uma interface muito semelhante à *Cycle Dynamic* com a excepção de não se seleccionar intervalos de medição (ver Figura 3.21).

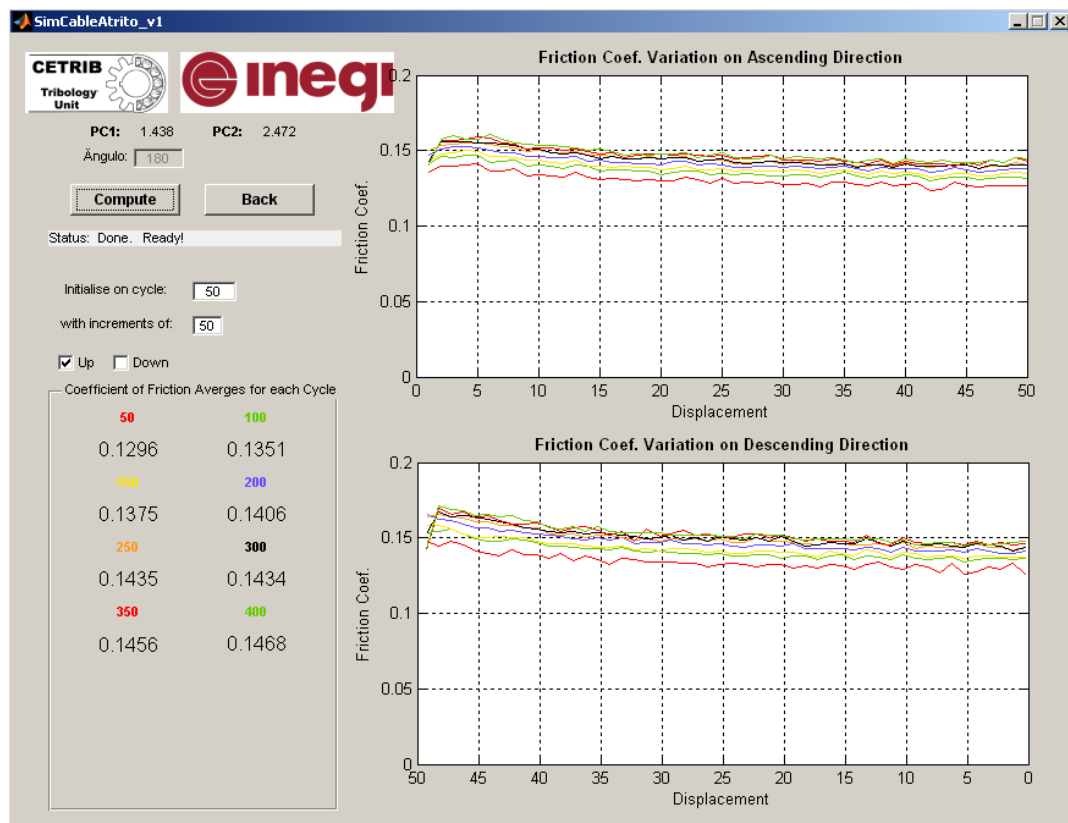


Figura 3.21.: Interface *Friction Coefficient* do programa *SimCable*.

3.4.4. Speed & Acceleration

Esta funcionalidade permite estimar a velocidade e aceleração do ensaio e é determinada por diferenças finitas. Para melhor interpretação dos resultados é feita uma representação gráfica e o valor médio da velocidade é apresentado na legenda (ver Figura 3.22).

Como estas propriedades se mantêm praticamente constantes para todo o ensaio, são determinadas apenas para um determinado ciclo correspondente ao ponto médio do intervalo seleccionado para determinar os valores de coeficiente de atrito na interface principal. O número do ciclo considerado é apresentado no título da janela.

Ao contrário das restantes interfaces do *software*, esta funcionalidade não tem opções de controlo ou selecção sendo apenas uma janela gerada automaticamente.

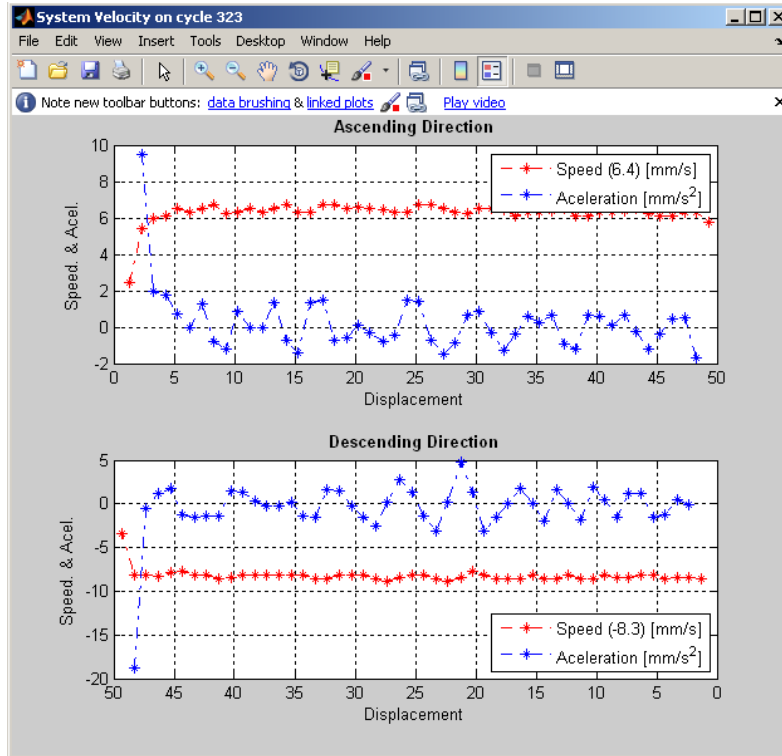


Figura 3.22.: Representação gráfica da velocidade e da aceleração de um ciclo com o programa *SimCable*.

Conforme referido, este *software* ainda apresenta pequenos *bugs* cuja correcção é relativamente simples. Um deles (e o que mais inconveniente) é a predefinição dos intervalos dos ciclos para a determinação dos valores das evoluções das forças e dos coeficientes de atrito nas interfaces *Cycle Dynamic* e *Friction Coefficient*. Para ensaios com mais de 600 ciclos, o programa apresenta um erro de *overflow*. A correcção deste *bug* passa por definir os valores dos intervalos automaticamente pelo próprio *software*.

4. Modelo Dinâmico da Máquina

O mecanismo actuador de cabos descrito na Secção 3.2 e representado esquematicamente na Figura 4.1, é constituído por um cilindro pneumático (CP), cuja extremidade inferior (A) está animada de um movimento acelerado $y(t)$ e directamente ligado à célula de carga $C1$.

O cabo a ensaiar tem, como foi visto, massa desprezável na medida em que este se encontra apoiado nos suportes e está posicionado entre as células de carga $C1$ e $C2$, admitindo-se que possui uma rigidez k e um coeficiente de amortecimento c , movendo-se com atrito (F_{at}) relativamente à bainha fixa.

A célula de carga $C2$ está ligada à massa M no ponto E , a qual está animada de um movimento acelerado $x(t)$. Este é diferente do movimento $y(t)$ devido à rigidez e amortecimento do cabo.

No movimento ascendente (*up*) a força medida pela célula de carga $C1$ é superior à medida pela célula de carga $C2$, opondo-se a força de atrito ao movimento ascendente. No movimento descendente (*down*) observa-se o oposto, isto é, a força medida pela célula de carga $C2$ é superior à medida pela célula de carga $C1$, opondo-se a força de atrito ao movimento descendente.

Considera-se *força resistente* a força que tenta contrariar o sentido do movimento enquanto que a *força motora* é a força que origina o movimento. Assim, tendo em conta o esquema da Figura 4.1, a força em B representa a força motora no sentido ascendente e a força resistente no sentido descendente. Por sua vez, a força em D representa a força resistente no sentido ascendente e a força motora no descendente.

4.1. Equilíbrio Dinâmico do Mecanismo Actuador de Cabos

De forma a facilitar a análise do comportamento dinâmico do mecanismo actuador de cabos, considera-se separadamente os movimentos ascendente (*up*) e descendente (*down*).

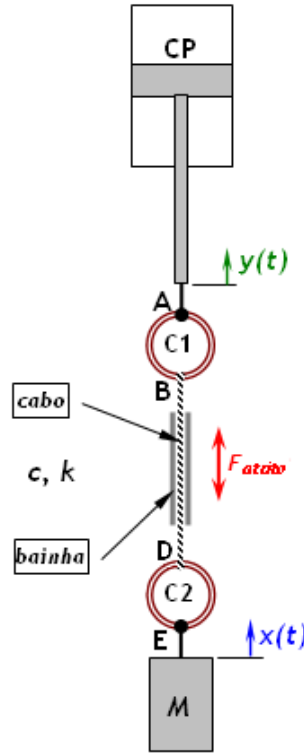


Figura 4.1.: Representação esquemática do modelo do sistema actuador de cabos.

4.1.1. Movimento Ascendente – *Up*

Ao aplicar-se a Segunda Lei de Newton aos pontos *E*, *D* e *B* da Figura 4.1 obtém-se para cada um deles:

Ponto *E*:

$$F_E - M \cdot g = M \cdot \ddot{x} \quad (4.1)$$

Recorde-se que a célula de carga *C2* foi calibrada na posição de ensaio. Isto significa que no ponto *E* ela só mede a carga aplicada além do seu próprio peso. Este será tido em consideração apenas no ponto *D*. Ou seja, caso a célula de carga *C2* fosse calibrada na posição horizontal (no seu zero absoluto), metade do seu peso seria contabilizado no equilíbrio das forças neste ponto.

Desta forma, a força dinâmica medida pela célula de carga *C2* é igual à força no ponto *E*, isto é,

$$F_E = F_{C2}^{up} = M \cdot g + M \cdot \ddot{x} \quad (4.2)$$

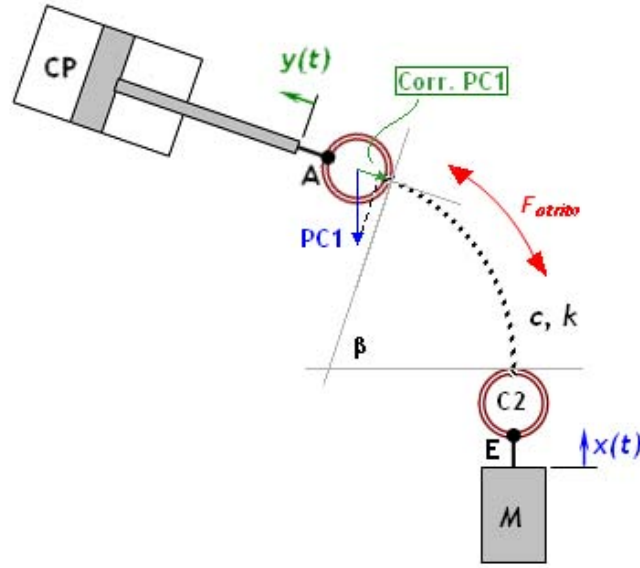


Figura 4.2.: Efeito do peso da célula de carga na força registada no ponto B (F_B).

Uma vez que a força F_{C2} é conhecida em cada instante é possível determinar a aceleração instantânea $\ddot{x}$,

$$\ddot{x} = \frac{F_{C2}^{up}}{M} - g \quad (4.3)$$

Ponto D :

A força dinâmica aplicada no ponto D é definida por,

$$\begin{aligned} F_D - F_{C2}^{up} - m_c \cdot g &= m_c \cdot \ddot{x} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow F_D &= F_{C2}^{up} + m_c \cdot g + m_c \cdot \ddot{x} \\ \Leftrightarrow F_D &= (M + m_c) \cdot g + (M + m_c) \cdot \ddot{x} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Ponto B :

Devido à calibração realizada, a força medida pela célula de carga $C1$ corresponde à carga no ponto B acrescida do peso correspondente a meia célula de carga e o respectivo suporte. Porém, esta componente varia com a posição do cilindro. Na Figura 4.2 é possível observar a contribuição do peso da célula na força no ponto B (F_B). Deste modo tem-se uma correcção devido ao peso da célula de carga $C1$, $Corr.PC1$ definido pela projecção do seu peso segundo o eixo do movimento do cilindro, ou seja,

$$Corr.PC1 = PC1 \cdot \cos \beta \quad (4.5)$$

com

4. Modelo Dinâmico da Máquina

$$\begin{aligned}
 PC1 &= \left(\frac{1}{2} m_c + m_{sup} \right) \cdot g = \\
 &= \left(\frac{1}{2} \cdot 0,219 + 0,037 \right) \cdot 9,8 \\
 &= 1,44N
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Assim tem-se que a força motora no movimento ascendente (F_B) é igual a

$$\begin{aligned}
 F_{C1}^{up} &= F_B + PC1 \cdot \cos \beta \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_B &= F_{C1}^{up} - PC1 \cdot \cos \beta
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Por outro lado,

$$\begin{aligned}
 F_B &= F_D + F_{at}^{up} + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_B &= [(M + m_c) \cdot g + (M + m_c) \cdot \ddot{x}] + F_{at}^{up} + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Das equações (4.7) e (4.8) resulta

$$F_{C1}^{up} = [(M + m_c) \cdot g + (M + m_c) \cdot \ddot{x}] + F_{at}^{up} + PC1 \cdot \cos \beta + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x) \tag{4.9}$$

Assim, a força de atrito no movimento ascendente será definida por

$$F_{at}^{up} = F_{C1}^{up} - PC1 \cdot \cos \beta - (M + m_c) \cdot g - (M + m_c) \cdot \ddot{x} - c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) - k \cdot (y - x) \tag{4.10}$$

Refira-se que todas as variáveis são conhecidas ou podem ser determinadas com exceção da rigidez k e do amortecimento c do cabo. Também $\dot{y}(t)$ e $\ddot{y}(t)$ podem ser determinados por derivação de $y(t)$ assim como $\dot{x}(t)$ e $x(t)$ por integração de $\ddot{x}(t)$.

Como se mostra adiante, a influência do termo $c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)$ no valor da força de atrito é desprezável, ficando a expressão (4.10) reduzida a

$$\begin{aligned}
 F_{at}^{up} &= F_{C1}^{up} - PC1 \cdot \cos \beta - (M + m_c) \cdot g - (M + m_c) \cdot \ddot{x} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_{at}^{up} &= F_{C1}^{up} - PC1 \cdot \cos \beta - M \cdot (g + \ddot{x}) - m_c \cdot (g + \ddot{x}) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_{at}^{up} &= F_{C1}^{up} - PC1 \cdot \cos \beta - F_{C2}^{up} - m_c \cdot (g + \ddot{x})
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

As expressões (4.3) e (4.11) permitem, a partir dos valores medidos, determinar a aceleração $\ddot{x}$ e a força de atrito F_{at} . No movimento ascendente, ter-se-á:

$$\text{Aceleração } \ddot{x} : \quad \ddot{x} = \frac{F_{C2}^{up}}{M} - g \quad (4.12)$$

$$\text{Força motora:} \quad F_M^{up} = F_{C1}^{up} - Corr.PC1 \quad (4.13)$$

$$\text{Força resistente:} \quad F_R^{up} = F_{C2}^{up} + m_c \cdot (g + \ddot{x}) = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{up} \quad (4.14)$$

$$\text{Força de atrito:} \quad F_{at}^{up} = F_M^{up} - F_R^{up} \quad (4.15)$$

4.1.2. Movimento Descendente – *Down*

Fazendo uma análise semelhante à do movimento ascendente,

Ponto E:

$$-F_E + M \cdot g = M \cdot \ddot{x} \quad (4.16)$$

Como a célula de carga $C2$ foi calibrada na posição de ensaio, também neste movimento a força dinâmica medida por esta é igual à força no ponto E , ou seja,

$$F_E = F_{C2}^{dw} = M \cdot g - M \cdot \ddot{x} \quad (4.17)$$

Uma vez que a força F_{C2} é conhecida em cada instante é possível determinar a aceleração instantânea $\ddot{x}$,

$$\ddot{x} = -\frac{F_{C2}^{dw}}{M} + g \quad (4.18)$$

Ponto D:

A força dinâmica aplicada no ponto D é definida por,

$$\begin{aligned} -F_D + F_{C2}^{dw} + m_c \cdot g &= m_c \cdot \ddot{x} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow F_D &= F_{C2}^{dw} + m_c \cdot g - m_c \cdot \ddot{x} \\ \Leftrightarrow F_D &= (M + m_c) \cdot g - (M + m_c) \cdot \ddot{x} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Ponto B:

Tal como no movimento ascendente, também aqui é necessário corrigir o valor obtido pela célula de carga. O seu factor de correcção $Corr.PC1$ é exactamente igual ao mostrado pela equação (4.5) assim como é igual a sua contribuição na força no ponto B (F_B), ou seja,

$$F_B = F_{C1}^{dw} - PC1 \cdot \cos \beta \quad (4.20)$$

4. Modelo Dinâmico da Máquina

Desenvolvendo F_B ,

$$\begin{aligned} & -F_{C1}^{dw} + PC1 \cdot \cos \beta + F_D - F_{at}^{dw} + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x) = 0 \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow -F_{C1}^{dw} + PC1 \cdot \cos \beta + [(M + m_c) \cdot g - (M + m_c) \cdot \ddot{x}] - F_{at}^{dw} + \\ & \quad + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x) = 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Assim, a força de atrito no movimento descendente será definida por

$$F_{at}^{dw} = (M + m_c) \cdot g - (M + m_c) \cdot \ddot{x} - F_{C1}^{dw} + PC1 \cdot \cos \beta + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x) \quad (4.22)$$

Também aqui se conhecem ou se consegue determinar todas as variáveis com exceção da rigidez k e do amortecimento c do cabo tal como no movimento ascendente.

Como se mostra adiante, a influência do termo $c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)$ no valor da força de atrito é desprezável, ficando a expressão (4.22) reduzida a

$$\begin{aligned} F_{at}^{dw} &= (M + m_c) \cdot g - (M + m_c) \cdot \ddot{x} - F_{C1}^{dw} + PC1 \cdot \cos \beta \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow F_{at}^{dw} = M \cdot (g - \ddot{x}) + m_c \cdot (g - \ddot{x}) - F_{C1}^{dw} + PC1 \cdot \cos \beta \\ &\Leftrightarrow F_{at}^{dw} = F_{C2}^{dw} - F_{C1}^{dw} + PC1 \cdot \cos \beta + m_c \cdot (g - \ddot{x}) \end{aligned} \quad (4.23)$$

As expressões (4.18) e (4.23) permitem, a partir dos valores medidos, determinar a aceleração $\ddot{x}$ e a força de atrito F_{at} . No movimento descendente, ter-se-á:

$$\text{Aceleração } \ddot{x}: \quad \ddot{x} = -\frac{F_{C2}^{dw}}{M} + g \quad (4.24)$$

$$\text{Força motora:} \quad F_M^{dw} = F_{C2}^{dw} + m_c \cdot (g - \ddot{x}) = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{dw} \quad (4.25)$$

$$\text{Força resistente:} \quad F_R^{dw} = F_{C1}^{dw} - Corr.PC1 \quad (4.26)$$

$$\text{Força de atrito:} \quad F_{at}^{dw} = F_M^{dw} - F_R^{dw} \quad (4.27)$$

4.1.3. Comportamento Dinâmico do Mecanismo na Ausência de Atrito (Cabo em Linha Recta sem Curvatura)

Na ausência de curvatura, a força de atrito desenvolvida entre o cabo e a bainha é nula. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 mostram-se as expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema para o movimento ascendente e descendente respectivamente, incluindo as componentes dinâmicas referentes ao amortecimento e à rigidez do cabo $c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)$.

Tabela 4.1.: Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na ausência de atrito no movimento ascendente.

Movimento	Ascendente
Peso da Célula 1	$PC1 = \left(\frac{1}{2} m_c + m_{sup}\right) \cdot g = 1,44N$
Correcção de C1	$Corr.PC1 = PC1 \cdot \cos \beta$
Força motora	$F_M^{up} = F_{C1}^{up} - Corr.PC1$
Força resistente	$F_R^{up} = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{up} + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)$
Força de atrito	$F_{at}^{up} = F_M^{up} - F_R^{up} = 0$ $F_{C1}^{up} - Corr.PC1 - \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{up} - c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) - k \cdot (y - x) = 0$
Resultante	$c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x) = F_{C1}^{up} - Corr.PC1 - \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{up}$

Tabela 4.2.: Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na ausência de atrito no movimento descendente.

Movimento	Descendente
Peso da Célula 1	$PC1 = \left(\frac{1}{2} m_c + m_{sup}\right) \cdot g = 1,44N$
Correcção de C1	$Corr.PC1 = PC1 \cdot \cos \beta$
Força motora	$F_M^{dw} = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{dw} + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)$
Força resistente	$F_R^{dw} = F_{C1}^{dw} - Corr.PC1$
Força de atrito	$F_{at}^{dw} = F_M^{dw} - F_R^{dw} = 0$ $\left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{dw} + c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x) - F_{C1}^{dw} + Corr.PC1 = 0$
Resultante	$-[c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)] = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{dw} - F_{C1}^{dw} + Corr.PC1$

4. Modelo Dinâmico da Máquina

Na Figura 4.3 e na Figura 4.4 mostram-se os valores de $c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)$, confirmando a sua irrelevância face aos valores da força motora e da força resistente, em ambos os movimentos.

Na Figura 4.5 mostram-se os valores da aceleração $\ddot{x}$ nos movimentos ascendente e descendente. Como se pode observar, o movimento é bastante uniforme não havendo aceleração significativa.

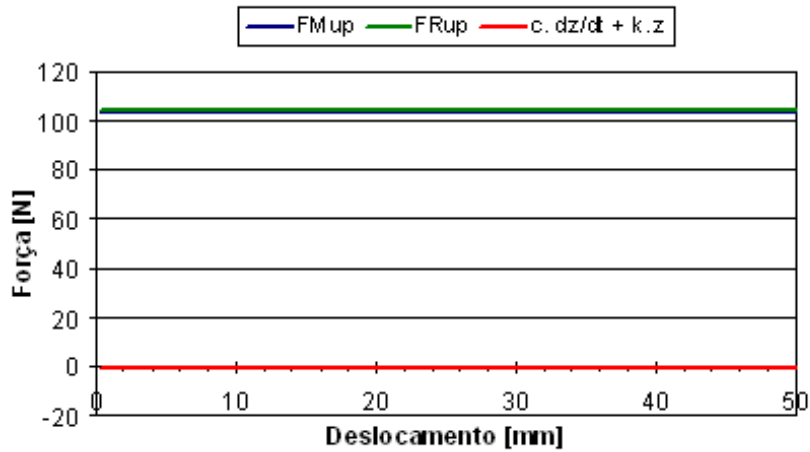


Figura 4.3.: Força dinâmica devida ao amortecimento e à rigidez do cabo no movimento ascendente.

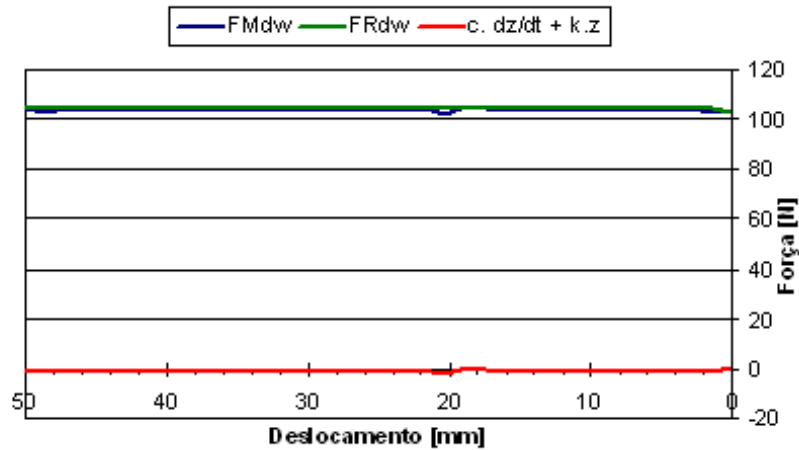


Figura 4.4.: Força dinâmica devida ao amortecimento e à rigidez do cabo no movimento descendente.

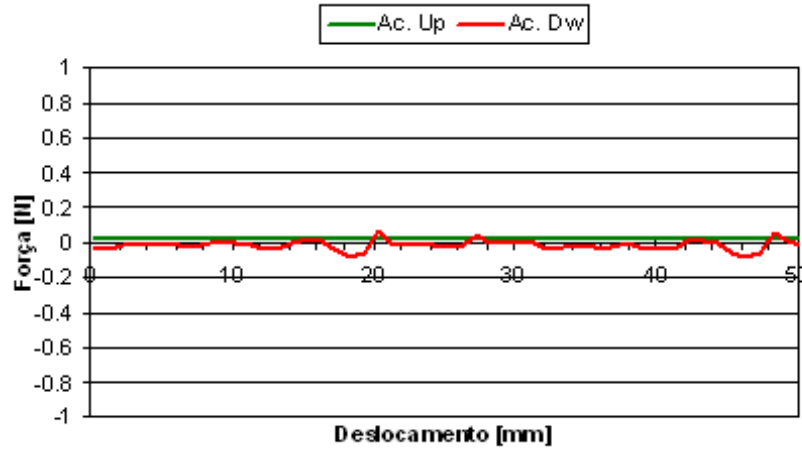


Figura 4.5.: Aceleração $\ddot{x}$ nos movimentos ascendente e descendente.

4.1.4. Comportamento Dinâmico do Mecanismo (Cabo com Curvatura)

Na presença de curvatura desenvolve-se uma força de atrito importante entre o cabo e a bainha. Nas Tabelas 4.3 e 4.4 mostram-se as expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema para os movimentos ascendente e descendente respectivamente, desprezando as componentes dinâmicas referentes ao amortecimento e à rigidez do cabo $c \cdot (\dot{y} - \dot{x}) + k \cdot (y - x)$.

A Figura 4.6 e a Figura 4.7 mostram as forças motora, resistente e de atrito durante os movimentos ascendente e descendente no caso de um cabo com as seguintes características: 1x19, POM, $\theta = 120^\circ$, $R = 150mm$ e $Peso = 75N$. Após o período inicial, onde todas as forças apresentam fortes variações, as forças motora, resistente e de atrito tendem para valores praticamente constantes. Embora nem todos os ensaios tenham curvas semelhantes a estas, é quase sempre possível verificar o valor ao qual as curvas estabilizam.

Regra geral, no movimento ascendente (movimento de 0 a 50mm), pode-se considerar que todas as forças são constantes para valores do deslocamento situados entre 25 e 50mm assim como no movimento descendente (movimento de 50 a 0mm), pode considerar-se que todas as forças são constante para valores do deslocamento situados entre 25 e 0mm. Estes valores constantes das forças motora, resistente e de atrito serão usados como valores experimentais a ser correlacionados pelo modelo teórico apresentado.

4. Modelo Dinâmico da Máquina

Tabela 4.3.: Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na presença de atrito no movimento ascendente.

Movimento	Ascendente
Peso da Célula 1	$PC1 = \left(\frac{1}{2} m_c + m_{sup}\right) \cdot g = 1,44N$
Correcção de $C1$	$Corr.PC1 = PC1 \cdot \cos \beta$
Força motora	$F_M^{up} = F_{C1}^{up} - Corr.PC1$
Força resistente	$F_R^{up} = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{up}$
Força de atrito	$F_{at}^{up} = F_M^{up} - F_R^{up} = F_{C1}^{up} - Corr.PC1 - \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{up}$

Tabela 4.4.: Expressões que regem o comportamento dinâmico do sistema na presença de atrito no movimento descendente.

Movimento	Descendente
Peso da Célula 1	$PC1 = \left(\frac{1}{2} m_c + m_{sup}\right) \cdot g = 1,44N$
Correcção de $C1$	$Corr.PC1 = PC1 \cdot \cos \beta$
Força motora	$F_M^{dw} = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{dw}$
Força resistente	$F_R^{dw} = F_{C1}^{dw} - Corr.PC1$
Força de atrito	$F_{at}^{dw} = F_M^{dw} - F_R^{dw} = \left(1 + \frac{m_c}{M}\right) \cdot F_{C2}^{dw} - F_{C1}^{dw} + Corr.PC1$

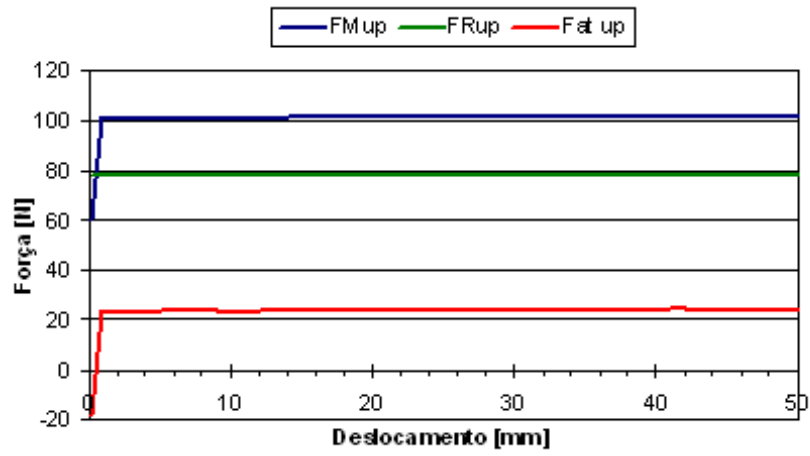


Figura 4.6.: Forças motora, resistente e de atrito no movimento ascendente.

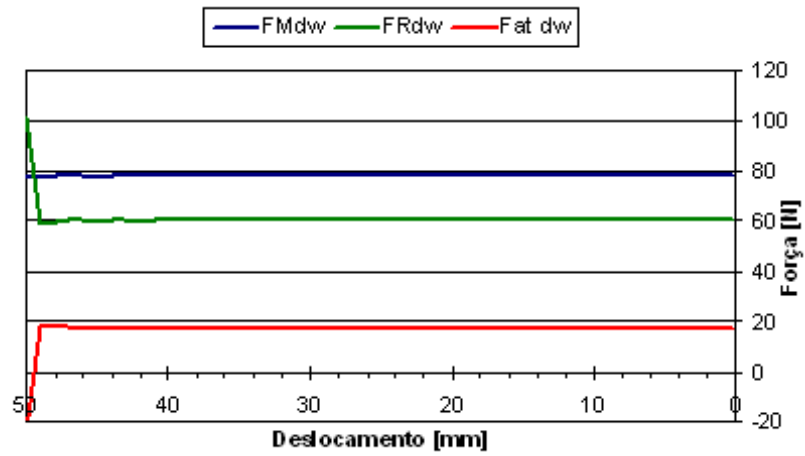


Figura 4.7.: Forças motora, resistente e de atrito no movimento descendente.

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Como já foi referido, existe uma quantidade considerável de variáveis que podem influenciar, ou não, o rendimento do cabo, sendo a temperatura e humidade do ensaio, os tipos de cordas e bainhas, a carga aplicada, a configuração geométrica e o facto de haver ou não lubrificação, os mais significativos. Porém, não se tornou viável o estudo de todos estes factores tendo sido focado neste trabalho a análise de dois tipos de corda (1x19 e 7x7), dois tipos de bainha (*POM* e *PEHD*), sujeitos a três cargas distintas (30, 50 e 75N) e a diferentes geometrias embora estas fossem sempre num mesmo plano vertical. Com excepção desta última, as restantes variáveis já foram analisadas no Capítulo 3. Assim, as geometrias estudadas foram divididas em dois grandes grupos: *lay-outs simples* e *lay-outs complexos*. Enquanto os primeiros caracterizam-se por representarem arcos de círculo, os segundos incorporam, para além da conjugação de vários *lay-outs simples*, todos os outros que se possam realizar desde que sejam planares. Assim, como é lógico, começou-se por analisar o primeiro grupo de *lay-outs* e estudar a sua correlação com o modelo teórico, ficando os *lay-outs complexos* para uma segunda etapa deste trabalho.

Assim, este capítulo está dividido em duas secções principais: *lay-outs simples* e *lay-outs complexos* onde são apresentados os resultados experimentais obtidos e é feita a sua correlação com o modelo teórico. Porém, antes disso é apresentado a metodologia seguida assim como a nomenclatura dada aos ensaios.

5.1. Nomenclatura

Um dado ensaio pode ser realizado com tipos de cabo diferentes assim como um mesmo tipo de cabo pode ser usado em ensaios diferentes. Para permitir a correcta identificação tanto do ensaio como do cabo, foi adoptada uma nomenclatura simples para a distinção de cada um.

5.1.1. Identificação do Cabo

Como se viu na Secção 3.1, foram estudadas quatro combinação de corda/bainha. De forma a facilitar a sua identificação, utilizou-se a referência comercial dos constituintes e definiu-se um índice do projecto conforme mostrado na Tabela 5.1.

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Tabela 5.1.: Identificação no projecto do tipo de cabo.

Bainha		Corda		Índice
Material	Ref.	Enrolamento	Ref.	
POM	TB1RN00250	1x19	CA19G00120 A	RA
POM	TB1RN00250	7x7	CA120731 F	RF
PEHD	TB1EN00250	1x19	CA19G00120 A	EA
PEHD	TB1EN00250	7x7	CA120731 F	EF

Para além do tipo de cabo é também necessário identificar o seu comprimento que é função do *lay-out* do ensaio. Para este projecto foram fornecidos seis comprimentos diferentes de cabos que vão dos 314 aos 1885mm. Por fim, para evitar a confusão quando se utilizam cabos diferentes mas com propriedades semelhantes, adiciona-se um índice numérico no final da referência.

Veja-se um exemplo: o cabo 628RF_2 é o segundo cabo ensaiado com um comprimento de 628mm, bainha TB1RN00250 e corda CA120731 F.

5.1.2. Identificação do Ensaio

A geometria de um ensaio com um *lay-out simples* pode ser identificada, de uma forma muito simples, pelo seu ângulo e pelo seu raio pois estes dois parâmetros são suficientes para definir um arco de círculo. Porém, para além da sua geometria, um ensaio também se define pela carga aplicada. Assim, para identificação do ensaio, adoptou-se a seguinte nomenclatura:

$$\underbrace{XXX}_{\text{ângulo}} \underbrace{RXXX}_{\text{raio}} \underbrace{PXX}_{\text{carga}} - \underbrace{XX}_{\text{\#cabo}}$$

Ou seja, por exemplo o ensaio 90R200P75_2 refere-se ao segundo cabo ensaiado a 90° com raio de 200mm e sujeito a uma carga de 75N. Este ensaio, embora realizado necessariamente com um cabo com 314mm de comprimento ($\pi \cdot 200 \approx 314mm$), pode ter sido realizado com qualquer tipo de cabo.

5.1.3. Registo de Ensaios

Para registar as datas dos ensaios realizados, foi criado o ficheiro “Registo de Ensaios.txt”. Este ficheiro apenas indica os ensaios realizados e o cabo utilizado respectivamente, por ordem cronológica, conforme ilustrado na Figura 5.1.

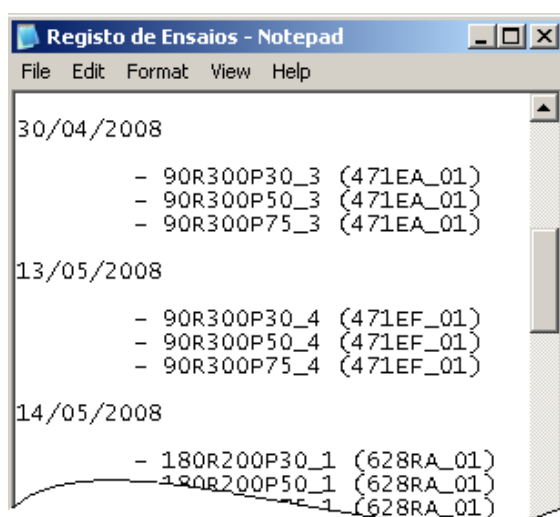


Figura 5.1.: Ficheiro de registo dos ensaios realizados.

5.2. Metodologia

Antes de se avançar para a apresentação dos resultados, vale apenas referir a metodologia aplicada em cada ensaio, nomeadamente, na definição de número de ciclos de cada ensaio. Assim, para compreender a evolução e eventual variação da força motora, realizou-se um ensaio de longa duração de 2500 ciclos cuja representação é apresentada na Figura 5.2. Como se pode observar, há um aumento significativo da força nos primeiros 250 ciclos onde se atinge um pico e, posteriormente, a força vai diminuindo progressivamente para um valor limite. É, assim, fundamental, realizar ensaios com mais de 250 ciclos para garantir que a zona de transição seja ultrapassada. Por outro lado, os ensaios deveriam ir além dos 1500 onde se já está muito próximo do valor limite. Porém, a realização destes ensaios teriam a duração aproximada de oito horas tornando assim pouco viável a sua realização. Por este motivo optou-se pela realização de ensaios de 400 ciclos. Este valor permite o cálculo de uma força média numa região praticamente estável e o facto de corresponder à zona onde este valor é máximo pode ser interessante na medida em que é analisado o caso em que a solicitação é mais exigente.

5.3. *Lay-outs Simples*

Como foi visto, os *lay-outs simples* são definidos por arcos de círculo e, por isso, são o ponto de partida ideal para o estudo do atrito nos cabos. Existem porém, dois tipos de *lay-outs simples*: os apoiados e os não-apoiados. Ambos foram estudados e o mesmo plano de ensaios lhes foi aplicado para que fosse possível uma comparação directa de resultados.

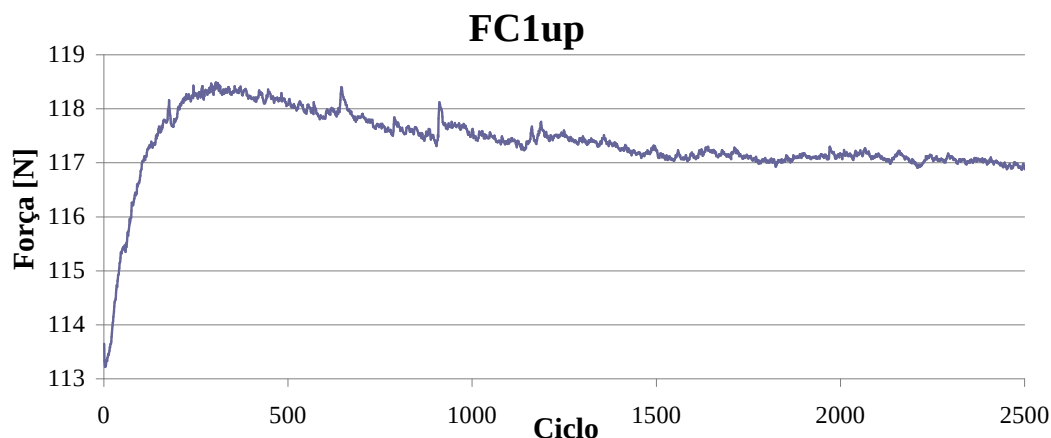


Figura 5.2.: Evolução da força motora no movimento ascendente num ensaio de 2500 ciclos.

5.3.1. Plano de Ensaios para *Lay-outs Simple*s

O plano de ensaios seleccionado consiste na combinação de três ângulos, dois raios e três cargas para os quatro tipos de cabo tentando abranger uma gama diversificada de casos de estudo tendo em conta os interesses da *Fico Cables, Lda*. A Tabela 5.2 mostra o plano de ensaios seguido, aplicado tanto aos casos apoiados como aos não-apoiados.

Como se pode ver, todos os cabos são sujeitos a três ensaios experimentais com um aumento progressivo da carga perfazendo assim um total de 72 ensaios apoiados e outros tantos não-apoiados.

5.3.2. Resultados

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os resultados das forças motoras e resistentes dos ensaios apoiados e não-apoiados respectivamente.

Os ensaios marcados a vermelho assinalam os que atingiram o valor limite da força motora ascendente (210N) do sistema conforme mencionado na Secção 3.2.2. Por este motivo, os seus valores foram desprezados no tratamento de resultados.

Para realizar ensaios apoiados a 360° é necessário um suporte específico. Como já sucedia nos suportes para ensaios apoiados, a área de contacto da bainha neste caso é reduzida a metade comparativamente com o sucedido em ensaios não-apoiados. Este facto aliado ao aumento de carga implícito dos ensaios a 360° conduzem a que a bainha ceda e acesse o orifício de passagem da corda de aço, alterando o decorrer do ensaio. A Figura 5.3 mostra a evolução típica da força motora ao longo de um destes ensaios. Note-se que a partir do ciclo 170 há uma diminuição

Tabela 5.2.: Plano de ensaios para testes apoiados e não-apoiados.

			Carga [N]			
			30/50/75			
<i>Ângulo</i> [°]	<i>Raio</i> [mm]	<i>Cabo</i>	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}
90	200	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
	300	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
180	200	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
	300	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
360	200	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
	300	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				

Tabela 5.3.: Resultados das forças motoras e resistentes para os ensaios apoiados.

Cabo	Ângulo	Raio	Carga											
			30 N				50 N				75 N			
			F_M^{up}	F_R^{du}	F_R^{up}	F_M^{du}	F_M^{up}	F_R^{du}	F_R^{up}	F_M^{du}	F_M^{up}	F_R^{du}	F_R^{up}	F_M^{du}
RA	90	200	40, 42	26, 00	32, 39	32, 41	64, 22	42, 59	52, 40	52, 42	101, 03	59, 13	77, 57	77, 58
	300	300	41, 35	25, 38	32, 43	32, 44	65, 95	41, 36	52, 44	52, 44	96, 90	61, 59	77, 62	77, 63
	200	200	54, 23	19, 40	32, 43	32, 44	87, 95	31, 19	52, 44	52, 45	129, 14	46, 88	77, 62	77, 62
	180	300	51, 73	20, 27	32, 55	32, 56	81, 41	33, 38	52, 54	52, 55	118, 25	49, 89	77, 69	77, 68
	360	200	85, 19	11, 77	32, 59	32, 54	122, 76	21, 04	52, 57	52, 54	172, 72	33, 90	77, 73	77, 69
	300	300	80, 83	12, 41	32, 67	32, 63	129, 73	19, 77	52, 67	52, 59	182, 53	30, 11	77, 81	77, 74
	90	200	50, 16	20, 96	32, 44	32, 46	81, 90	33, 35	52, 42	52, 43	121, 89	48, 38	77, 57	77, 58
	300	300	49, 07	21, 60	32, 51	32, 53	78, 44	34, 91	52, 47	52, 48	116, 81	51, 21	77, 67	77, 68
RF	180	200	72, 97	13, 88	32, 43	32, 44	118, 90	22, 06	52, 43	52, 44	176, 73	33, 13	77, 62	77, 62
	300	300	59, 89	17, 71	32, 57	32, 59	101, 13	27, 51	52, 56	52, 58	150, 51	40, 61	77, 73	77, 73
	200	200	136, 76	6, 85	32, 73	32, 67	208, 51	11, 78	52, 71	52, 65	— — —	— — —	— — —	— — —
	360	300	113, 73	8, 73	32, 73	32, 65	176, 88	14, 69	52, 72	52, 64	209, 68	23, 62	77, 85	77, 77
EA	90	200	40, 14	26, 24	32, 51	32, 52	66, 43	41, 16	52, 49	52, 50	99, 81	59, 72	77, 63	77, 65
	300	300	41, 32	25, 43	32, 46	32, 48	69, 68	39, 18	52, 45	52, 47	102, 98	57, 93	77, 61	77, 62
	200	200	46, 27	22, 96	32, 54	32, 56	75, 70	36, 43	52, 52	52, 53	113, 50	53, 32	77, 68	77, 68
	180	300	47, 19	22, 44	32, 57	32, 59	78, 85	34, 55	52, 57	52, 58	119, 19	49, 70	77, 73	77, 74
	360	200	64, 55	15, 73	32, 68	32, 63	113, 85	22, 94	52, 68	52, 63	167, 07	34, 69	77, 84	77, 77
	300	300	77, 10	13, 08	32, 68	32, 59	121, 53	21, 28	52, 50	52, 43	— — —	— — —	— — —	— — —
EF	90	200	41, 77	25, 09	32, 46	32, 48	67, 77	40, 23	52, 47	52, 49	99, 19	60, 15	77, 64	77, 64
	300	300	40, 78	25, 92	32, 44	32, 46	65, 97	41, 56	52, 43	52, 44	97, 69	61, 31	77, 60	77, 61
	200	200	49, 92	20, 96	32, 55	32, 56	81, 13	33, 41	52, 53	52, 54	119, 82	49, 25	77, 69	77, 69
	180	300	51, 53	20, 09	32, 53	32, 55	83, 11	32, 14	52, 52	52, 54	123, 24	47, 27	77, 70	77, 70
	360	200	69, 79	14, 43	32, 68	32, 63	111, 67	23, 09	52, 68	52, 63	161, 21	35, 81	77, 82	77, 80
	300	300	64, 38	15, 48	32, 47	32, 41	106, 98	23, 81	52, 47	52, 43	158, 13	34, 83	77, 64	77, 55

Tabela 5.4.: Resultados das forças motoras e resistentes para os ensaios não-apoiados.

Cabo	Ângulo	Raio	Carga											
			30 N				50 N				75 N			
			F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}
RA	90	200	39,99	26,38	32,38	32,39	63,95	42,90	52,38	52,40	93,60	63,89	77,56	77,47
		300	40,99	25,84	32,47	32,49	65,56	41,73	52,46	52,48	95,25	62,48	77,62	77,57
	180	200	50,82	20,80	32,54	32,55	81,39	33,44	52,53	52,52	118,44	50,03	77,71	77,46
		300	50,45	20,98	32,53	32,54	81,67	33,33	52,52	52,60	120,66	48,89	77,66	77,66
	360	200	83,41	12,25	32,53	32,49	137,24	19,29	52,52	52,48	194,95	29,30	77,68	77,65
		300	78,41	12,59	32,51	32,47	127,30	20,14	52,49	52,47	173,66	32,50	77,73	77,65
RF	90	200	45,52	23,19	32,38	32,39	72,25	36,48	52,39	52,40	109,77	54,41	77,55	77,56
		300	50,16	21,16	32,47	32,49	79,89	34,54	52,46	52,47	116,16	51,45	77,61	77,63
	180	200	54,65	19,06	32,50	32,50	93,24	28,80	52,51	52,53	138,62	43,13	77,67	77,72
		300	67,07	15,45	32,53	32,55	109,32	25,03	52,52	52,56	162,93	37,25	77,70	77,75
	360	200	109,45	8,77	32,63	32,59	182,87	13,59	52,60	52,58	209,66	20,39	77,71	77,69
		300	117,51	8,40	32,53	32,48	193,72	13,27	52,52	52,46	209,66	20,02	77,72	77,63
EA	90	200	38,37	27,64	32,38	32,40	62,69	43,97	52,39	52,40	93,31	64,25	77,57	77,58
		300	40,00	26,46	32,44	32,45	65,61	41,68	52,45	52,45	97,49	61,19	77,62	77,61
	180	200	44,42	24,17	32,53	32,54	72,79	38,29	52,51	52,52	107,94	55,62	77,67	77,73
		300	40,74	26,13	32,54	32,56	67,82	40,59	52,52	52,59	101,32	58,99	77,68	77,76
	360	200	62,71	16,31	32,57	32,55	111,54	23,50	52,60	52,54	171,98	33,31	77,75	77,73
		300	77,04	13,02	32,61	32,59	129,86	20,60	52,64	52,60	194,85	30,58	77,72	77,66
EF	90	200	39,92	26,51	32,47	32,49	64,47	42,31	52,46	52,47	96,55	61,66	77,62	77,63
		300	39,49	26,84	32,56	32,57	65,06	42,10	52,54	52,57	96,71	61,71	77,70	77,71
	180	200	46,64	22,24	32,46	32,47	76,20	34,91	52,46	52,50	115,41	50,49	77,63	77,54
		300	50,51	20,56	32,59	32,62	82,25	32,08	52,57	52,60	121,12	47,75	77,72	77,79
	360	200	68,68	14,61	32,56	32,56	113,29	22,48	52,57	52,47	165,83	34,21	77,78	77,72
		300	65,33	15,36	32,59	32,53	110,01	23,59	52,60	52,56	159,56	35,02	77,76	77,69

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

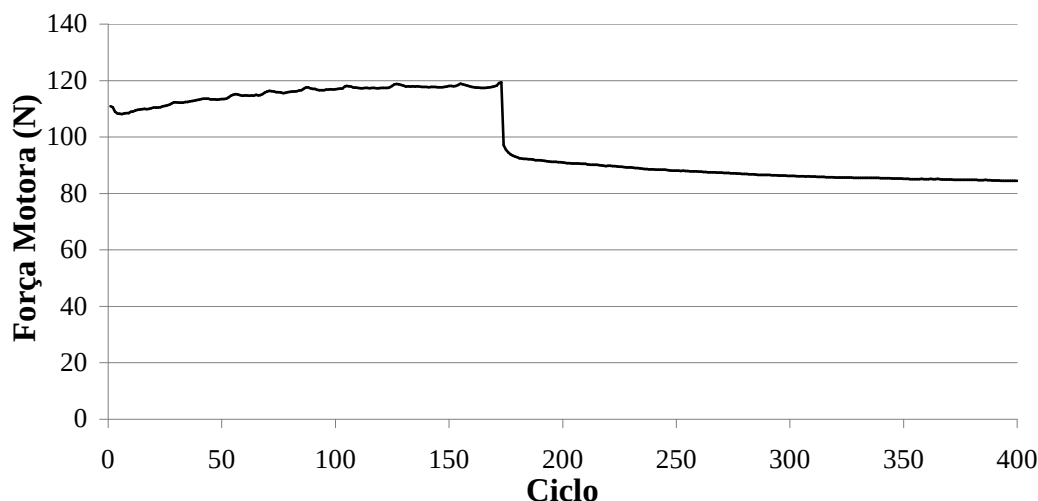


Figura 5.3.: Evolução da força motora média de um ensaio apoiado com um cabo *EA* a 360° , raio 300mm e carga 50N com cedência da bainha.

abrupta da força média. Isto significa que a bainha entrou no orifício de passagem da corda. Contudo, a partir do ciclo 130 já há uma estabilização da força motora. Neste caso, foi possível aproveitar este intervalo de valores (entre 130 e 170) para calcular um valor médio do coeficiente de atrito. Porém, devido a esta cedência da bainha, não foi possível obter um valor válido para o ensaio seguinte com a mesma geometria mas com carga 75N , devido à deformação da bainha. Mesmo após a repetição desta série de ensaios com outro cabo, a bainha voltou a ceder no ensaio a 50N . É por este motivo que a Tabela 5.3 não apresenta qualquer resultado para o ensaio $360R300P75$ do cabo *EA* apoiado.

Ainda da análise da Figura 5.3, aparentemente se poderia dizer que o contacto bainha/espiral de aço é melhor do que o corda de aço/bainha embora o ensaio não tenha sido realizado com as condições necessárias para fazer esse estudo.

Tal como foi mostrado na Secção 4, a força de atrito pode ser determinada pela diferença entre a força motora e a força resistente. Assim, os seus valores foram determinados e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5 para os ensaios apoiados e na Tabela 5.6 para os não-apoiados.

Pelas equações (2.8) de F. H. Buller [1] e (2.9) de R. C. Rifenburg [2], é possível calcular o coeficiente de atrito dos ensaios. Porém, como se mostrou na Secção 3.1.1, o peso da corda do cabo é excepcionalmente baixa, principalmente quando comparada com a carga aplicada. Por este motivo, pareceu razoável desprezar o termo que depende do peso da corda, w , nas equações referidas. Caso se verifique que tal aproximação é aceitável, todas as seis equações simplificar-se-iam bastante com

Tabela 5.5.: Resultados das forças de atrito para os ensaios apoiados.

<i>Cabo</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Raio</i>	Carga					
			30 N		50 N		75 N	
			F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}	F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}	F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}
RA	90	200	8,03	6,41	11,82	9,83	23,46	18,45
		300	8,92	7,06	13,51	11,08	19,28	16,04
	180	200	21,80	13,04	35,51	21,26	51,52	30,74
		300	19,18	12,29	28,88	19,16	40,56	27,79
	360	200	52,60	20,77	70,19	31,49	94,99	43,79
		300	48,16	20,22	77,05	32,82	104,72	47,64
RF	90	200	17,71	11,50	29,48	19,09	44,31	29,19
		300	16,56	10,93	25,96	17,57	39,14	26,47
	180	200	40,54	18,56	66,47	30,38	99,12	44,48
		300	27,32	14,88	48,56	25,06	72,78	37,12
	360	200	104,03	25,83	155,79	40,87	— — —	— — —
		300	81,01	23,92	124,16	37,95	131,83	54,15
EA	90	200	7,63	6,28	13,94	11,34	22,18	17,93
		300	8,86	7,05	17,24	13,29	25,37	19,69
	180	200	13,73	9,60	23,18	16,10	35,82	24,36
		300	14,62	10,14	26,28	18,03	41,46	28,04
	360	200	31,87	16,90	61,17	29,69	89,23	43,08
		300	44,42	19,51	69,03	31,14	— — —	— — —
EF	90	200	9,32	7,39	15,30	12,25	21,56	17,49
		300	8,34	6,54	13,54	10,88	20,09	16,30
	180	200	17,37	11,61	28,60	19,13	42,13	28,44
		300	19,00	12,46	30,59	20,40	45,54	30,43
	360	200	37,12	18,20	59,00	29,55	83,39	41,99
		300	31,92	16,93	54,51	28,62	80,49	42,72

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Tabela 5.6.: Resultados das forças de atrito para os ensaios não-apoiados.

<i>Cabo</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Raio</i>	Carga					
			30 N		50 N		75 N	
			F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}	F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}	F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}
RA	90	200	7,62	6,01	11,57	9,51	16,04	13,59
		300	8,52	6,65	13,10	10,75	17,62	15,09
	180	200	18,28	11,75	28,85	19,07	40,74	27,43
		300	17,91	11,56	29,15	19,27	43,00	28,77
	360	200	50,88	20,24	84,72	33,19	117,26	48,35
		300	45,90	19,88	74,80	32,33	95,92	45,15
RF	90	200	13,14	9,20	22,86	15,91	32,22	23,15
		300	17,69	11,33	27,44	17,94	38,55	26,18
	180	200	22,16	13,45	40,74	23,73	60,95	34,59
		300	34,53	17,10	56,80	27,54	85,23	40,49
	360	200	76,82	23,82	130,27	38,99	131,96	57,30
		300	84,98	24,08	141,20	39,19	131,94	57,61
EA	90	200	5,99	4,75	10,30	8,44	15,74	13,33
		300	7,57	5,99	13,16	10,77	19,87	16,43
	180	200	11,89	8,37	20,27	14,23	30,27	22,11
		300	8,20	6,43	15,30	12,00	23,64	18,76
	360	200	30,15	16,24	58,94	29,04	94,23	44,42
		300	44,43	19,57	77,22	31,99	117,13	47,08
EF	90	200	7,45	5,97	12,01	10,16	18,92	15,97
		300	6,93	5,73	12,52	10,47	19,01	16,00
	180	200	14,18	10,22	23,74	17,59	37,78	27,04
		300	17,92	12,06	29,68	20,53	43,40	30,04
	360	200	36,11	17,95	60,71	30,00	88,06	43,51
		300	32,74	17,17	57,41	28,97	81,81	42,67

Tabela 5.7.: Erro da aproximação do modelo teórico para os ensaios não-apoiados. (Valores multiplicados por um factor de 1000)

<i>Ângulo</i>	<i>Raio</i>	<i>Carga</i>	Cabo							
			RA		RF		EA		EF	
			$\Delta\mu^{up}$	$\Delta\mu^{dw}$	$\Delta\mu^{up}$	$\Delta\mu^{dw}$	$\Delta\mu^{up}$	$\Delta\mu^{dw}$	$\Delta\mu^{up}$	$\Delta\mu^{dw}$
90	200	30	1,0	1,2	0,8	1,1	1,0	1,1	0,8	1,0
		50	0,6	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,5	0,6
		75	0,4	0,5	0,3	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4
	300	30	1,0	1,2	0,8	1,2	1,0	1,2	0,8	1,0
		50	0,6	0,8	0,5	0,7	0,6	0,8	0,5	0,6
		75	0,4	0,5	0,3	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4
180	200	30	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2
		50	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
		75	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	300	30	0,2	0,3	0,2	0,5	0,1	0,2	0,2	0,3
		50	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2
		75	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
360	200	30	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1
		50	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
		75	0,0	0,0	— — —	— — —	0,0	0,0	0,0	0,0
	300	30	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1
		50	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
		75	0,0	0,0	— — —	— — —	0,0	0,0	0,0	0,0

a vantagem de todas assumirem o mesmo aspecto (equação (5.1)) tornando assim possível aplicar uma só equação independentemente do tipo de curva (convexa ou côncava, ascendente ou descendente).

$$F_M = F_R \cdot e^{\mu \cdot \beta} \quad (5.1)$$

Para verificar o erro obtido com esta aproximação, fez-se um ficheiro em *Matlab* que, para os valores das forças medidas experimentalmente, determina a diferença entre a solução das equações (2.8) e (2.9) e a equação (5.1). Os resultados são apresentados na Tabela 5.7 e verifica-se que, de facto, esta aproximação é perfeitamente aceitável na medida em que na grande maioria dos casos, só se verificam alterações no valor do coeficiente de atrito a partir da quarta casa decimal sendo a diferença máxima registada de 0,0012. Verifica-se também que os erros são tanto maiores quanto menor é o ângulo e a carga.

Lembra-se que as equações definidas anteriormente eram aplicadas a cabos eléctricos, cujos pesos por metro de comprimento são da ordem dos 15kg/m e cujos *lay-outs* tinham extensões na ordem dos vários quilómetros não sendo assim de admirar que esta aproximação apresente tão bons resultados.

Pode-se então calcular os valores dos coeficientes de atrito para cada ensaio, tanto pelo movimento ascendente como pelo movimento descendente para os ensaios apoiados e para os não-apoiados, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 5.8 e 5.9 respectivamente.

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Tabela 5.8.: Resultados dos coeficientes de atrito para os ensaios apoiados.

<i>Cabo</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Raio</i>	Carga					
			30 N		50 N		75 N	
			μ^{up}	μ^{dw}	μ^{up}	μ^{dw}	μ^{up}	μ^{dw}
RA	90	200	0,141	0,140	0,130	0,132	0,168	0,173
		300	0,155	0,156	0,146	0,151	0,141	0,147
	180	200	0,164	0,164	0,165	0,166	0,162	0,161
		300	0,148	0,151	0,139	0,144	0,134	0,141
	360	200	0,153	0,162	0,135	0,146	0,127	0,132
		300	0,144	0,154	0,143	0,156	0,136	0,151
RF	90	200	0,277	0,278	0,284	0,288	0,288	0,301
		300	0,262	0,261	0,256	0,260	0,260	0,265
	180	200	0,258	0,270	0,261	0,276	0,262	0,271
		300	0,194	0,194	0,208	0,206	0,210	0,207
	360	200	0,228	0,249	0,219	0,238	— — —	— — —
		300	0,198	0,210	0,193	0,203	0,158	0,190
EA	90	200	0,134	0,137	0,150	0,155	0,160	0,167
		300	0,154	0,156	0,181	0,186	0,180	0,186
	180	200	0,112	0,111	0,116	0,117	0,121	0,120
		300	0,118	0,119	0,129	0,134	0,136	0,142
	360	200	0,108	0,116	0,123	0,132	0,122	0,129
		300	0,137	0,145	0,134	0,144	— — —	— — —
EF	90	200	0,161	0,164	0,163	0,169	0,156	0,163
		300	0,146	0,143	0,146	0,148	0,147	0,150
	180	200	0,136	0,140	0,138	0,144	0,138	0,145
		300	0,146	0,154	0,146	0,156	0,147	0,158
	360	200	0,121	0,130	0,120	0,131	0,116	0,124
		300	0,109	0,118	0,113	0,126	0,113	0,127

Tabela 5.9.: Resultados dos coeficientes de atrito para os ensaios não-apoiados.

<i>Cabo</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Raio</i>	Carga					
			30 N		50 N		75 N	
			μ^{up}	μ^{dw}	μ^{up}	μ^{dw}	μ^{up}	μ^{dw}
RA	90	200	0,135	0,131	0,127	0,128	0,120	0,123
		300	0,148	0,146	0,142	0,146	0,130	0,138
	180	200	0,142	0,143	0,139	0,144	0,134	0,139
		300	0,140	0,140	0,141	0,145	0,140	0,147
	360	200	0,150	0,155	0,153	0,159	0,146	0,155
		300	0,140	0,151	0,141	0,152	0,128	0,139
RF	90	200	0,217	0,213	0,231	0,231	0,221	0,226
		300	0,277	0,273	0,268	0,266	0,257	0,262
	180	200	0,166	0,170	0,183	0,191	0,184	0,187
		300	0,230	0,237	0,233	0,236	0,236	0,234
	360	200	0,193	0,209	0,198	0,215	0,158	0,213
		300	0,204	0,215	0,208	0,219	0,158	0,216
EA	90	200	0,108	0,101	0,114	0,112	0,118	0,120
		300	0,134	0,130	0,143	0,146	0,145	0,151
	180	200	0,099	0,095	0,104	0,101	0,105	0,107
		300	0,072	0,070	0,081	0,082	0,085	0,088
	360	200	0,104	0,110	0,120	0,128	0,126	0,135
		300	0,137	0,146	0,144	0,149	0,146	0,148
EF	90	200	0,132	0,129	0,131	0,137	0,139	0,147
		300	0,123	0,123	0,136	0,141	0,139	0,147
	180	200	0,115	0,120	0,119	0,130	0,126	0,137
		300	0,140	0,147	0,143	0,158	0,141	0,155
	360	200	0,119	0,128	0,122	0,135	0,121	0,131
		300	0,111	0,119	0,117	0,128	0,114	0,127

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Tabela 5.10.: Coeficientes de atrito médios tendo em conta o sentido de movimento (*up* ou *down*) para cada tipo de cabo, apoiado (*AP*) ou não-apoiado (*NAP*).

	AP		NAP	
<i>Cabo</i>	$\bar{\mu}^{up}$	$\bar{\mu}^{dw}$	$\bar{\mu}^{up}$	$\bar{\mu}^{dw}$
<i>RA</i>	0,146	0,151	0,139	0,143
<i>RF</i>	0,243	0,249	0,219	0,223
<i>EA</i>	0,136	0,141	0,116	0,118
<i>EF</i>	0,137	0,144	0,127	0,135

Tabela 5.11.: Coeficientes de atrito médios globais para cada tipo de cabo, apoiado (*AP*) e não-apoiado (*NAP*), respectivo desvio padrão e erro relativo entre caso apoiado e não-apoiado.

	AP		NAP		$\frac{\bar{\mu}_{AP} - \bar{\mu}_{NAP}}{\bar{\mu}_{NAP}} [\%]$
<i>Cabo</i>	$\bar{\mu}$	<i>D.P.</i>	$\bar{\mu}$	<i>D.P.</i>	
<i>RA</i>	0,149	0,012	0,141	0,009	5,7
<i>RF</i>	0,246	0,034	0,221	0,028	11,3
<i>EA</i>	0,138	0,022	0,117	0,024	17,9
<i>EF</i>	0,140	0,016	0,131	0,011	6,9

Observando as Tabelas 5.8 e 5.9 é de fácil percepção a diversidade de valores de coeficiente de atrito obtidos. No caso dos cabos apoiados (Tabela 5.8), por exemplo, a gama de valores do coeficiente de atrito encontra-se compreendida entre 0,108 e 0,301.

Como os cabos são diferentes, é natural que o seu coeficiente de atrito também o seja. Se se conseguir determinar este valor característico de cada cabo, pode-se prever o seu comportamento para uma dada geometria e carga. Uma forma de o conseguir é calculando a média dos valores obtidos nas Tabelas 5.8 e 5.9 para cada tipo de cabo. A Tabela 5.10 tem em consideração a diferença dos coeficientes de atrito entre o movimento ascendente e descendente. Como a sua diferença é sempre inferior a 0,008, optou-se por considerar uma média global que não distingue o sentido do movimento (Tabela 5.11).

Ao analisar a Tabela 5.11 é possível tirar quatro conclusões imediatas:

- o coeficiente de atrito é mais elevado no caso apoiado do que no caso não-apoiado para todos os cabos sem excepção;
- o desvio padrão é mais elevado para os cabos que apresentam coeficiente de atrito médio mais alto, *RF*, e mais baixo, *EA*, enquanto que o cabo *RA* é o mais uniforme nos resultados obtidos;
- O cabo *EA* é o que apresenta uma maior dependência do facto de estar

Tabela 5.12.: Erros máximos e mínimos dos valores do coeficiente de atrito obtidos experimentalmente relativos ao valor médio global.

<i>Cabo</i>	AP				NAP			
	$\bar{\mu}$	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$	$\bar{\mu}$	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$
<i>RA</i>	0,149	11,3	-12,6	3,5	0,141	7,8	-10,9	2,6
<i>RF</i>	0,246	31,2	-28,1	9,7	0,221	26,9	-9,3	8,0
<i>EA</i>	0,138	15,3	-16,9	5,3	0,117	20,6	-18,3	7,5
<i>EF</i>	0,140	14,8	-18,1	5,4	0,131	7,6	-12,0	3,5

apoiado ou não, isto é, é o que consegue melhorar mais o seu desempenho quando deixa de estar apoiado;

- Independentemente do cabo estar apoiado ou não, o tipo de cabo *RF* apresenta um coeficiente de atrito claramente superior aos restantes tipos de cabo. Por outro lado, enquanto estes três tipos de cabo (*RA*, *EA* e *EF*) têm valores de coeficiente de atrito muito semelhante quando se encontram apoiados, os seus valores tornam-se mais distintos quando não-apoiados.

A partir de um coeficiente de atrito médio, é possível determinar a força motora ou resistente, desde que conhecida uma delas, para qualquer geometria definida. Se se comparar esse valor com o obtido experimentalmente tem-se um erro dado por

$$e = \frac{F^{exp.} - F^{num.}}{F^{num.}} \times 100 \quad [\%] \quad (5.2)$$

Este erro é, na realidade, a medida que terá mais interesse em controlar e, logicamente, minimizar, pois conseguindo definir um determinado coeficiente de atrito que traduza erros muito baixos dos valores experimentais, significa que a lei definida pela equação (5.1) traduz o desempenho do cabo. Assim, foram calculados os erros máximo e mínimo de cada ensaio relativos aos valores médios globais apresentados na Tabela 5.11 e cujos resultados se encontram na Tabela 5.12.

A fim de diminuir, em valor absoluto, estes erros máximos e mínimos, ou seja, diminuir o desvio padrão dos erros, programou-se um ficheiro em *Matlab* para fazer uma minimização pelo método dos mínimos quadrados por alteração do coeficiente de atrito médio. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.13 onde também se apresenta os novos erros máximos e mínimos tal como na tabela anterior.

Como se pode observar da comparação das Tabelas 5.12 e 5.13, os erros máximos e mínimos são agora mais baixos graças a pequenas variações dos respectivos coeficientes de atrito e, enquanto nos cabos apoiados se verificou uma diminuição do seu coeficiente de atrito, nos não-apoiados os cabos *RA* e *EA* aumentaram enquanto o *RF* e o *EF* diminuíram.

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Tabela 5.13.: Valores dos coeficientes de atrito médios otimizados e respectivos erros máximos, mínimos e médios dos valores obtidos experimentalmente.

<i>Cabo</i>	AP				NAP			
	$\bar{\mu}_{optm}$	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$	$\bar{\mu}_{optm}$	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$
<i>RA</i>	0,147	9,8	-11,4	3,4	0,146	4,7	-10,4	2,6
<i>RF</i>	0,224	14,6	-17,8	11,1	0,210	13,3	-13,3	7,3
<i>EA</i>	0,129	8,9	-12,0	4,6	0,124	18,6	-15,3	6,4
<i>EF</i>	0,127	6,5	-11,2	5,7	0,126	5,5	-9,3	3,2

É também possível observar que, como seria de esperar, os coeficientes de atrito são superiores para os ensaios apoiados em relação aos não-apoiados. Tal deve-se à liberdade que o cabo tem de se adaptar geometricamente a uma forma menos resistente ao movimento no caso de não estar apoiado. Na prática, esta liberdade traduz-se numa forte vibração do cabo na inversão do movimento.

Comparando os valores obtidos entre cabos, pode-se concluir desde já que o cabo *RF* tem um coeficiente de atrito consideravelmente mais elevado do que os restantes. Já os cabos *EA* e *EF* aparentam ter um melhor desempenho devido ao seu coeficiente de atrito ser ligeiramente inferior evidenciando-se mais na situação em que não está apoiado.

Outras tentativas de optimização do coeficiente de atrito foram realizadas recorrendo a formulas empíricas e a funções de optimização. Estas são apresentadas no Anexo F devido aos valores obtidos não apresentarem resultados relevantes com excepção do caso apresentado na Tabela 5.14. Este, para o caso de ensaios não-apoiados, apresenta um resultado interessante. Para o tipo de corda 1x19, ou seja, do tipo *A*, o coeficiente *d* toma exactamente o mesmo valor de -0,027 enquanto que para os de tipo *F*, ou seja, corda 7x7, os valores são muito semelhantes sendo 0,039 para o cabo *RF* e 0,034 para o *EF*. Este coeficiente *d* quantifica uma dependência da força resistente aplicada. Por outro lado, os valores destes coeficientes quando comparados com o coeficiente *a* correspondente ao coeficiente de atrito, têm um peso pouco significativo. Precisamente por este motivo, o efeito na diminuição dos erros máximo e mínimo é, também, muito reduzido. Contudo, a coerência dos coeficientes é de tal ordem que este modelo merece um estudo mais aprofundado embora tal não tenha sido possível no período deste trabalho ficando assim como sugestão para um trabalho futuro.

Tendo em conta o valor optimizado do coeficiente de atrito para os cabos em questão é possível definir as curvas de atrito em função do ângulo para cada um destes valores a partir da lei exponencial já apresentada, (equação (5.1)).

De forma a não tornar a análise de resultados demasiado extensa, optou-se por

Tabela 5.14.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + d \cdot F}$.

<i>Cabo</i>	AP				NAP			
	a	d	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	a	d	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$
<i>RA</i>	0,147	-0,003	9,8	-11,4	0,152	-0,027	4,4	-10,1
<i>RF</i>	0,206	0,077	12,6	-19,4	0,201	0,039	12,9	-13,0
<i>EA</i>	0,121	0,037	8,2	-12,1	0,130	-0,027	18,8	-15,5
<i>EF</i>	0,114	0,057	6,6	-8,9	0,118	0,034	4,8	-8,3

apresentar o tratamento de resultados apenas para o tipo de cabo *RA* sendo os restantes resultados apresentados no Anexo G.

Cabos Apoiados

Como já foi apresentado na Tabela 5.13, o valor optimizado do coeficiente de atrito para um cabo *RA* apoiado, μ_{RA}^{AP} , é 0,147. A partir deste valor pode-se definir as curvas da evolução das forças motora e resistente em função do ângulo da geometria para uma determinada carga aplicada. As Figuras 5.4 e 5.5 representam, respectivamente, o valor destas forças para os movimentos ascendente e descendente. Em simultâneo são também representados os valores obtidos experimentalmente apresentados na Tabela 5.3.

Na Tabela 5.15 são apresentados os valores numéricos pertencentes às curvas das figuras anteriores correspondentes aos ensaios experimentais realizados enquanto na Tabela 5.16 estão apresentados todos os erros dos valores experimentais relativamente ao valor numérico. O erro máximo, em valor absoluto, de 11,4% ocorre para o caso de 360° e raio 200mm no movimento ascendente. No entanto, a média dos erros, em valor absoluto, é de 3,4% que é um valor bastante razoável.

Tabela 5.15.: Valores numéricos das forças motora e resistente para o cabo *RA* apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

<i>Ângulo</i>	$\mu = 0,147$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	41,00	25,86	66,11	41,70	97,68	61,61
180	51,62	20,54	83,24	33,11	123,00	48,93
360	81,84	12,95	131,97	20,89	195,01	30,86

Movimento Ascendente (Up)

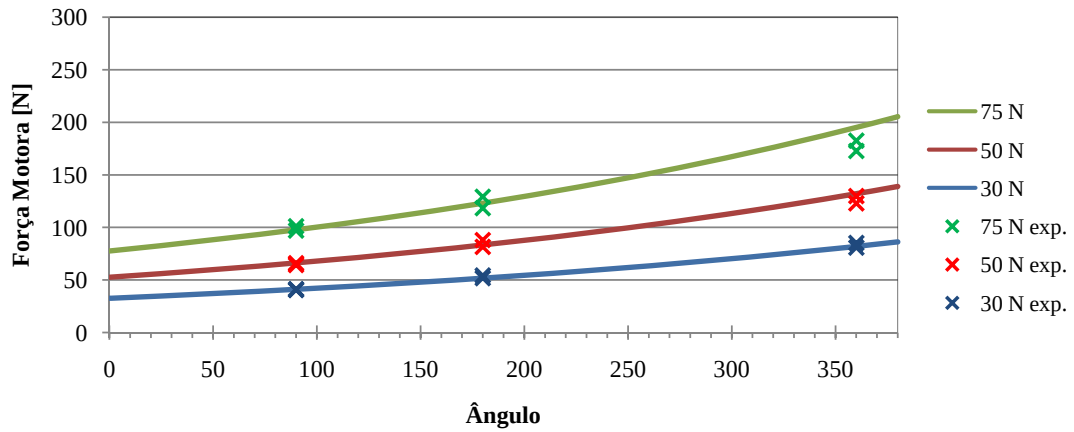


Figura 5.4.: Força motora no movimento ascendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

Movimento Descendente (Dw)

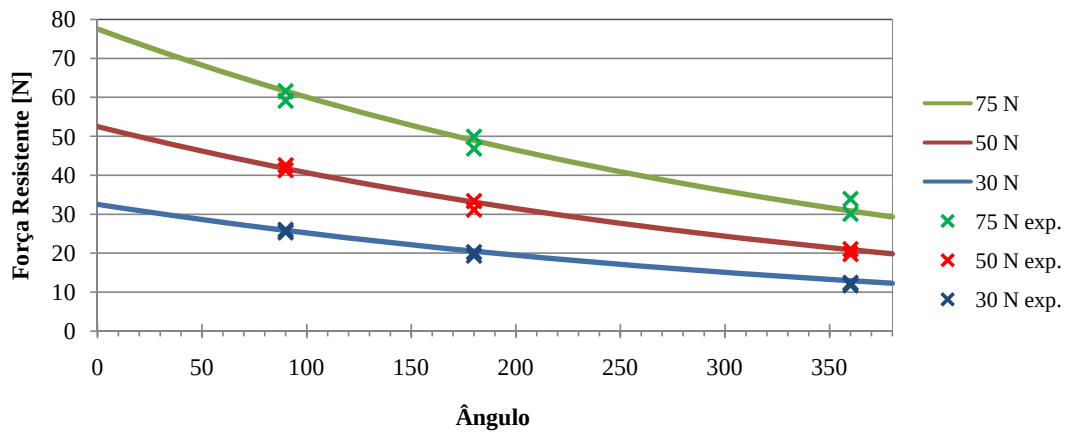


Figura 5.5.: Força resistente no movimento descendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

Tabela 5.16.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

Ensaio	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		erro [%]		50N		erro [%]		75N		erro [%]	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	40,42	26,00	-1,4	0,6	64,22	42,59	-2,9	2,1	101,03	59,13	3,4	-4,0
90R300	41,35	25,38	0,0	-1,8	65,95	41,36	-0,2	-0,8	96,90	61,59	-0,8	0,0
180R200	54,23	19,40	5,1	-5,5	87,95	31,19	5,7	-5,8	129,14	46,88	5,0	-4,2
180R300	51,73	20,27	0,2	-1,3	81,41	33,38	-2,2	0,8	118,25	49,89	-3,9	2,0
360R200	85,19	11,77	4,1	-9,1	122,76	21,04	-7,0	0,7	172,72	33,90	-11,4	9,8
360R300	80,83	12,41	-1,2	-4,2	129,73	19,77	-1,7	-5,3	182,53	30,11	-6,4	-2,4

Cabos Não-Apoiados

Tal como foi realizado para os ensaios apoiados, também nos não-apoiados foram definidas as curvas da evolução das forças motora e resistente em função da geometria para cada carga aplicada. Assim, para um valor de coeficiente de atrito μ_{RA}^{NAP} de 0,146 para cabos *RA* não apoiados, obtem-se as representação gráficas ilustradas nas Figuras 5.6 e 5.7 respectivamente para os movimentos ascendente e descendente. Nestas figuras também são representados os valores obtidos experimentalmente apresentados na Tabela 5.4.

Movimento Ascendente (Up)

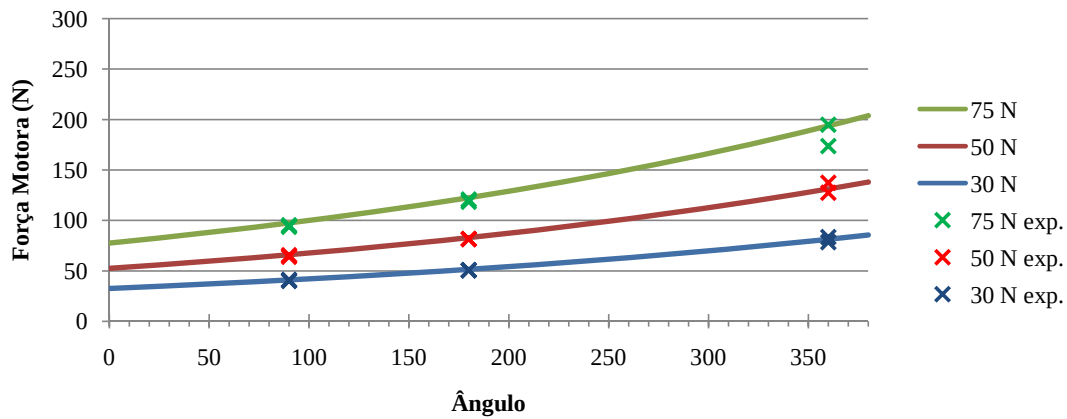


Figura 5.6.: Força motora no movimento ascendente para o cabo *RA* não-apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

Movimento Descendente (Dw)

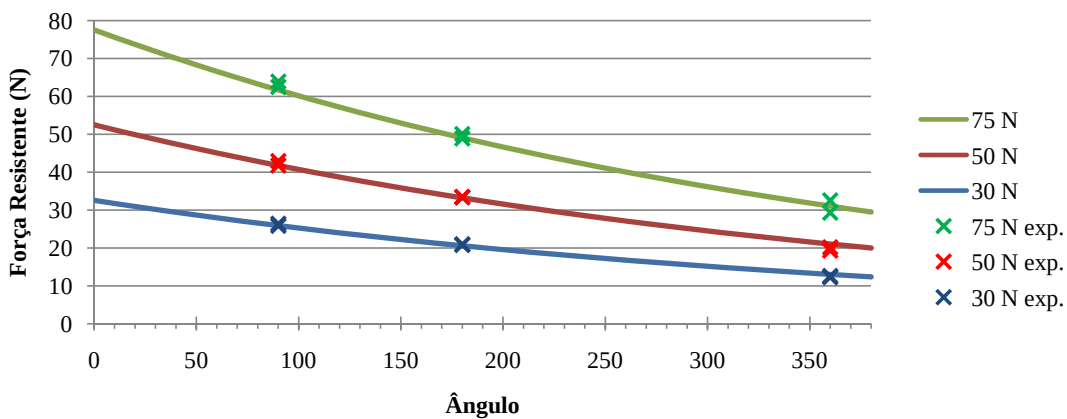


Figura 5.7.: Força resistente no movimento descendente para o cabo *RA* não-apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Tabela 5.17.: Valores numéricos das forças motora e resistente para o cabo RA não-apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,146$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	40,93	25,90	66,00	41,76	97,53	61,71
180	51,46	20,60	82,98	33,22	122,61	49,09
360	81,33	13,03	131,14	21,02	193,79	31,06

Tabela 5.18.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA não-apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> [%]		50N		<i>erro</i> [%]		75N		<i>erro</i> [%]	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	39,99	26,38	-2,3	1,9	63,95	42,90	-3,1	2,7	93,60	63,89	-4,0	3,5
90R300	40,99	25,84	0,1	-0,2	65,56	41,73	-0,7	-0,1	95,25	62,48	-2,3	1,2
180R200	50,82	20,80	-1,2	1,0	81,39	33,44	-1,9	0,7	118,44	50,03	-3,4	1,9
180R300	50,45	20,98	-2,0	1,8	81,67	33,33	-1,6	0,3	120,66	48,89	-1,6	-0,4
360R200	83,41	12,25	2,6	-6,0	137,24	19,29	4,6	-8,2	194,95	29,30	0,6	-5,7
360R300	78,41	12,59	-3,6	-3,4	127,30	20,14	-2,9	-4,2	173,66	32,50	-10,4	4,6

Da mesma forma que no caso dos ensaios apoiados, também aqui se apresenta na Tabela 5.17 os valores numéricos pertencentes às curvas das figuras anteriores correspondentes aos ensaios experimentais realizados, enquanto que na Tabela 5.18 estão apresentados todos os erros dos valores experimentais relativamente ao valor numérico. O erro máximo, em valor absoluto, de 10,4% ocorre para o caso de 360° e raio 300mm no movimento ascendente. No entanto, a média dos erros, em valor absoluto, é de 2,6%.

Os mesmos resultados, tanto para ensaios apoiados como para não-apoiados, para os tipos de cabo RF , EA e EF encontram-se, como já foi referido, no Anexo G. Porém, na Tabela 5.19 apresenta-se de uma forma sintética os ensaios em que se obteve o maior erro relativo e respectivo valor para cada tipo de cabo, tanto na situação de apoiado como não-apoiado.

Dois aspectos interessantes podem ser tirados da análise desta tabela, por um lado, a maioria dos erros máximos têm valor negativo. Isto significa que, esporadicamente, surgem cabos com um desempenho superior ao médio observado. Por outro lado, parece haver uma tendência de que o erro máximo ocorre para ensaios com ângulos elevados e no sentido ascendente. Tal pode dever-se à lei exponencial do modelo teórico implicar um aumento de declive da curva com o aumento do ângulo o que faz com que uma pequena variação deste último implique uma variação elevada da força em causa.

Tabela 5.19.: Ensaios onde ocorre o erro relativo máximo (em valor absoluto).

	AP		NAP	
<i>Cabo</i>	<i>Ensaio</i>	e_{max} [%]	<i>Ensaio</i>	e_{max} [%]
<i>RA</i>	360R200P75Up	-11,4	360R300P75Up	-10,4
<i>RF</i>	360R200P50Up	-17,8	180R200P30Up 180R200P30Dw	$\pm 13,3$
<i>EA</i>	360R200P30Up	-12,0	180R300P30Dw	18,6
<i>EF</i>	360R300P30Up	-11,2	180R300P50Dw	-9,3

Convém ter em conta que, embora se tenham erros máximos entre os 10 e os 20%, os erros médios observados são, em geral, inferiores a 7% com excepção do cabo *RF* com erros médios de cerca de 10%.

Fica também a nota que o cabo *RA* é bastante consistente nos resultados apresentando valores muito semelhantes tanto entre apoiado e não-apoiado, como entre valores médios e valores otimizados. Este tipo de cabo é, por isso, uma boa opção para estudar o efeito das diferentes variáveis no valor do coeficiente de atrito.

5.4. Lay-outs Complexos

Os *lay-outs complexos* consistem em montagens compostas por dois ou mais *lay-outs simples*, isto é, montagens compostas por vários arcos de círculo. Apresenta-se assim, desde já, na Figura 5.8, algumas montagens realizadas para o estudo deste tipo de *lay-out*. Como se pode observar, foram estudados três tipos diferentes sendo os restantes derivados destes:

- Tipo **S** – constituído por dois arcos de 180° perfazendo um total teórico de 360° . Os seus raios podem ser diferentes;
- Tipo **3C** – semelhante ao Tipo **S** mas com mais um arco de 180° perfazendo um total teórico de 540° ;
- Tipo **D** – constituído por dois arcos de 90° perfazendo um total teórico de 180° . Os seus raios são iguais e pode ter um troço recto entre os dois arcos.

A nomenclatura destes ensaios são, assim, ligeiramente diferentes dos anteriores. Ao invés de se especificar o ângulo e o raio do ensaio, refere-se o seu tipo e os raios dos vários arcos. Caso os raios sejam iguais, podem ser identificados do tipo “2xraio”, caso contrário é conveniente uma identificação do tipo “Braio₁Araio₂” para os ensaios com dois arcos ou “Braio₁raio₂raio₃A” para os com três. As letras *A* e *B* identificam o extremo da carga aplicado e do cilindro respectivamente.

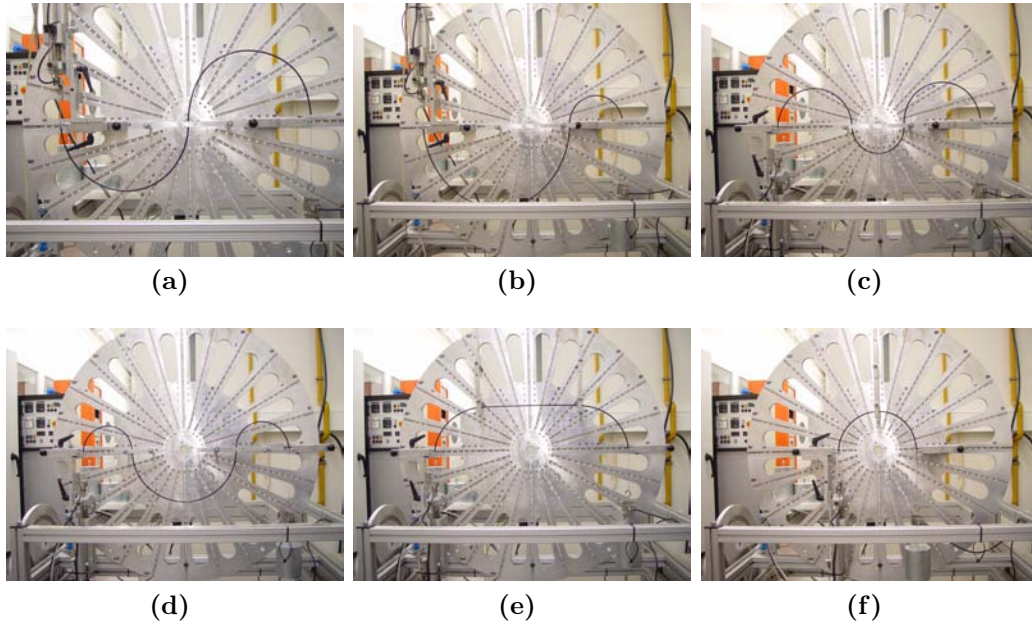


Figura 5.8.: Alguns *lay-outs* complexos estudados: a) **S2x200**; b) **SB300A100**; c) **3CB150100150A**; d) **3CB100200100A**; e) **D2x160 + 400**; f) **D2x150 + 0**.

Desta forma, pretende-se nesta secção verificar se o modelo teórico pode ser aplicado a este tipo de *lay-outs* e se apresenta tão bons resultados como para os *lay-outs* simples.

5.4.1. Plano de Ensaios para *Lay-outs* Complexos

Para este tipo de *lay-out*, o banco de ensaios não está preparado para realizar ensaios apoiados. Não só pela inexistência de *rodela de apoio* do mesmo tamanho como a própria estrutura não permite o seu suporte. Por este motivo, os ensaios realizados foram todos não apoiados tendo sido apenas imposta a condição de o cabo passar obrigatoriamente por certos pontos de modo a definir o *lay-out* desejado.

Por fim, tal como nos ensaios anteriores, o plano de ensaios seleccionado consiste na repetitibilidade de todos os ensaios para as três cargas e para os quatro tipos de cabo à excepção dos ensaios **3C** e dois do tipo **S**. Estes últimos foram realizados apenas para o cabo *EA* numa fase inicial do estudo deste tipo de *lay-out* e enquanto os do tipo **3C** se mostraram demasiado exigentes para as capacidades do sistema, os do tipo **S** eram muito semelhantes a outros realizados. Porém, os seus resultados são apresentados juntamente com os restantes. A Tabela 5.20 mostra o plano de ensaios seguido.

Tabela 5.20.: Plano de ensaios para *lay-outs complexos*.

<i>Tipo</i>	<i>Raio [mm]</i>	<i>Cabo</i>	Carga [<i>N</i>]			
			30/50/75			
			F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}
S	2x150	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
	<i>B300A100</i>	<i>EA</i>				
	<i>B200A100</i>	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
	<i>A300B100</i>	<i>EA</i>				
3C	<i>B3x100A</i>	<i>EA</i>				
	<i>B150100150A</i>	<i>EA</i>				
	<i>B100200100A</i>	<i>EA</i>				
	<i>B100150150A</i>	<i>EA</i>				
D	2x160+400	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				
	2x150+0	<i>RA</i> <i>RF</i> <i>EA</i> <i>EF</i>				

5.4.2. Resultados

A Tabela 5.21 apresenta os resultados das forças motoras e resistentes.

Da análise dos resultados pode-se confirmar que o ensaio **3C** é bastante exigente para o sistema actuador de cabos na medida em que apenas um deles pode ser considerado como válido à carga de 50*N* e nenhum à de 75*N*. Por este motivo, este tipo de ensaio não foi realizado para os restantes tipos de cabo.

Também verificou-se que nos ensaios complexos há uma maior facilidade de a bainha ceder e escorregar através do apoio dos cabos invalidando o ensaio. Este fenómeno aconteceu não só nos ensaios que não apresentam qualquer resultado, mas também no final de alguns outros embora nesses tenha sido possível estimar um valor médio como foi no caso de alguns ensaios **S**. Foi também por este motivo e devido à sua irregularidade que se decidiu desprezar os resultados a 75*N* dos ensaios **S** do tipo de cabo *EA*. A título de exemplo, repare-se nos dois ensaios **S2x150** deste

Tabela 5.21.: Resultados das forças motoras e resistentes para os ensaios com *lay-outs* complexos.

		Carga															
		30 N						50 N						75 N			
Cabo	$\Sigma \hat{A}ng.$	Ensaio	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}			
RA	180	D2x160 + 400 D2x150 + 0	54,62 52,16	19,35 20,38	32,57 32,61	32,50 32,58	89,90 85,40	30,14 32,21	52,56 52,60	52,49 52,58	126,23 126,22	47,29 48,08	77,66 77,77	77,58 77,71			
	360	S2x150 SB200A100	70,17 80,22	14,08 12,72	32,61 32,63	32,55 32,59	121,28 134,03	21,41 19,32	52,61 52,60	52,54 52,56	— — — 179,01	— — — 31,93	— — — 77,75	— — — 77,72			
	180	D2x160 + 400 D2x150 + 0	66,08 64,64	15,44 16,34	32,56 32,66	32,49 32,64	116,14 103,63	22,70 25,96	52,55 52,65	52,48 52,61	167,57 154,85	35,13 37,36	77,70 77,78	77,64 77,75			
RF	360	S2x150 SB200A100	99,59 113,10	9,96 8,78	32,57 32,69	32,57 32,64	167,24 207,28	15,27 12,98	52,57 52,69	52,54 52,62	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —			
	180	D2x160 + 400 D2x150 + 0	50,25 48,70	21,12 21,85	32,61 32,66	32,54 32,65	82,98 80,40	33,16 33,91	52,60 52,62	52,46 52,61	126,33 119,32	47,33 49,81	77,79 77,73	77,62 77,72			
		S2x150	67,06 66,61	15,00 15,30	32,62 32,61	32,58 32,55	116,84 117,95	22,37 22,33	52,62 52,62	52,57 52,53	164,36 208,69	34,59 28,67	77,77 77,80	77,70 77,66			
EA	360	SB300A100 SB200A100 SA300B100	77,63 77,10 63,20	12,54 12,94 16,54	32,70 32,68 32,85	32,52 32,64 32,83	131,39 134,35 104,45	19,88 19,25 25,84	52,79 52,67 52,82	52,51 52,63 52,81	196,25 209,45 167,22	29,99 26,38 37,39	77,96 77,81 78,00	77,52 77,69 77,90			
		3CB3x100A	107,90	8,83	32,83	32,36	168,91	14,98	52,71	52,40	— — —	— — —	— — —	— — —			
	540	3CB150100150A 3CB100200100A 3CB100150150A	113,12 118,57 115,30	8,50 8,05 8,09	32,62 32,60 32,60	32,57 32,43 32,47	212,59 — — — — — —	10,21 — — — — — —	52,65 — — — — — —	52,60 — — — — — —	— — — — — — — — —	— — — — — — — — —	— — — — — — — — —	— — — — — — — — —			
EF	180	D2x160 + 400 D2x150 + 0	50,89 51,49	20,44 20,52	32,56 32,74	32,51 32,72	82,27 83,41	32,77 32,50	52,56 52,72	52,49 52,71	122,52 124,11	47,61 47,38	77,70 77,88	77,64 77,85			
	360	S2x150 SB200A100	75,99 72,70	12,84 13,64	32,67 32,67	32,62 32,64	124,10 117,07	20,04 21,48	52,66 52,68	52,56 52,62	178,57 183,41	31,10 31,47	77,78 77,80	77,74 77,74			

Tabela 5.22.: Resultados das forças de atrito para os ensaios complexos.

Cabo	$\Sigma \hat{Ang.}$	Ensaio	Carga					
			30 N		50 N		75 N	
			F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}	F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}	F_{at}^{up}	F_{at}^{dw}
RA	180	D2x160 + 400	22,05	13,15	37,34	22,35	48,57	30,30
		D2x150 + 0	19,55	12,20	32,79	20,37	48,45	29,64
	360	S2x150	37,56	18,48	68,67	31,13	— — —	— — —
		SB200A100	47,59	19,87	81,43	33,24	101,25	45,79
RF	180	D2x160 + 400	33,51	17,05	63,59	29,77	89,86	42,51
		D2x150 + 0	31,98	16,30	50,98	26,65	77,07	40,39
	360	S2x150	67,02	22,61	114,67	37,27	— — —	— — —
		SB200A100	80,41	23,86	154,60	39,64	— — —	— — —
EA	180	D2x160 + 400	17,64	11,42	30,39	19,30	48,54	30,29
		D2x150 + 0	16,05	10,80	27,78	18,70	41,59	27,90
	360	S2x150	34,44	17,58	64,21	30,20	86,60	43,10
			33,99	17,24	65,33	30,20	130,89	48,99
		SB300A100	44,93	19,98	78,60	32,63	118,28	47,54
		SB200A100	44,42	19,70	81,68	33,37	131,64	51,31
		SA300B100	30,35	16,29	51,63	26,97	89,22	40,51
	540	3CB3x100A	75,06	23,53	116,20	37,41	— — —	— — —
		3CB150100150A	80,50	24,07	159,94	42,39	— — —	— — —
		3CB100200100A	85,97	24,38	— — —	— — —	— — —	— — —
		3CB100150150A	82,70	24,38	— — —	— — —	— — —	— — —
EF	180	D2x160 + 400	18,33	12,07	29,70	19,72	44,82	30,04
		D2x150 + 0	18,76	12,20	30,69	20,21	46,24	30,47
	360	S2x150	43,32	19,78	71,44	32,52	100,78	46,64
		SB200A100	40,03	19,01	64,39	31,13	105,61	46,27

cabo. Como se pode observar, os seus resultados são muito semelhantes e coerentes tanto a 30N como a 50N porém, a 75 os seus resultados são significativamente diferentes apresentando uma diferença de força motora ascendente superior a 40N. Sem saber qual destes ensaios foi influenciado e como os restantes resultados dos ensaios do tipo **S** apresentam resultados dispares, decidiu-se assim, conforme já referido, não considerar para efeitos de cálculo de valores médios, os ensaios do tipo **S** a 75N do cabo *EA*.

Tal como realizado para os *lay-outs simples*, determinaram-se as forças e os coeficientes de atrito pela formulação descrita previamente sendo os respectivos resultados apresentados nas Tabelas 5.22 e 5.23.

Estes resultados permitiram recalculer os valores médios do coeficiente de atrito para cada cabo, em que foram considerados tanto os valores da Tabela 5.23 como da 5.9 obtendo-se assim os valores médios apresentados na Tabela 5.24.

5. Plano de Ensaios e Resultados Experimentais

Tabela 5.23.: Resultados dos coeficientes de atrito para os ensaios complexos.

<i>Cabo</i>	$\Sigma \hat{Ang.}$	<i>Raio</i>	Carga					
			30 N		50 N		75 N	
			μ^{up}	μ^{dw}	μ^{up}	μ^{dw}	μ^{up}	μ^{dw}
RA	180	D2x160 + 400	0,165	0,165	0,171	0,177	0,155	0,158
		D2x150 + 0	0,150	0,149	0,154	0,156	0,154	0,153
	360	S2x150	0,122	0,133	0,133	0,143	— — —	— — —
		SB200A100	0,143	0,150	0,149	0,159	0,133	0,142
RF	180	D2x160 + 400	0,225	0,237	0,252	0,267	0,245	0,252
		D2x150 + 0	0,217	0,220	0,216	0,225	0,219	0,233
	360	S2x150	0,178	0,189	0,184	0,197	— — —	— — —
		SB200A100	0,198	0,209	0,218	0,223	— — —	— — —
EA	180	D2x160 + 400	0,138	0,138	0,145	0,146	0,154	0,158
		D2x150 + 0	0,127	0,128	0,135	0,140	0,136	0,142
	360	S2x150	0,115	0,123	0,127	0,136	0,119	0,129
			0,114	0,120	0,129	0,136	0,157	0,159
		SB300A100	0,138	0,152	0,145	0,155	0,147	0,151
		SB200A100	0,137	0,147	0,149	0,160	0,158	0,172
		SA300B100	0,104	0,109	0,109	0,114	0,121	0,117
	540	3CB3x100A	0,126	0,138	0,124	0,133	— — —	— — —
		3CB150100150A	0,132	0,143	0,148	0,174	— — —	— — —
		3CB100200100A	0,137	0,148	— — —	— — —	— — —	— — —
		3CB100150150A	0,134	0,147	— — —	— — —	— — —	— — —
EF	180	D2x160 + 400	0,142	0,148	0,143	0,150	0,145	0,156
		D2x150 + 0	0,144	0,149	0,146	0,154	0,148	0,158
	360	S2x150	0,134	0,148	0,136	0,154	0,132	0,146
		SB200A100	0,127	0,139	0,127	0,143	0,137	0,144

Tabela 5.24.: Coeficientes de atrito médios globais para cada tipo de cabo, respectivos desvios padrões e erros máximo, mínimo e médio.

<i>Cabo</i>	$\bar{\mu}$	<i>D.P.</i>	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$
RA	0,145	0,012	8,7	−13,1	3,5
RF	0,221	0,027	22,7	−23,7	7,3
EA	0,126	0,021	19,5	−18,7	7,8
EF	0,136	0,012	11,0	−14,8	4,1

Tabela 5.25.: Valores dos coeficientes de atrito médios otimizados e respectivos erros máximos, mínimos e médios das forças experimentais face ao respectivo valor numérico considerando apenas *lay-outs simples* (Tabela 5.13) e *lay-outs simples + complexos*.

<i>Cabo</i>	<i>lay simples</i>				<i>lay simples+complexos</i>			
	$\bar{\mu}$	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$	$\bar{\mu}$	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$
<i>RA</i>	0,146	4,7	-10,4	2,6	0,146	8,4	-13,6	3,5
<i>RF</i>	0,210	13,3	-13,3	7,3	0,210	14,5	-18,1	7,1
<i>EA</i>	0,124	18,6	-15,3	6,4	0,132	21,3	-17,2	7,3
<i>EF</i>	0,126	5,5	-9,3	3,2	0,133	8,9	-13,1	4,2

Tal como nos *lay-outs simples*, também para estes resultados foi feita uma optimização dos resultados no *Matlab* através de uma minimização dos mínimos quadrados dos erros das forças obtidas experimentalmente face ao valor da força numérica obtida a partir do coeficiente de atrito optimizado. A Tabela 5.25 apresenta estes coeficientes de atrito e os respectivos erros máximos e mínimos.

Verifica-se assim que, por um lado, os valores optimizados dos ensaios incluindo os *lay-outs complexos* são muito semelhantes (sendo mesmo iguais para os cabos *RA* e *RF*) aos ensaios apenas com *lay-outs simples* não-apoiados muito embora os erros máximos sejam mais elevados devido à maior dispersão de resultados. Por outro lado, a optimização dos valores médios da Tabela 5.24 não foi tão eficaz como a dos ensaios simples havendo mesmo alguns casos em que os erros máximos aumentaram.

Interessante também é o facto de os erros máximos, em valor absoluto, continuarem a ser negativos (à excepção do cabo *RF*) tanto para o coeficiente de atrito médio como após a optimização dos mesmos. Isto vem comprovar que, como já foi referido, esporadicamente surge um cabo com um desempenho superior à média.

Quanto ao valor relativo dos coeficientes de atrito, verifica-se o que já tinha sido dito na Secção 5.3: o cabo *RF* é claramente o que apresenta o coeficiente de atrito mais elevado enquanto que os cabos *EA* e *EF* são os que apresentam os coeficientes de atrito mais baixos, tendo praticamente o mesmo valor.

Tal como foi feito para os *lay-outs simples*, define-se de seguida as curvas de atrito em função do ângulo para os valores optimizados do coeficiente de atrito para o cabo *RA* a partir da lei exponencial já apresentada (equação (5.1)). As curvas para os restantes tipo de cabo são apresentadas no Anexo H.

Assim, para o valor optimizado do cabo *RA* ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$), pode-se definir as curvas da evolução das forças motora e resistente em função do somatório dos ângulos do *lay-out* para uma determinada carga aplicada. As Figuras 5.9 e 5.10 representam, respectivamente, o valor destas forças para os movimentos ascendente

Movimento Ascendente (Up)

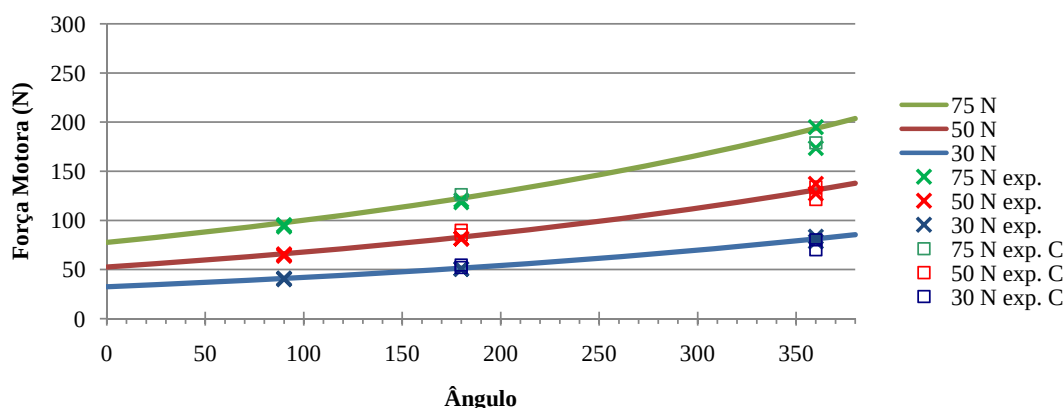


Figura 5.9.: Força motora no movimento ascendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

Movimento Descendente (Dw)

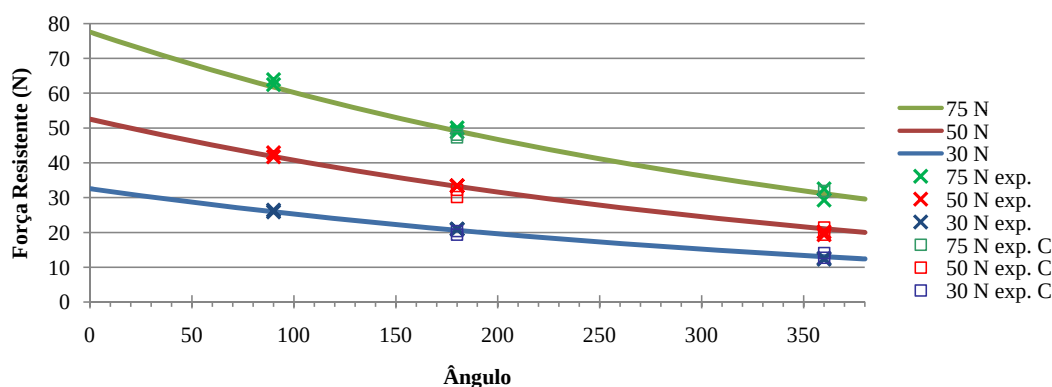


Figura 5.10.: Força resistente no movimento descendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

e descendente. Ao mesmo tempo são também representados os valores obtidos experimentalmente apresentados na Tabela 5.21.

Na Tabela 5.26 são apresentados os valores numéricos pertencentes às curvas das figuras anteriores correspondentes aos ensaios experimentais realizados. Repare-se que não há distinção entre ensaios simples e complexos. Do modelo teórico tem-se que as forças são função do somatório dos ângulos que compõem o *lay-out*, ou seja, um ensaio do tipo **S** é, para todos os efeitos, um ensaio a 360° .

Por outro lado, na Tabela 5.27, estão apresentados todos os erros dos valores experimentais relativamente ao valor numérico. O erro máximo, em valor absoluto, de 13,6% ocorre para o ensaio **S2x150** no movimento ascendente para uma carga

Tabela 5.26.: Valores numéricos das forças motora e resistente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,146$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	40,92	25,91	65,98	41,77	97,50	61,73
180	51,43	20,61	82,92	33,24	122,54	49,12
360	81,23	13,05	130,98	21,04	193,54	31,10

Tabela 5.27.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente									
	30N		<i>erro</i> [%]		50N		<i>erro</i> [%]		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	39,99	26,38	-2,3	1,8	63,95	42,90	-3,1	2,7	93,60	63,89
90R300	40,99	25,84	0,2	-0,3	65,56	41,73	-0,6	-0,1	95,25	62,48
180R200	50,82	20,80	-1,2	0,9	81,39	33,44	-1,9	0,6	118,44	50,03
180R300	50,45	20,98	-1,9	1,8	81,67	33,33	-1,5	0,3	120,66	48,89
D2x160+400	54,62	19,35	6,2	-6,1	89,90	30,14	8,4	-9,3	126,23	47,29
D2x150+0	52,16	20,38	1,4	-1,1	85,40	32,21	3,0	-3,1	126,22	48,08
360R200	83,41	12,25	2,7	-6,1	137,24	19,29	4,8	-8,3	194,95	29,30
360R300	78,41	12,59	-3,5	-3,5	127,30	20,14	-2,8	-4,3	173,66	32,50
S2x150	70,17	14,08	-13,6	7,9	121,28	21,41	-7,4	1,7	— — —	— — —
SB200A100	80,22	12,72	-1,2	-2,5	134,03	19,32	2,3	-8,2	179,01	31,93

de 30N. No entanto, a média dos erros, em valor absoluto, aumenta apenas uma décima face aos resultados dos ensaios simples não-apoiados para o valor de 3,5% que é um valor bastante razoável.

Os mesmos resultados, tanto para ensaios apoiados como para não-apoiados, para os tipos de cabo RF , EA e EF encontram-se, como já foi referido, no Anexo H. Porém, na Tabela 5.28 apresenta-se de uma forma sintética os ensaios em que se obteve o maior erro relativo e respectivo valor para cada tipo de cabo.

Tabela 5.28.: Ensaios onde ocorre o erro relativo máximo (em valor absoluto).

<i>Cabo</i>	<i>Ensaio</i>	e_{max} [%]
RA	S2x150	-13,6
RF	S2x150	-18,1
EA	180R300P30Dw	21,2
EF	360R300P30Up	-13,1

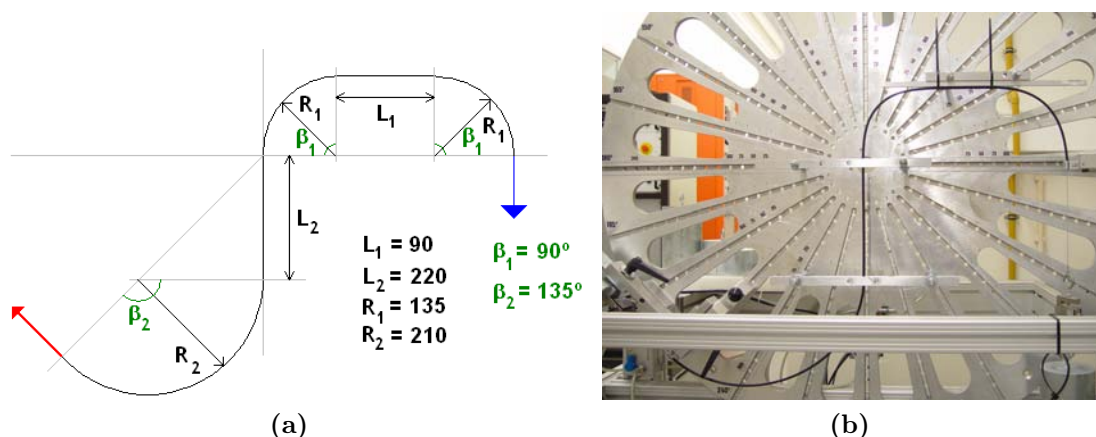


Figura 5.11.: *Lay-out* de um ensaio **TF**: a) Representação esquemática; b) Fotografia do *lay-out*.

5.5. Validação do modelo

Após a determinação dos coeficientes de atrito para cada cabo, realizou-se um ensaio denominado **TF** para todos os tipos de cabo que não é mais do que um *lay-out complexo* constituído por três arcos de círculo e dois troços rectos. As Figuras 5.11a e 5.11b mostram, respectivamente, um esquema detalhado da montagem realizada e uma fotografia de um ensaio deste tipo.

Como foi dito, estes ensaios serviram exclusivamente para verificar o modelo apresentado e, por isso, os seus resultados não intervieram na determinação dos coeficientes de atrito. Ao invés disso, determinaram-se os erros das forças obtidas, relativas ao valor correspondente a 315° para os coeficientes de atrito apresentados na Tabela 5.25. Na Tabela 5.29 são apresentados os valores das forças obtidas e os correspondentes erros.

Para que se entenda, o procedimento adoptado para estes ensaios foi ligeiramente diferente ao aplicado anteriormente. Desta forma, realizaram-se dois ensaios consecutivos a $50N$ com o mesmo cabo e, posteriormente, realizaram-se os ensaios com as três cargas para um novo cabo à excepção do cabo *RF*. Da análise dos resultados pode-se observar que os resultados são muito satisfatórios, nomeadamente para os tipos de cabo *RA* e *EF* assim como para o segundo ensaio *RF*. Quanto ao cabo *EA*, este apresentou resultados menos bons, regularmente elevados na ordem dos 15 a 20%, embora estes se enquadrem dentro do intervalo de erros máximo e mínimo da Tabela 5.25 apresentada na secção anterior.

Do mesmo modo como foi feito para os *lay-outs simples* e para os *lay-outs complexos*, pode-se representar os valores obtidos experimentalmente nas curvas das forças motora e resistente obtidas com o modelo teórico. A título de exemplo

Tabela 5.29.: Erros dos valores experimentais das forças dos ensaios **TF** relativos ao valor numérico correspondente determinado a partir do modelo teórico apresentado para os coeficientes de atrito da Tabela 5.25.

Cabo	Carga											
	30N		erro [%]		50N		erro [%]		75N		erro [%]	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_R^{up}	F_M^{dw}
RA					109,54	23,91	-5,8	0,9				
					118,45	22,17	1,9	-6,5				
	72,56	14,14	0,6	-3,8	111,22	23,87	-4,3	0,7	158,36	36,15	-7,8	3,2
RF					136,58	17,88	-22,8	14,8				
					156,16	15,96	-11,8	2,5				
EA					113,97	23,01	8,1	-12,0				
					126,8	21,01	20,3	-19,7				
	74,23	13,43	13,6	-17,2	126,68	20,68	20,2	-20,9	179,19	32,03	15,0	-17,1
EF					106,29	24,52	-4,3	-1,2				
					110,88	23,38	-0,1	-5,8				
	71,04	13,94	3,2	-9,4	113,67	22,92	2,4	-7,7	166,20	34,96	1,3	-4,7

representam-se aqui as curvas relativas aos movimentos ascendente (Figura 5.12) e descendente (Figura 5.13) correspondentes ao cabo *RA* estando as restantes disponíveis no Anexo I.

5.6. Comparação dos Cabos

Nas secções anteriores compararam-se as curvas de atrito para diferentes cargas para um mesmo tipo de cabo. Mas, para uma melhor distinção dos cabos, pode-se observar estas curvas nas mesmas condições para as diferentes combinações corda/bainha. A sua evolução é função do coeficiente de atrito optimizado definido anteriormente e, por isso, é por demais evidente que o desempenho tribológico do cabo será tanto melhor quanto mais baixo for este valor. Porém, este tipo de representação permite uma melhor percepção da influência destes valores para além de uma mais fácil comparação dos valores experimentais dos diferentes tipos de cabo nas mesmas condições de ensaio.

Também aqui será considerado apenas um exemplo, sendo os restantes resultados apresentados no Anexo J. Tome-se assim como exemplo o caso em que os cabos são solicitados por uma carga de 30N.

A Figura 5.14 é representativa do movimento ascendente enquanto que a 5.15 retrata o movimento descendente. Ao analisá-las, é de fácil compreensão que a combinação *RF* tem um rendimento inferior quando comparado com os restantes cabos. Por sua vez, os cabos com melhor desempenho são o *EA* e o *EF* apresentando um desempenho muito semelhante chegando a ser muito difícil a sua distinção.

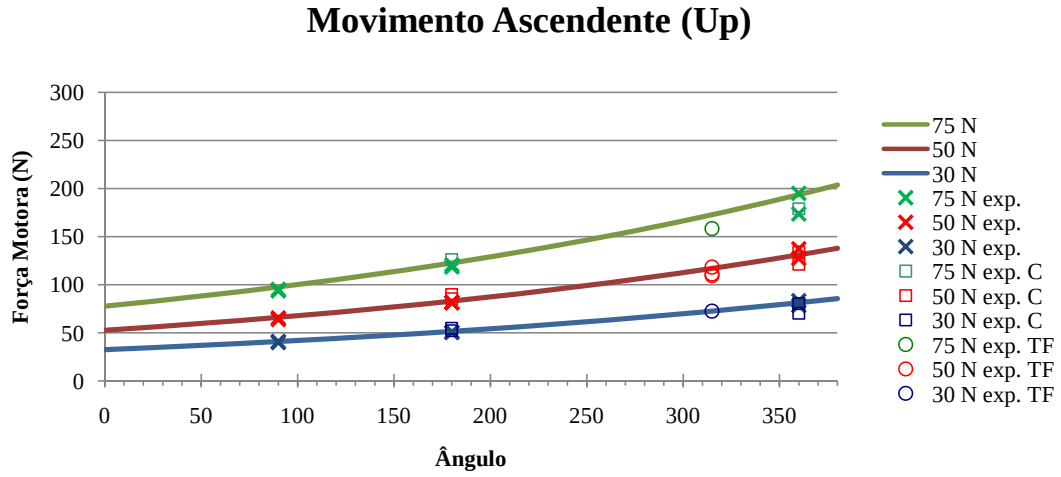


Figura 5.12.: Força motora no movimento ascendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.

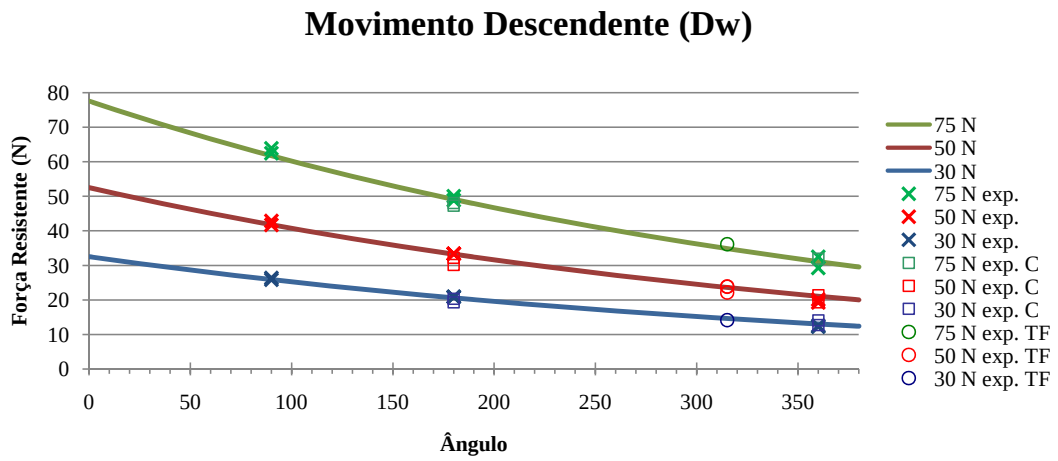


Figura 5.13.: Força resistente no movimento descendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.

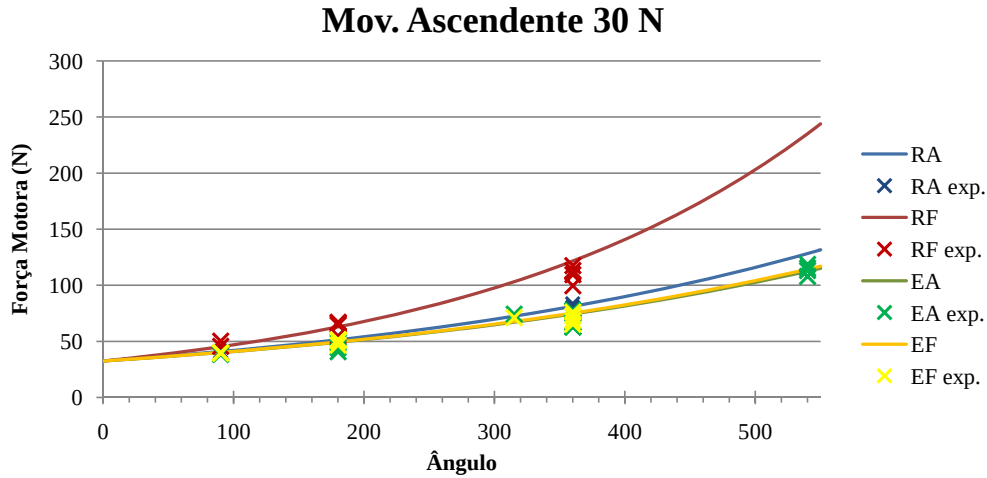


Figura 5.14.: Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para ensaios solicitados a 30N.

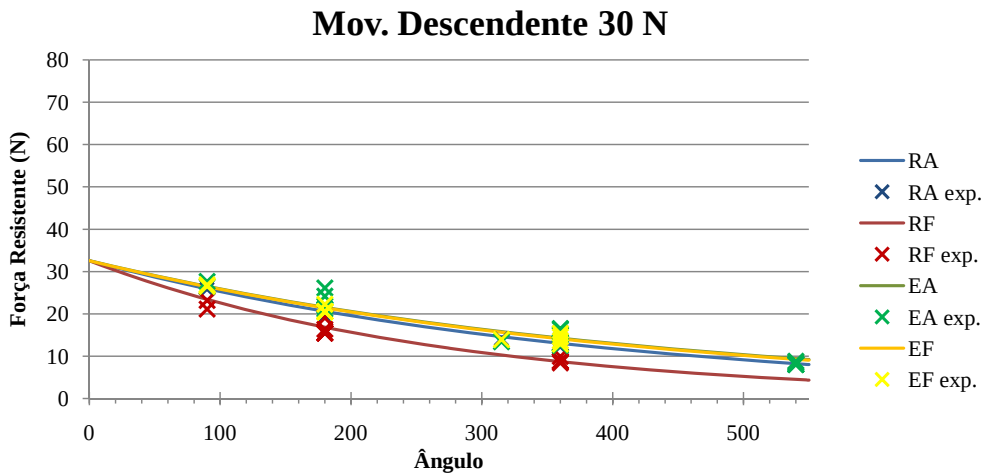


Figura 5.15.: Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaios solicitados a 30N.

É, por isso, sensato afirmar que a bainha do tipo *R* tem um pior desempenho do que a do tipo *E*, ou seja, as bainhas em *PEHD* aumentam o rendimento do cabo face às em *POM*. Quanto ao tipo de corda, é mais difícil afirmar que há uma com melhor desempenho que outra. Porém, a combinação *EA*, ou seja, bainha *PEHD* e corda 1x19, revelou-se algo inconsistente nos resultados obtidos. Tal pode estar relacionado com a evolução do rendimento do cabo com o acumular de ciclos. Pode acontecer que este tipo de corda seja mais agressiva neste material e o desgaste ocorra com maior facilidade e mais rapidamente.

6. Desgaste

Um ensaio de 400 ciclos não é considerado um ensaio de *endurance* e, por isso, não se espera um grande desgaste da bainha. No entanto, foram analisadas várias secções transversais e longitudinais da bainha e da corda de aço. Nesta análise recorreu-se à combinação *RF*.

Ao analisar-se ao microscópio uma secção transversal da bainha numa das extremidades, foi possível constatar um desgaste elevado provocado pelo deslizamento da corda sobre esta conforme mostrado na Figura 6.1. Como consequência deste desgaste, partículas da própria bainha vão sendo dispersas ao longo do cabo.

Com uma ampliação de 5x é possível ver a variação da secção da bainha (Figura 6.2). Repare-se como a cavidade corresponde exactamente ao raio de 0,6mm da corda de aço. Houve, portanto, uma diminuição da parede da bainha, cuja espessura diminuiu mais de 50% passando de 0,38 para 0,16mm aproximadamente.

Embora este fenómeno de desgaste ao fim de 400 ciclos seja uma constatação importante, deixa de ter muito significado quando isto apenas se verifica nas extremidades da bainha estando esta praticamente intacta a nível de desgaste no restante comprimento. Contudo, não deixa de ter um peso considerado no aumento do atrito e também por este desgaste implicar a dispersão de partículas provenientes da própria bainha por toda a região das extremidades.

Para além de partículas libertadas pela bainha, é ainda possível encontrar partículas metálicas provenientes, certamente, da corda de aço e também umas outras de cor mais acastanhada que poderá ser, eventualmente, óxidos formados enquanto o cabo esteve armazenado. As partículas de aço, ao contrário do lixo proveniente da bainha e também dos óxidos, podem ser encontradas em todo o comprimento do cabo. A Figura 6.3 mostra uma fotografia ampliada 20x de um corte longitudinal de uma zona extrema da bainha. Por sua vez, na Figura 6.4 é possível observar uma fotografia semelhante mas da zona central da bainha. As “nervuras” observadas em ambas as figuras podem ser micro-fissuras do material que caracterizam a sua rugosidade. Aparentemente não há nenhuma alteração significativa de uma secção para outra verificando-se assim uma homogeneidade da rugosidade ao longo do comprimento da bainha.

Por outro lado, a corda de aço também acumula lixo entre cordões e entre arames embora em quantidades aparentemente mais reduzidas (Figura 6.5). Esta conta-



Figura 6.1.: Secção transversal da bainha (ampliação: 2x).

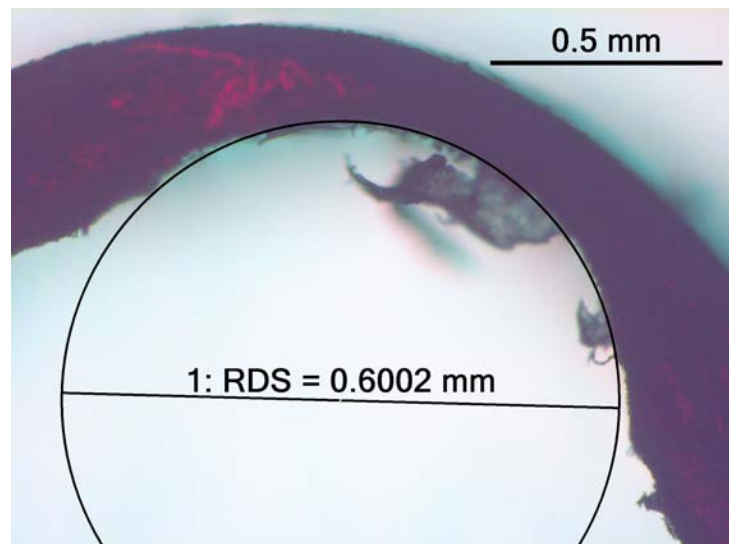


Figura 6.2.: Secção transversal da bainha (ampliação: 5x).

minação implica alterações na estrutura do cabo de tal modo que este passará a ter pequenos defeitos pontuais ao longo de todo o seu comprimento, defeitos estes que perturbarão o deslizamento do cabo aumentando assim o atrito entre este e a bainha. Por outro lado, conforme mostrado na Figura 6.6, há algumas zonas do cabo de cor mais acastanhada que podem representar alguma oxidação.

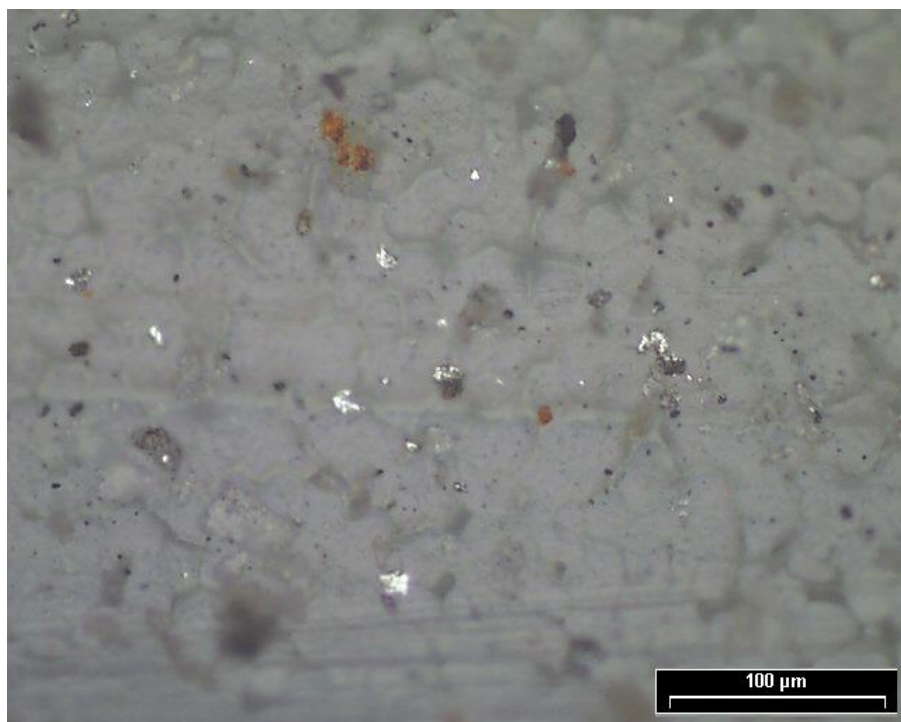


Figura 6.3.: Secção longitudinal na extremidade da baina (ampliação: 20x).

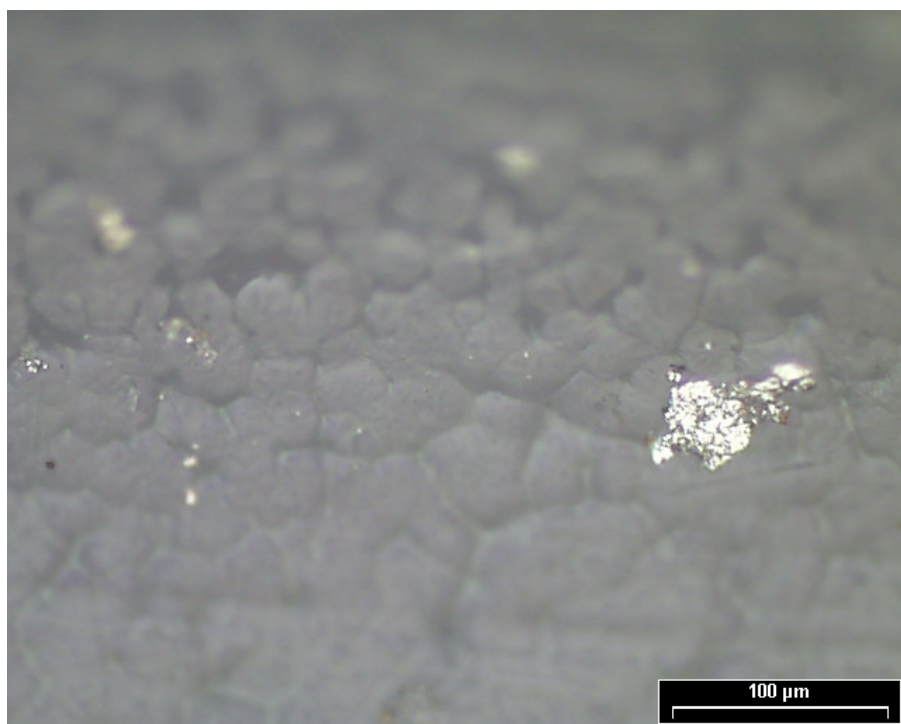


Figura 6.4.: Secção longitudinal a meio da baina (ampliação: 20x).

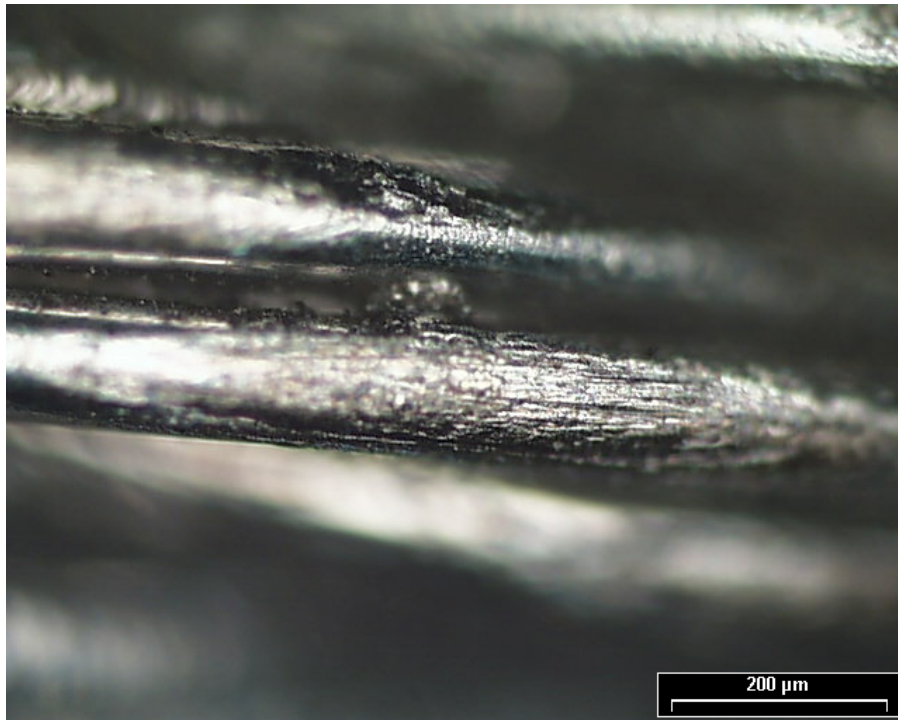


Figura 6.5.: Impureza presente entre dois arames de um cordão da corda de aço (ampliação: 10x).

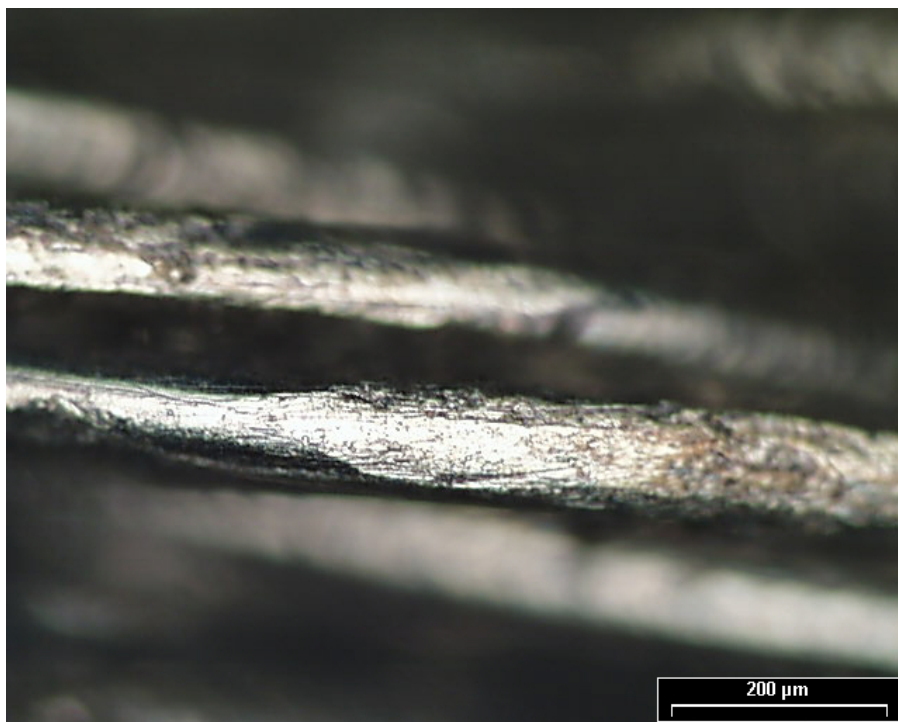


Figura 6.6.: Zona oxidada no cabo de aço (ampliação: 10x).

7. Conclusões

A medição de coeficiente de atrito tem sempre erros consideráveis associados e valores entre 10 e 15% são vulgarmente aceites. Se se tiver em conta a sensibilidade das células de carga, a diferente natureza de accionamento do cilindro (óleo/ar) e uma lei de previsão que obedece a uma função exponencial, pode-se afirmar que os resultados são muito satisfatórios.

Como se verificou, dois ensaios semelhantes, isto é, o mesmo tipo de cabo, montados com o mesmo *lay-out* e sujeitos à mesma carga, apresentam resultados diferentes. Isto deve-se ao comportamento irregular que os cabos apresentam. Verificou-se nos ensaios de longa duração que existe um valor limite para o qual o cabo tende com a sua utilização. Porém, para atingir este limite em todos os ensaios estes teriam de durar cerca de um a dois dias cada. Existe assim, uma (ou mais) variável que afecta a vida do cabo, isto é, o seu desempenho em função da sua utilização. Tal variável pode estar relacionada com o processo de fabrico dos vários componentes ou com o processo de transporte e armazenamento dos cabos, por exemplo.

Apesar destas incertezas, foram tiradas algumas conclusões objectivas e interessantes conforme apresentado de seguida:

- O modelo sugerido, dado pela equação

$$F_M = F_R \cdot e^{\mu \cdot \beta} \quad ,$$

permite uma boa correlação dos resultados e, conhecendo o coeficiente de atrito para um dado tipo de cabo, é possível estimar as forças envolvidas num determinado *lay-out* conhecido;

- A comparação de ensaios simples apoiados e não-apoiados permitiu verificar que o cabo tem melhor desempenho na segunda situação. Tal verificou-se para todos os tipos de cabo e deve-se à capacidade de adaptação à geometria mais favorável quando este não tem restrições geométricas. Desta forma, a espiral de aço do cabo pode ter um papel importante nesta capacidade na medida em que um bom compromisso da sua rigidez possa permitir uma maior capacidade de adaptação do cabo sem comprometer o seu suporte;
- Da comparação entre os diferentes tipos de cabo (combinação corda/bainha), verificou-se que o tipo *RF* (bainha em POM e corda 7x7) tem claramente

7. Conclusões

um desempenho inferior independentemente do tipo de ensaio. Por sua vez, os tipos *EA* (bainha em PEHD e corda 1x19) e *EF* (bainha em PEHD e corda 7x7) apresentaram os melhores resultados embora o primeiro destes dois tenha uma maior dispersão e inconsistência de resultados. É, por isso, razoável afirmar que a bainha em POM (polioximetileno copolímero) tem pior rendimento do que a de PEHD (polietileno de alta densidade). Quanto ao cabo *RA* (bainha em POM e corda 1x19), este tem um desempenho pouco pior que os dois últimos e é o que apresenta resultados mais coerentes nos ensaios realizados. É assim, por este motivo, um bom elemento de referência.

As informações mais relevantes e que definem o desempenho dos diferentes cabos são apresentadas na tabela seguinte:

<i>Cabo</i>	$\bar{\mu}$	$e_{max.} [\%]$	$e_{min.} [\%]$	$\bar{e} [\%]$
<i>RA</i>	0,146	8,4	-13,6	3,5
<i>RF</i>	0,210	14,5	-18,1	7,1
<i>EA</i>	0,132	21,3	-17,2	7,3
<i>EF</i>	0,133	8,9	-13,1	4,2

- O facto de os erros máximos, em valor absoluto, serem maioritariamente negativos, tanto para ensaios simples apoiados, como simples não-apoiados ou complexos, significa que face ao valor médio, esporadicamente surgem cabos com um rendimento superior à média. Isto permite afirmar que os valores médios dos coeficientes de atrito são reservados o que dá uma maior segurança na sua utilização;
- A adição dos resultados complexos aos simples, veio, como seria de esperar, aumentar os erros e a sua dispersão, especialmente no cabo *EA*. Tal deveu-se aos ensaios do tipo **3C** que foram realizados em más condições devido às limitações da máquina. Por outro lado, a suposição do princípio da adição dos ângulos nos *lay-outs complexos*, embora com resultados muito interessantes, pode ser grosseira. A existência de pontos de inflexão nalguns *lay-outs* permite a inexistência de contacto entre corda e bainha devido à folga existente entre os dois. Esta ausência de contacto traduz-se numa diminuição efectiva da soma dos ângulos;
- A presença de troços rectos em *lay-outs complexos* é desprezável devido ao baixo peso da corda. Deste modo, o atrito existente nestes troços é perfeitamente desprezável face ao existente nos troços curvos sem qualquer aumento significativo do erro;
- O rendimento do cabo varia com o tempo. Tal deve-se aos fenómenos de desgaste dos vários componentes, nomeadamente da bainha. Este desgaste, para além de alterar a área de contacto entre a corda e a bainha, contamina o interior do cabo com partículas metálicas provenientes do cabo e poliméricas

provenientes da bainha. Estas partículas, porém, podem funcionar como lubrificante sólido e justificar assim o aumento de rendimento do cabo a partir de uma determinada altura.

7.1. Trabalhos Futuros

Apesar da enorme quantidade de ensaios e situações diferentes analisadas, recomenda-se a continuação do trabalho abrangendo alguns pontos interessantes:

- Antes de se avançar para outras fases deste trabalho, recomenda-se a alteração do sistema actuador de cabos e posterior recalibração. O seu objectivo é aproximar os valores do movimento ascendente aos do movimento descendente com uma limitação de carga superior. Para isso recomenda-se um cilindro unicamente hidráulico, com a configuração mostrada na Figura 3.8. Uma solução melhor seria a substituição do accionamento hidráulico por um eléctrico;
- De forma a verificar os valores apresentados e melhorar o seu rigor, recomenda-se também a realização de mais ensaios de *lay-outs simples* não-apoiados, com uma maior gama de ângulos;
- O estudo apresentado tratou apenas de arcos de círculo, individualmente ou em série. É por isso evidente que o próximo passo lógico será o estudo de arcos sem raio constante. Embora o modelo apresentado não dependa do raio, ele foi deduzido a partir de um arco de círculo. A introdução de geometrias com raios variáveis pode ser um estudo completamente diferente embora se acredite que uma aproximação com base no modelo apresentado seja possível;
- Para completar o estudo dos *lay-outs* recomenda-se a realização de ensaios com *lay-outs* em diferentes planos (vertical, horizontal e oblíquo) e com combinações destes. Devido ao baixo peso do cabo acredita-se que não haverá diferenças significativas porém, caso seja necessário, as equações (2.8) de F. H. Buller e (2.9) de R. C. Riffenburg podem ser aplicadas;
- Após completamente compreendido a variação do rendimento do cabo com a geometria, resta compreender o efeito das variáveis *Temperatura*, *Humidade* e *Lubrificação*.

Bibliografia

- [1] F. H. Buller, "Pulling tension during cable installation in ducts or pipes," *General Electric Review*, pp. 21–23, August 1949.
- [2] R. C. Rifenburg, "Pipe-line design for pipe-type feeders," *Part III Power Apparatus and Systems Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 72, pp. 1275–1288, Part III, Jan. 1953.
- [3] D. G. Smith, "A general method for the calculation of pipe cable pulling forces," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, pp. 360–368, Jan. 1981.
- [4] G. C. Weitz, "Coefficient of friction measurement between cable and conduit surfaces under varying normal loads," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, pp. 16–21, Jan. 1985.
- [5] G. W. Seman, D. A. Silver, R. A. Bush, and T. Kendrew, "Determination of maximum safe pulling lengths for solid dielectric insulated cables," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, pp. 3172–3186, Nov. 1984.
- [6] J. Fee and D. Quist, "A new cable pulling friction measurement method and results," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. 7, pp. 681–686, April 1992.
- [7] T. Aabo, J. Moran, and J. Shimshock, "Increasing pipe cable section lengths," in *Proc. 7 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 117–121, 1979.
- [8] I. Bascom, E. C., J. R. Stewart, and L. Y. Tang, "Evaluation of pulling rope wear and coefficient of friction for pipe-type cables," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. 12, pp. 542–546, April 1997.
- [9] A. S. Sookie Vartanian, "Cable pulling design for practical applications in modern refineries," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. IA-10 N.3, pp. 431–437, 1974.

A. Norma NP-1843

NORMA
PORTUGUESACABOS DE AÇO
Designação normalizada e representação
símbolica da composição.

NP-1843

1982

Câbles en acier. Désignations normalisées et représentation symbolique de la composition.

1 — OBJECTIVO

A presente Norma destina-se a estabelecer as regras de designação de cabos de aço, por meio de letras e algarismos, indicando a composição e as características básicas dos cabos.

2 — REFERÊNCIA

NP-709 (1981) — ARAMES PARA CABOS DE AÇO. Características.

3 — DESIGNAÇÃO DOS CABOS

A designação completa dos cabos deve indicar, pela ordem em que são dadas, as características seguintes:

- a) dimensão;
- b) acabamento da superfície dos arames;
- c) tipo de construção;
- d) classe de tensão de rotura dos arames;
- e) sentido do enrolamento;
- f) força de rotura mínima;
- g) massa linear.

É permitida uma designação abreviada, desde que as características sejam enumeradas pela mesma ordem em que estão descritas acima.

As características podem ser designadas ou por letras maiúsculas ou por letras minúsculas, não sendo permitido usar as duas ao mesmo tempo.

4 — DESIGNAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS

A designação das características individuais compreendidas na designação completa deve fazer-se como segue:

4.1 — DIMENSÕES

4.1.1 — Cabos redondos

O diâmetro nominal do cabo, expresso em milímetros.

4.1.2 — Cabos entrançados

O diâmetro do círculo que circunscreve o cabo, expresso em milímetros.

(Continua)

Port. n.º 299/82, de 1982-03-18

Faculdade de Engenharia do Porto
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
BIBLIOTECAEstudada pela Comissão
Técnica Portuguesa de Nor-
malização de «Cabos de Aço».

4.1.3 — Cabos planos

As dimensões do rectângulo que envolve o cabo, incluindo a costura, expressas em milímetros.

4.2 — ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE DOS ARAMES

O acabamento da superfície dos arames é designado por um dos símbolos seguintes, de acordo com a Norma NP-709 (1981).

NAT — arame branco.
 ZAA — arame zincado, qualidade A.
 ZAB — arame zincado, qualidade AB.
 ZBB — arame zincado, qualidade B.

4.3 — SÍMBOLOS RELATIVOS À CONSTRUÇÃO**4.3.1 — Alma**

A alma é representada por um dos símbolos seguintes:

Alma em fibra (natural ou sintética)	= FC
Alma em fibra natural	= NF
Alma em fibra sintética	= SF
Alma em cabo metálico	= WR { seguido por uma indicação completa
Alma em cordão metálico	= WS { do tipo de construção entre parêntesis.

4.3.2 — Arames

A secção dos arames do cabo é representada pelos seguintes símbolos:

Arame redondo	— sem símbolo.
Arame triangular	— V
Arame rectangular	— I
Arame trapezoidal	— T
Arame oval	— Q
Arame carril com arame redondo a par	— H
Arame em forma z	— Z

4.3.3 — Cordões

A secção do cordão é representada por um dos símbolos seguintes:

Cordão circular	— sem símbolo.
Cordão triangular	— V
Cordão plano	— I
Cordão oval	— Q

4.3.4 — Cabo

A secção do cabo é representada por um dos símbolos seguintes:

Cabo redondo	— sem símbolo.
Cabo entrançado	— Y
Cabo plano	— P

(Continua)

4.4 — CONSTRUÇÃO DO CABO

4.4.1 — Cabos monocordões e cabos fechados

São designados do exterior para o centro, indicando o número de arames em cada camada sucessiva.

Os números de arames de cada uma das camadas, incluindo o arame central, são separados pelo sinal "+".

Exemplos típicos de designações para os diversos tipos de composição são dados em 6.3.

No caso de um ou vários arames terem uma secção não circular, o símbolo apropriado, tal como está indicado em 4.3.2, é colocado a seguir ao número de arames.

4.4.2 — Cabos de cordões

São designados do exterior para o centro do cabo, indicando sucessivamente o número total de cordões e, entre parêntesis, a designação da composição dos cordões.

A composição de cada cordão é designada do exterior para o centro do cordão indicando o número de arames em cada camada sucessiva do cordão.

Os números de arames de cada uma das camadas do cordão, incluindo o arame central ou a alma de fibra, são separados pelo sinal "+".

Os números de cordões de cada uma das camadas do cabo são separados pelo sinal "+".

No caso de um cabo com alma de fibra, o sinal "+", é igualmente utilizado para separar a parte da designação relativa aos cordões da relativa à alma de fibra.

No caso de um cabo ter uma alma metálica constituída por um cordão, o sinal "+" é seguido do símbolo "WS", e este seguido da designação da composição da alma, colocada entre parêntesis.

No caso de um cabo ter uma alma metálica constituída por um cabo de cordões, o sinal "+" é seguido do símbolo "WR" e este seguido da designação do cabo que constitui a alma, colocada entre parêntesis.

No caso de um cabo Filler os arames de enchimento são referenciados com a letra F, colocada a seguir ao respectivo número e são separados dos arames da camada correspondente pelo sinal "+".

No caso de um cabo Warrington, os arames de diâmetros diferentes pertencentes à mesma camada são separados pelo sinal "/".

No caso de um cabo compreendendo várias camadas de cordões, ao número de cordões em cada camada segue-se, entre parêntesis, a designação da composição do cordão como em 4.4.2; o sinal "+" é utilizado para separar as camadas.

No caso de cordões de secção não circular, é colocada uma letra a seguir ao número de cordões em cada camada, para indicar a forma da secção.

Para uma designação abreviada é dado o número total de cordões seguido do sinal "X" e, em seguida, o número total de arames em cada cordão. Este é seguido pelo sinal "+", e depois por um símbolo indicando o tipo da alma. No caso de cabos «Seale», «Filler», e «Warrington», ou da combinação «Warrington-Seale», é dada indicação completa do tipo de composição depois do número total de arames em cada cordão.

4.4.3 — Cabos calabroteados

São designados do exterior para o interior indicando o número total de cabos, seguido, entre parêntesis, da composição de cada um deles.

Para a designação dos cabos que constituem o cabo calabroteado veja-se a secção 4.4.2.

(Continua)

4.4.4 — Cabos entrançados

São designados como no caso dos cabos de cordões (4.4.2) juntando-se, antes do número total de cordões, o símbolo Y.

4.4.5 — Cabos planos

São designados como no caso dos cabos calabroteados, (4.4.3) juntando-se, antes do número total de cordões, o símbolo P.

4.5 — CLASSE DE TENSÃO DE ROTURA DOS ARAMES

A classe de tensão de rotura dos arames, é designada pelo valor nominal da sua tensão de rotura expressa em newtons por milímetro quadrado.

4.6 — SENTIDO DO ENROLAMENTO

São utilizadas as letras Z ou S para designar o sentido de enrolamento dos cabos, bem como o dos arames (vejam-se as Figuras 1 e 2).

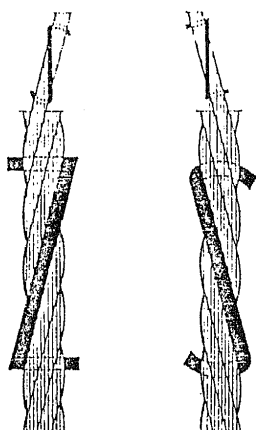


Fig. 1

Cabo normal ou cruzado

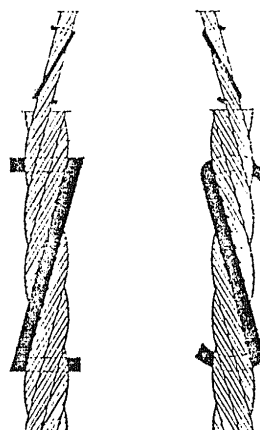


Fig. 2

Cabo «Lang»

A letra Z indica que o sentido é para a direita, e a letra S indica que é para a esquerda.

Assim, as designações «ZZ» ou «SS», indicam o cabo «Lang» e as designações ZS ou SZ, indicam o cabo normal ou cruzado.

4.7 — FORÇA DE ROTURA MÍNIMA DO CABO

A força de rotura mínima do cabo é designada ou pelo seu valor nominal em quilonewtons, ou referindo a norma portuguesa correspondente.

4.8 — MASSA LINEAR DO CABO

A massa linear do cabo é designada ou pelo seu valor nominal em quilogramas por 100 metros, ou referindo a norma portuguesa correspondente.

(Continua)

5 — LISTA ALFABÉTICA GERAL DOS SÍMBOLOS

F	— Arame de enchimento
FC	— Alma de fibra (natural ou sintética)
H	— Arame carril, com arame redondo a par
I	— Arame rectangular ou cordão plano
NAT	— Arame branco
NF	— Alma de fibra natural
P	— Cabo plano
Q	— Arame ou cordão oval
S	— Sentido de enrolamento à esquerda
SF	— Alma de fibra sintética
T	— Arame trapezoidal
V	— Arame ou cordão triangular
WR	— Alma em cabo metálico
WS	— Alma em cordão metálico
Y	— Cabo entrançado
Z	— Arame em forma de Z ou sentido de enrolamento à direita
ZAA	— Arame zincado, qualidade A
ZAB	— Arame zincado, qualidade AB
ZBB	— Arame zincado, qualidade B

6 — EXEMPLOS DE DESIGNAÇÃO DE CABO DE AÇO

6.1 — EXEMPLO DE DESIGNAÇÃO COMPLETA:

18 NAT 6 (9 + 9 + 1) + NF 1770 ZZ 176 112

«Cabo de aço, de 18 mm de diâmetro, arame branco, 6 cordões de 19 arames Seale, com alma de fibra natural, classe de tensão de rotura 1700 N/mm², enrolamento Lang direito, força de rotura 176 kN e massa linear 112 kg/100 m».

6.2 — EXEMPLOS DE DESIGNAÇÃO ABREVIADA:

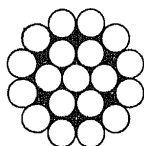
18 NAT 6 × 19 Seale + NF 1770 ZZ 176
18 NAT 6 × 19 Seale + NF 1770 ZZ
18 NAT 6 × 19 Seale + NF 1770
18 NAT 6 × 19 Seale + NF

(Continua)

6.3 — TIPO DE COMPOSIÇÃO

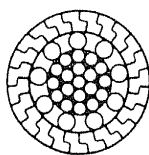
DESIGNAÇÃO

1)



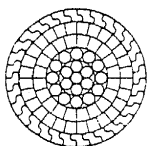
Cabo monocórdão:
 Completo — 12 + 6 + 1
 Abreviado — 1 × 19

2 a)



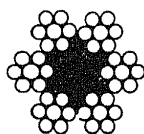
Cabo fechado
 Completo — 23Z + 9H + 12 + 6 + 1

2 b)



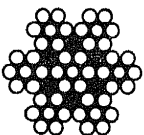
Cabo fechado
 Completo — 32Z + 28T + 20T + 12 + 6 + 1

3)



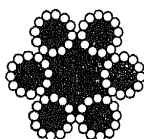
Cabo de cordões com alma de fibra
 Completo — 6 (6 + 1) + FC
 Abreviado — 6 × 7 + FC

4)



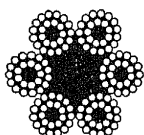
Cabo de cordões com alma de cordão metálico
 Completo — 6 (6 + 1) + WS (6 + 1)
 Abreviado — 6 × 7 + WS

5)



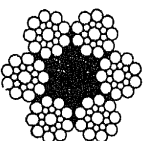
Cabo de cordões com 7 almas
 Completo — 6 (12 + FC) + FC
 Abreviado — 6 × 12 + 7FC

6)



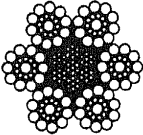
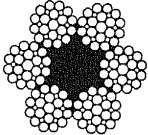
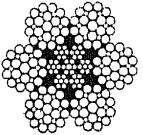
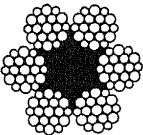
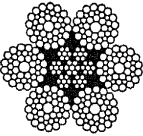
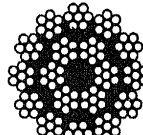
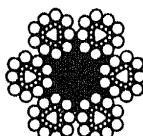
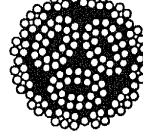
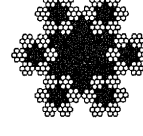
Cabo de cordões com 7 almas de fibra sintética
 Completo — 6 (15 + 9 + SF) + SF
 Abreviado — 6 × 24 + 7SF

7)

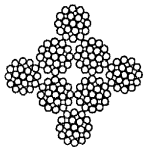


Cabo Seale com alma de fibra natural
 Completo — 6 (9 + 9 + 1) + NF
 Abreviado — 6 × 19 Seale + NF

(Continua)

TIPO DE COMPOSIÇÃO	DESIGNAÇÃO
8) 	Cabo Seale com alma metálica (WR) Completo — $6 (10 + 10 + 1) + WR [6 (6 + 1) + WS (6 + 1)]$ Abreviado — 6×21 Seale + WR
9) 	Cabo Filler com alma de fibra natural Completo — $6 (12 + 6F + 6 + 1) + NF$ Abreviado — 6×19 Filler + NF
10) 	Cabo Filler com alma metálica (WR) Completo — $6 (12 + 6F + 6 + 1) + WR [6 (6 + 1) + WS (6 + 1)]$ Abreviado — 6×19 Filler + WR
11) 	Cabo Warrington com alma de fibra Completo — $6 (6/6 + 6 + 1) + FC$ Abreviado — 6×19 Warrington + FC
12) 	Cabo Warrington com alma metálica (WR) Completo — $6 (16 + 8/8 + 8 + 1) + WR [6 (6 + 1) + WS (6 + 1)]$ Abreviado — 6×41 Warrington-Seale + WR
13) 	Cabo multi-cordões (com duas camadas de cordões redondos e uma alma de fibra natural) Completo — $12(6 + 1) + 6 (6 + 1) + NF$ Abreviado — $18 \times 7 + NF$
14) 	Cabo de cordões triangulares com alma em fibra natural. Completo — $6 V (9 + 12 + 1V) + NF$ Abreviado — $6V \times 22 + NF$
15) 	Cabo possuindo cordões planos e ovais e várias almas em fibra natural. Completo — $12 I (8/4) + 3Q (15 + 9 + NF) + NF$
16) 	Cabo callabroteado com alma em fibra natural Completo — $6 [6 (6 + 1) + NF] + NF$ Abreviado — $6 \times 6 \times 7 + NF$

(Continua)

TIPO DE COMPOSIÇÃO	DESIGNAÇÃO
17) 	Cabo entrançado Completo — Y8 (12 + 6F + 6 + 1) Abreviado — Y8 × 19 Filler
18) 	Cabo plano Completo — P 8 [4 (6 + 1) + NF] Abreviado — P 8 × (4 × 7 + NF)

7 — REFERÊNCIA À NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL

Esta Norma baseia-se na Norma Internacional ISO 3578-1980 «Câbles en acier. Désignations normalisées», com a qual se encontra de acordo.

DIRECÇÃO GERAL DA QUALIDADE (DGO) — Rua de José Estêvão, 83-A — 1199 LISBOA CODEX



B. Desenhos Técnicos das Cordas dos Cabos Analisados

02060029 ©

- CABLE ϕ 1.2 $\begin{smallmatrix} +0.08 \\ -0.03 \end{smallmatrix}$ (1x19+0). GALVANIZADO.
- ALAMBRES SEGUN DIN 2078 DE ϕ 0.25
- RESISTENCIA A TRACCION DE LOS ALAMBRES 180 + 200 Kg/mm²
- RESISTENCIA A TRACCION DEL CABLE 140 Kg MIN. (B)
- RESISTENCIA A LA NIEBLA SALINA 96 HORAS MIN. SEGUN NORMA A.S.T.M. B-117.
- GALVANIZADO 58 g/m² MIN.



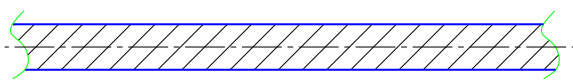
FICO CABLES, L.D.A.

Eng.^a de Produto

Ref.: CA 120291

Nivel: C Data: 17/02/2004

D			G	
C	ANTES REF F.C. 244044	21-05-98	F	
B	MODIF ANTES RESISTENCIA 160 Kg MIN	17-05-88	E	
Modificaciones		Fecha	Modificaciones	
T. Gener.	DIBUJADO	Fecha	Nombre	MATERIAL
	COMPROBADO	04-06-84	E. Sanchez	
	V.B.			
	FORMATO: DIN A-4	PROTECCION:		
T. Gener. +	ESCALA	DENOMINACION		
	---	CABLE		
				FICO CABLES, S.A. BARCELONA Nº 02060029 Conjunto

7	6	5	4	3	2	1																											
INDICE LEVEL	DATA DATE	ZONA ZONE	DESCRIÇÃO DESCRIPTION			ALTERADO POR: MODIFIED BY:	APROVADO POR: APPROVED BY:																										
L	-		CRIAÇÃO DE DESENHO / DRAWING CREATION			-----	BRAGA																										
A	26.09.96		ACRESC.ESPECIFICAÇÃO EM INGLES / ADDED ENGLISH SPECIFICATION			RUIMAT	BRAGA																										
B	23.03.2004		ALT. DA NORMA DIN 71984/1 ERA DIN 71987 / CHANGED SPC. DIN 71984/1 WAS DIN 71987			R.OLIVEIRA	C.DUARTE																										
			NORMA DIN EN 10264-1 E 10264 ERA DIN-2078/ SPC. DIN EN 10264-1 AND 10264-2 WAS DIN-2078																														
J	C	17.12.2004	ACRESC. TABELA DE ALONGAMENTO NO CABO ADDED CABLE ELONGATION TABLE			J.Martins	Pedro Lopes																										
	D	22.02.2005	ALTER. DE TOLER. 1.2 ±0.1 ERA 1.2 +0.05/0 CHG. TOLER. 1.20 ±0.1 WAS 1.20 +0.05/0																														
			E CARGA DE ROTURA ERA ≥ 155 Kgf AND BREAKING LOAD WAS ≥ 155 Kgf			J.Martins	Pedro Lopes																										
	E	11.03.2005	ALTER. CARGA DE ROTURA ERA ≥ 160Kgf CHG. BREAKINGS LOAD WAS ≥ 160Kgf			J.Martins	Pedro Lopes																										
I																																	
H	1ª ESPECIFICAÇÕES : CABO MULTICORDÃO PARA Ø1.20 ±0.1 DE ARAMES PREFORMADOS COMPOSIÇÃO : 7x7 CONSTRUÇÃO SEGUNDO DIN 3055 (DIN 71987) ENROLAMENTO DOS ARAMES SEGUNDO DIN 3051: sZ																																
G	1st GENERAL : MULTI STRAND ROPE Ø1.20 ±0.1 PREFORMED COMPOSITION : 7x7 ACCORDING RULE DIN 3055 (DIN 71987) ACCORDING LAY DIN 3051 : sZ																																
F	2ª CARACT. FISICO-MECANICAS : CARGA DE ROTURA ≥ 148 Kgf : RESISTÊNCIA • TRACÇÃO DOS ARAMES 220-260 Kgf/mm2																																
E	2sd PHYSICO-MECHANIC CHARACTERISTIC : BREAKING LOAD ≥ 148 Kgf : TENSILE STRENGTH OF WIRES 220-260 Kgf/mm2																																
D	TABELA DE ALONGAMENTO DO CABO CABLE ELONGATION TABLE <table border="1"> <thead> <tr> <th>Forças [N]</th> <th>50</th> <th>75</th> <th>100</th> <th>200</th> <th>300</th> <th>400</th> <th>500</th> <th>600</th> <th>700</th> <th>800</th> <th>900</th> <th>1000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Alongamento [mm/m ±15%]</td> <td>0</td> <td>0.36</td> <td>0.44</td> <td>0.965</td> <td>1.635</td> <td>2.51</td> <td>3.245</td> <td>4.185</td> <td>4.845</td> <td>5.665</td> <td>6.545</td> <td>7.465</td> </tr> </tbody> </table>							Forças [N]	50	75	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	Alongamento [mm/m ±15%]	0	0.36	0.44	0.965	1.635	2.51	3.245	4.185	4.845	5.665	6.545	7.465
Forças [N]	50	75	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000																					
Alongamento [mm/m ±15%]	0	0.36	0.44	0.965	1.635	2.51	3.245	4.185	4.845	5.665	6.545	7.465																					
C	3ª QUALIDADE DE SUPERFICIE : GALVANIZADO - PESO DO ZINCO SEGUNDO DIN EN 10264-1/2 (DIN 2078) O CABO DEVE ESTAR ISENTO DE QUALQUER TIPO DE DEFEITO APARENTE (ESTRIAS, RANHURAS, TORÇÕES, ONDULAÇÕES, SALIÊNCIAS, DOBRAGENS E EXTREMIDADES DESENROLADAS).																																
B	3rd SURFACE QUALITY : ZINCPLATED - ZINC WEIGHT ACCORDING DIN EN 10264-1/2 (DIN 2078) THE CABLE MUST BE FREE OF ANY VISIBLE DEFECT (GROOFS, TORSIONS, CORRUGATIONS, SALIENCES, FOLDINGS AND UNROLLED EDGES).																																
A	4ª CERTIFICAÇÃO : OBTER CERTIFICADO, POR CADA LOTE, DAS CARACTERISTICAS FISICO-MECANICAS. 4th CERTIFICATION : TO OBTAIN A CERTIFICATE, BY LOT, OF THE PHISICO-MECHANIC CHARACTERISTICS.																																
ESTE DESENHO É PROPRIEDADE DA FICOCABLES, Lda TODOS OS DIREITOS DE PROPRIEDADE NOS ESTÃO RESERVADOS É PROIBIDO COPIAR OU DEIXAR EM PODER DE TERCEIROS SEM NOSSA PERMISSÃO ESCRITA THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF FICOCABLES, Lda ALL RIGHTS RESERVED. IT IS FORBIDDEN TO COPY OR LET TO THIRD PARTIES WITHOUT OUR WRITTEN CONSENT					FICOCABLES, Lda Fabrica de accessorios e equipamentos industriais																												
DESENHADO DRAWN		DATA DATE 931021	NOME NAME BRAGA	SUBSTITUI: REPLACE:		CODIGO BARRAS: BAR CODE:																											
VISTO CHECKED				DENOMINAÇÃO DENOMINATION		REFERENCIA FICO CABLES: FICOCABLES REFERENCE:																											
APROVADO APPROVED				CABO Ø1.20(49 FIOS)GALV. / CABLE Ø1.2 (49 WIRES) ZINCPLATED		CA120731																											
						INDICE: LEVEL: E																											

C. Desenhos Técnicos das Bainhas dos Cabos Analisados

7	6	5	4	3	2	1
INDICE LEVEL	DATA DATE	ZONA ZONE	DESCRIÇÃO DESCRIPTION		ALTERADO POR: MODIFIED BY:	APROVADO POR: APPROVED BY:
L	--	11.22.1983	CRIAÇÃO DO DESENHO DRAWING CREATION		ALVARENGA	L
A	28.05.1988		COMPLETAR REFª DO MATERIAL MATERIAL REFª		ARTUR	
B	01.06.1988		ALTERAÇÃO DA COTA Ø1.8 PARA Ø1.85 DIM. MODIFICATION Ø1.85 WAS Ø1.8		ADELINO	
C	04.03.1996		DESENHO REFORMULADO. COTAS Ø1.8±0.1 E Ø2.5±0.1 REMADE DRAWING. DIM's Ø1.8±0.1 AND Ø2.5±0.1		R. MAT.	
J			ERAM Ø1.85 E Ø2.5+0 RETIRADA ESP 0.35; WORE Ø1.85 PLUS Ø2.5+0 REMOVED ESP 0.35;			J
			REFª TB1RN02500 ERA 47 A 214 REFª TB1RN02500 WAS 47 A 214			
I						I
H						H
G						G
F						F
E						E
D						D
C						C
B						B
A						A

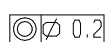
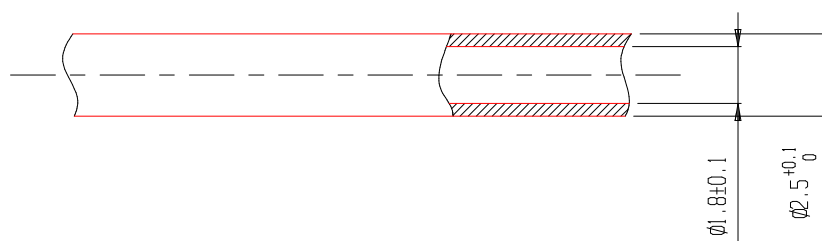
MATERIAL : GRANULADO DE POM, REFª PL 10105
MATERIAL F. C. RUBI - 01 211 104

MATERIAL : GRANULATE POM, REFª PL 10105
MATERIAL F. C. RUBI - 01 211 104

ESTE DESENHO É PROPRIEDADE DA FICOCABLES, Lda TODOS OS DIREITOS DE PROPRIEDADE NOS ESTÃO RESERVADOS É PROIBIDO COPIAR OU DEIXAR EM PODER DE TERCEIROS SEM NOSSA PERMISSÃO ESCRITA THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF FICOCABLES, Lda ALL RIGHTS RESERVED. IT IS FORBIDDEN TO COPY OR LET TO THIRD PARTIES WITHOUT OUR WRITTEN CONSENT				 FICOCABLES, Lda Fabrica de acessórios e equipamentos industriais	
SIMBOLOGIA SYMBOLY SEGUNDO ESP. FICO EIT-002 ACORDING FICO SPEC. EIT-002	CARACTERÍSTICA SIGNIFICATIVA SIGNIFICANT CHARACTERISTIC CARACTERÍSTICA SECUNDARIA SECONDARY CHARACTERISTIC	CARACTERÍSTICA CHAVE (SIGNIFICATIVA DE PRODUTO / PROCESSO) KEY CHARACTERISTIC (SIGNIFICANT OF PRODUCT / PROCESS) CARACTERÍSTICA CRÍTICA DE SEGURANÇA (S) OU REGULAMENTAÇÃO (R) SAFETY (S) OR REGULATION (R) CRITICAL CHARACTERISTIC	COTA TEORICAMENTE EXACTA THEORETICALLY EXACT DIMENSION COTA REFERENCIA REFERENCE DIMENSION		
TOLERÂNCIAS GERAIS GENERAL TOLERANCES LINEARES LINEAR ANGULARES ANGULAR TOLERÂNCIAMENTO GEOMÉTRICO GD&T ROSCAS THREAD VOLUME: VOLUME: mm³	DESENHADO DRAWN VISTO CHECKED APROVADO APPROVED SUBSTITUI: REPLACE:	DATA DATE NOME NAME REF. CLIENTE/ÍNDICE CUSTOMER REF./LEVEL PROJECTO: PROJECT REF. SIMÉTRICA SIMETRICAL REF.	TODAS AS DIMENSÕES EM MILÍMETROS ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS PLATAFORMA CAD: CAD PLATFORM:	CATIA V5 PROIBIDAS MODIFICAÇÕES MANUAIS FORBIDDEN MANUAL MODIFICATIONS CÓDIGO BARRAS: BAR CODE: REFERÊNCIA FICO CABLES: FICOCABLES REFERENCE:	
	ESCALA SCALE 10:1	DENOMINAÇÃO DENOMINATION TUBO INTERIOR INSIDE TUBE	TB1RN00250 C		

Mod. E-010P/2

CAD



MATERIAL: POLIETILENO ALTA DENSIDADE (PEHD), REFª. PLO6104000

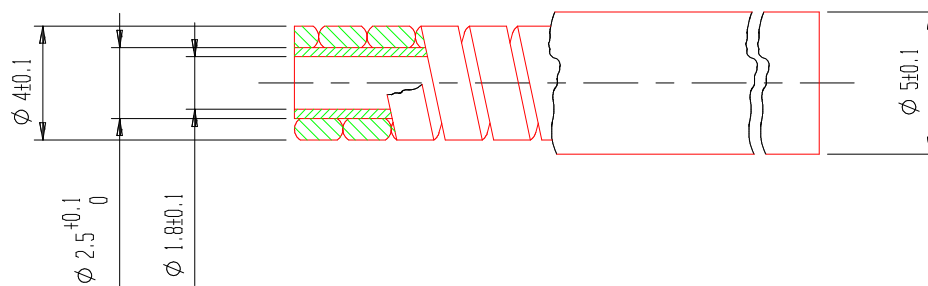
COR: NATURAL

ALTER	C					D					
	A					B					
TOLERANCIAS		DATA		NOME		 FICOCABLES, LDA Fabrica de accesorios e equipamentos industriais					
GERAIS	RESCAS	DESENH.	06.04.2001	LUIS A.							
	ISO 64/6g	VISTO									
Todos os direitos de propriedade nos estao reservados E proibido copiar ou deixar em poder de terceiros sem nossa permissao escrita		APROV.				SUBSTITUI					
		ESCALA		5:1		DESIGNACAO		TUBO INTERIOR		ACAB. PROTECCAO Peça nº TB1EN00251	Mod.

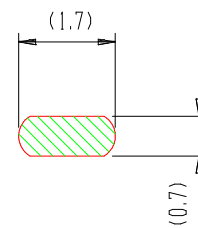
D. Desenho Técnico da Espiral de Aço dos Cabos Analisados

Peça n°
ES21VP0501

CAD



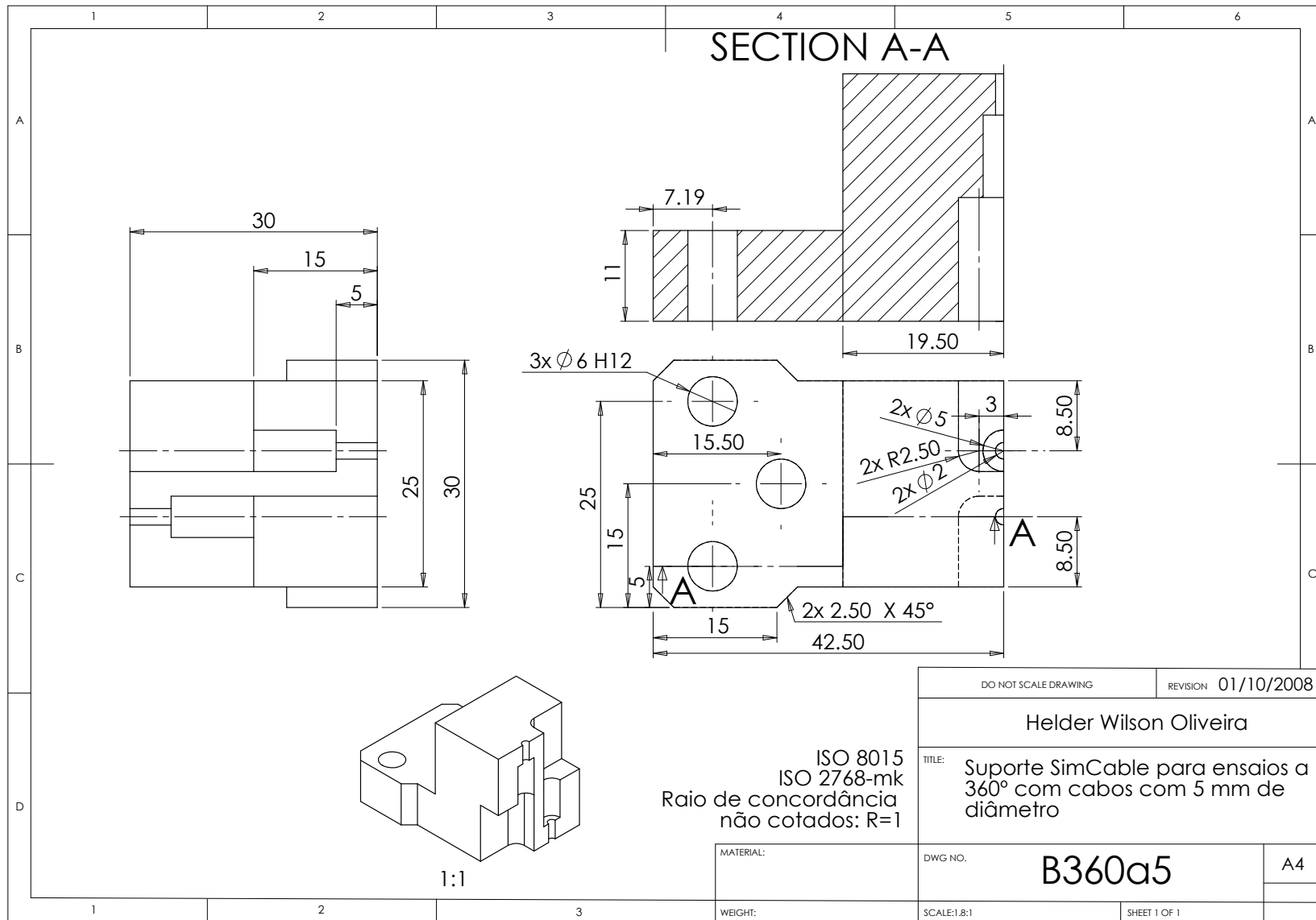
PORMENOR DO LAMINADO
ESCALA 10:1

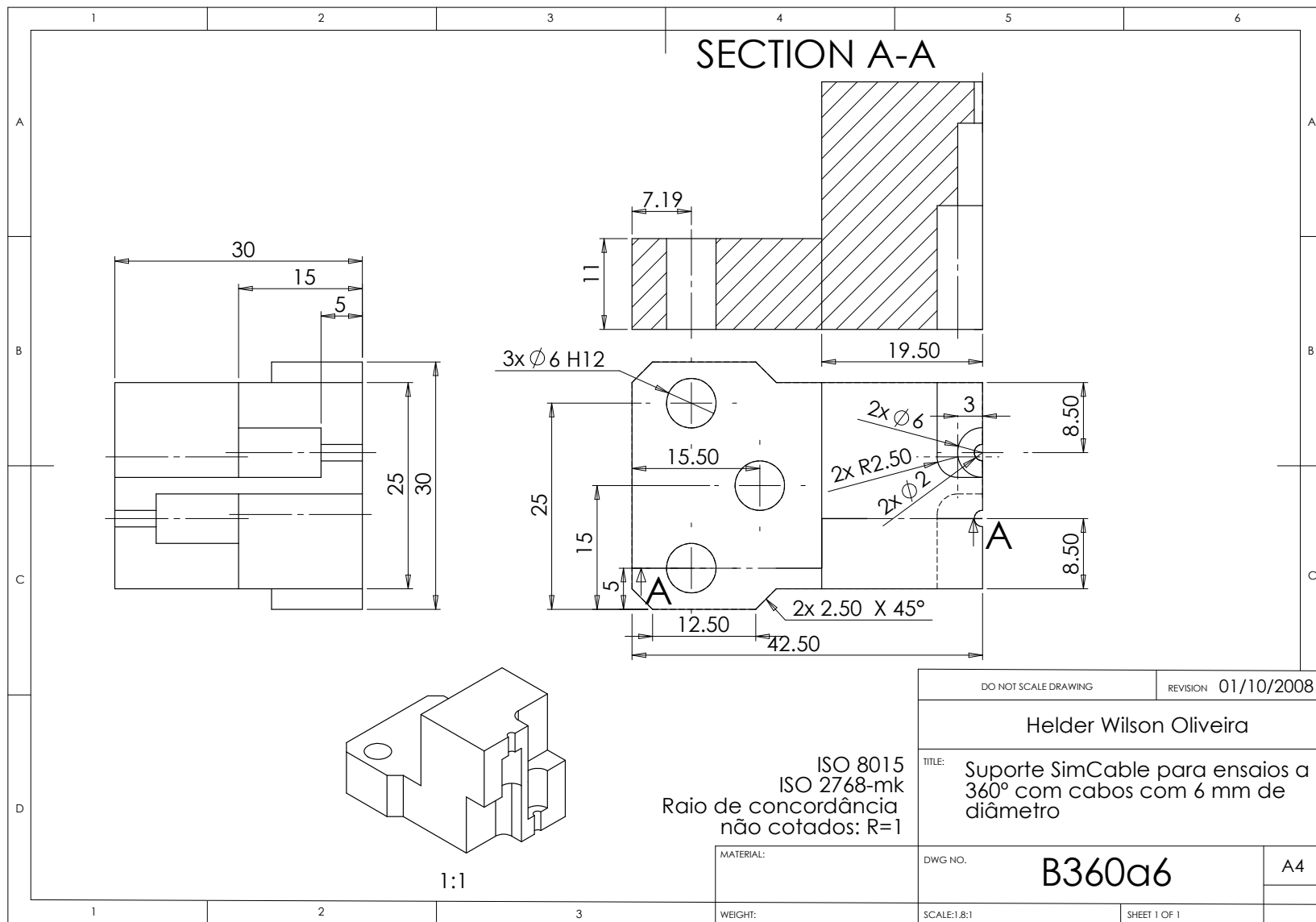


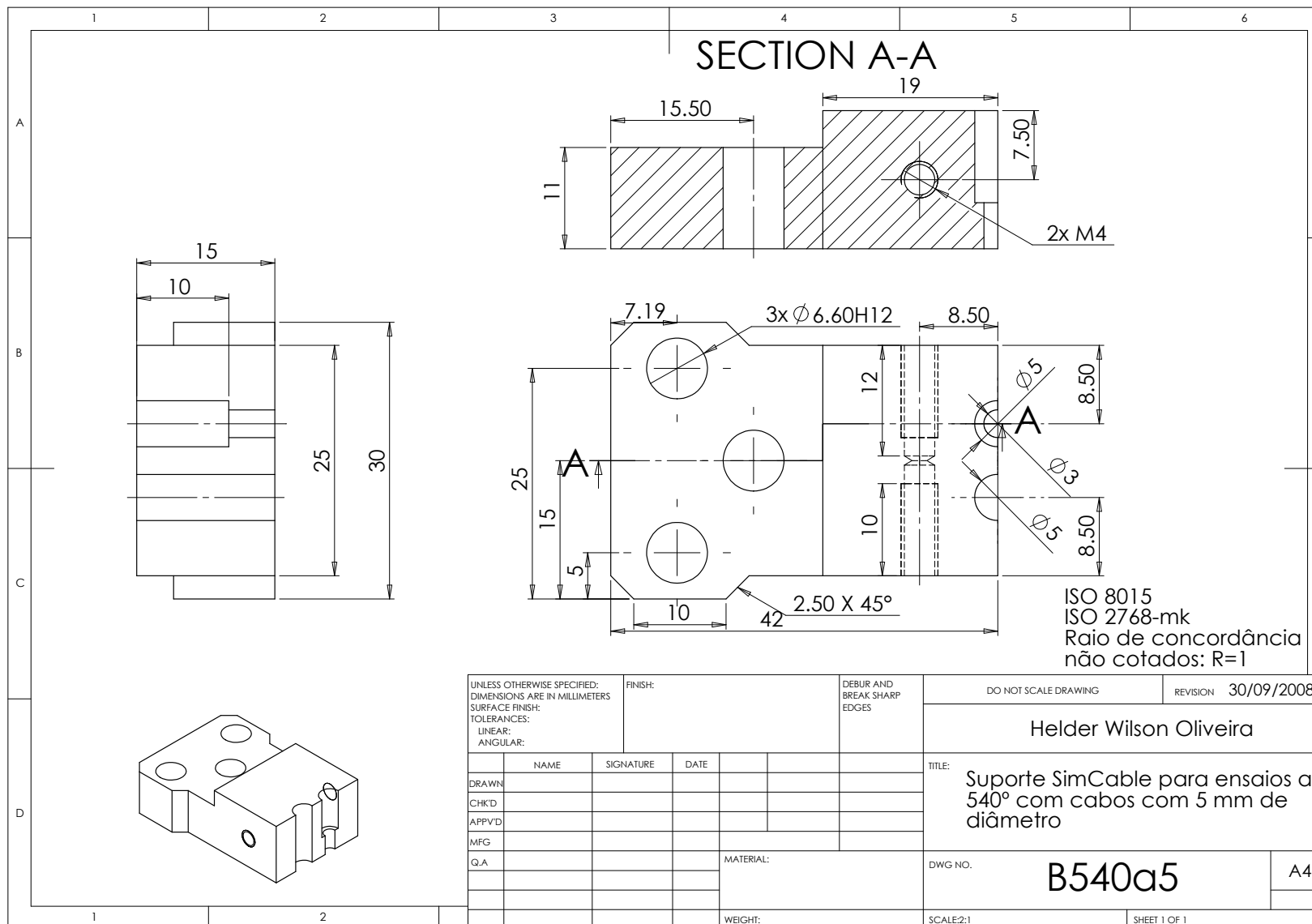
MATERIAL: - ESPIRAL SEM REVESTIMENTO REF. ES31F00403
- TUBO INT. EM PEHD, REF. TB1EN00251
- ARAME $\varnothing 1.2$ S/ DIN 2078 REF. AR1201A5
- REVESTIMENTO >PVC< REF. PLO2112

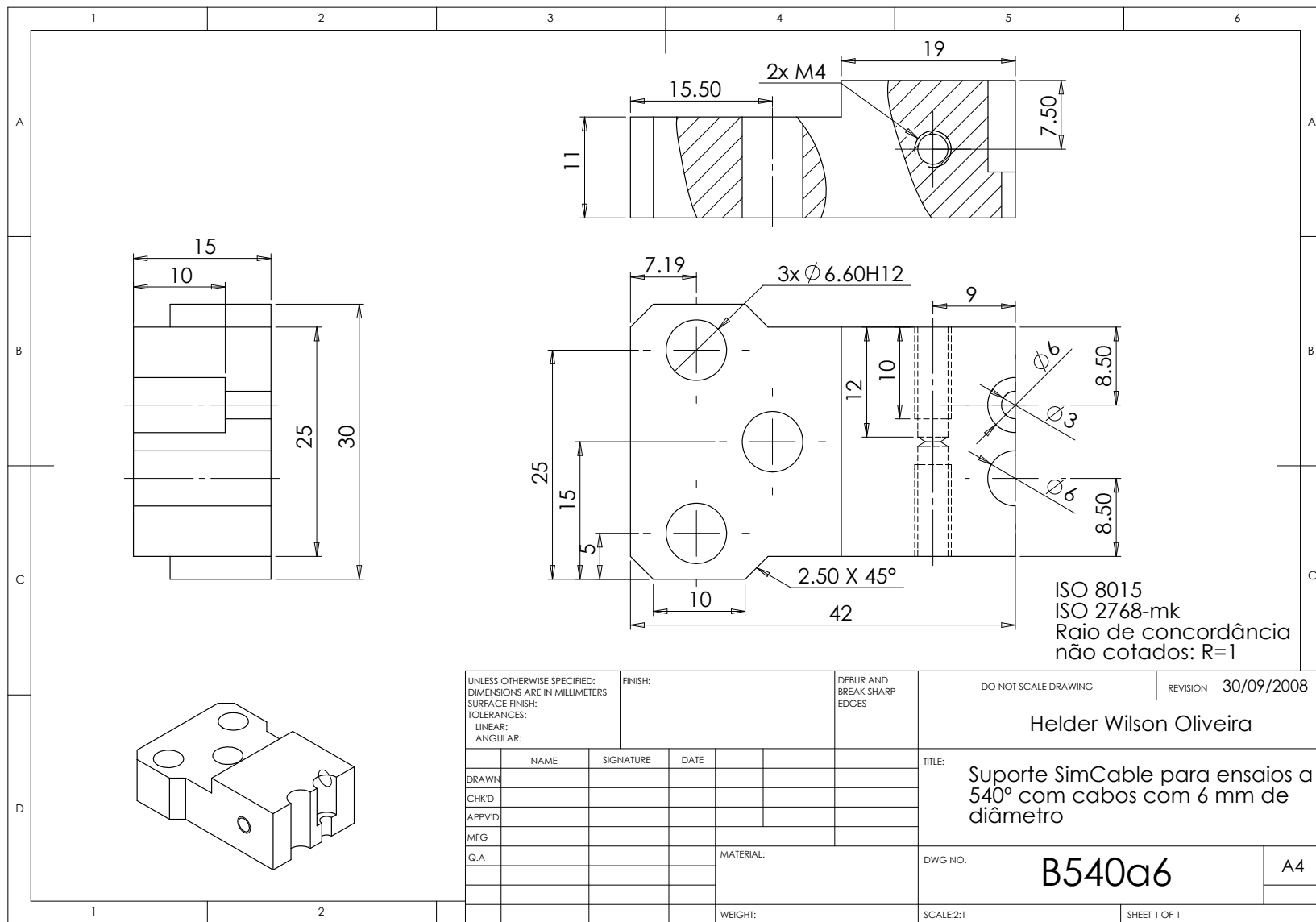
ALTER	C	ALT. TUBO INTERIOR: TB1CN00250 ERA TB1EN00251 16.04.2001 LUIS ABREU			D	ANULAR A MODIFICAÇÃO " C " : TB1EN00251 ERA TB1CN00250 RUI OLIVEIRA 17.07.2001		
	A	ALT. REF. MATERIAL: ES31F00403 ERA POR LAPSO, ES31F00400. 16.04.2001 LUIS ABREU			B	ALT. REVESTIMENTO: PLO2112 ERA PLO0207 29.06.2001 LUIS ABREU		
TOLERANCIAS			DATA	NOME	 FICOCABLES Lda Fabrica de accesorios e equipamentos industriais			
GERAIS	REISCAS	DESENH.	06.04.2001	LUIS A.				
	ISO 8406g	VISTO						
		APROV.						
Todos os direitos de propriedade nos estão reservados. E proibido copiar ou deixar em poder de terceiros sem nossa permissão escrita.					ACAB. PROTECCAO			
SUBSTITUI								
ESCALA		DESIGNAÇÃO			Peça nº		Mod.	
5:1		ESPIRAL LAMINADO C/ TUBO INTERIOR			ES21VP0501		D	

E. Soportes Fabricados









F. Funções de Optimização

Como foi referido, várias tentativas de optimização do coeficiente de atrito foram realizadas recorrendo a formulas empíricas e funções de optimização. Para tal criaram-se alguns outros modelos que dependem de outros parâmetros como o *raio*, a força resistente F_R e a velocidade, e estudou-se a sua eficácia. Para se tentar ter a mesma ordem de grandeza para todos estes parâmetros, estes foram adimensionalizados conforme as seguintes equações:

$$F = \frac{F_R}{f_{adim}} \quad R = \frac{Raio}{r_{adim}} \quad V = \frac{Vel}{v_{adim}} \quad (F.1)$$

em que $f_{adim} = 50N$, $r_{adim} = 250mm$ e $v_{adim} = 9mm/s$.

Como se pode observar, apesar de haver uma diminuição dos erros, em nenhuma das formulações houve um parâmetro com uma tendência clara ou com um peso significativo, à excepção do modelo apresentado na Tabela F.5 conforme foi referido na Secção 5.3.2, face ao parâmetro a representante do coeficiente de atrito, sendo este, inclusive, muito idêntico para todos os casos.

Tabela F.1.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta}$.

	AP				NAP			
	RA	RF	EA	EF	RA	RF	EA	EF
a	0,147	0,224	0,129	0,127	0,146	0,210	0,124	0,126
$e_{max.}$	9,8	14,6	8,9	6,5	4,7	13,3	18,6	5,5
$e_{min.}$	-11,4	-17,8	-12,0	-11,2	-10,4	-13,3	-15,3	-9,3

Tabela F.2.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + b \cdot R + c \cdot R \cdot \beta + d \cdot F}$.

	AP				NAP			
	RA	RF	EA	EF	RA	RF	EA	EF
a	0,154	0,338	0,075	0,133	0,172	0,154	0,072	0,122
b	0,044	0,068	-0,015	0,080	0,012	0,081	-0,139	0,022
c	-0,010	-0,131	0,048	-0,025	-0,021	0,040	0,069	-0,006
d	-0,029	0,026	0,047	0,009	-0,034	-0,011	0,057	0,021
$e_{max.}$	8,3	5,8	6,0	3,7	2,7	11,1	14,5	4,0
$e_{min.}$	-10,2	-9,5	-7,4	-6,6	-7,5	-12,4	-13,0	-7,9

Tabela F.3.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + b \cdot R + d \cdot F}$.

	AP				NAP			
	RA	RF	EA	EF	RA	RF	EA	EF
a	0,145	0,213	0,117	0,110	0,153	0,189	0,135	0,117
b	0,031	-0,067	0,053	0,050	-0,014	0,132	-0,055	0,015
d	-0,021	0,117	0,005	0,027	-0,018	-0,043	0,007	0,025
$e_{max.}$	7,8	13,2	6,5	4,1	4,7	14,5	15,1	3,9
$e_{min.}$	-9,7	-17,8	-10,6	-8,5	-10,4	-14,2	-13,9	-7,8

Tabela F.4.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + b \cdot R}$.

	AP				NAP			
	RA	RF	EA	EF	RA	RF	EA	EF
a	0,144	0,209	0,117	0,111	0,152	0,189	0,135	0,118
b	0,012	0,059	0,058	0,075	-0,031	0,088	-0,049	0,038
$e_{max.}$	9,1	12,7	6,6	4,7	5,1	13,8	15,5	3,8
$e_{min.}$	-10,9	-17,8	-10,3	-10,2	-10,8	-13,7	-14,1	-8,5

Tabela F.5.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + d \cdot F}$.

	AP				NAP			
	RA	RF	EA	EF	RA	RF	EA	EF
a	0,147	0,206	0,121	0,114	0,152	0,201	0,130	0,118
d	-0,003	0,077	0,037	0,057	-0,027	0,039	-0,027	0,034
$e_{max.}$	9,8	12,6	8,2	6,6	4,4	12,9	18,8	4,8
$e_{min.}$	-11,4	-19,4	-12,1	-8,9	-10,1	-13,0	-15,5	-8,3

Tabela F.6.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + e} + f$.

	AP				NAP			
	RA	RF	EA	EF	RA	RF	EA	EF
a	0,141	0,196	0,121	0,108	0,151	0,197	0,142	0,118
e	0,018	0,076	0,038	0,069	-0,030	0,028	-0,076	0,033
f	-0,564	3,203	0,323	1,272	-0,459	1,989	0,245	0,444
$e_{max.}$	9,8	14,7	11,0	7,3	6,3	8,3	12,1	8,6
$e_{min.}$	-9,6	-15,4	-11,4	-8,0	-10,2	-15,4	-15,3	-8,0

Tabela F.7.: Optimização da função $\frac{F_M}{F_R} = e^{a \cdot \beta + g \cdot V}$.

	AP				NAP			
	RA	RF	EA	EF	RA	RF	EA	EF
a	0,142	0,195	0,121	0,108	0,151	0,201	0,142	0,119
g	0,026	0,152	0,045	0,110	-0,027	0,043	-0,093	0,036
$e_{max.}$	8,8	14,7	7,6	3,9	6,0	15,4	13,4	3,9
$e_{min.}$	-10,6	-19,4	-11,0	-9,1	-11,5	-14,8	-13,8	-7,9

G. Curvas F_M^{up} e F_R^{dw} para
Lay-outs Simples

G.1. Ensaio Apoiados

G.1.1. CABO RA

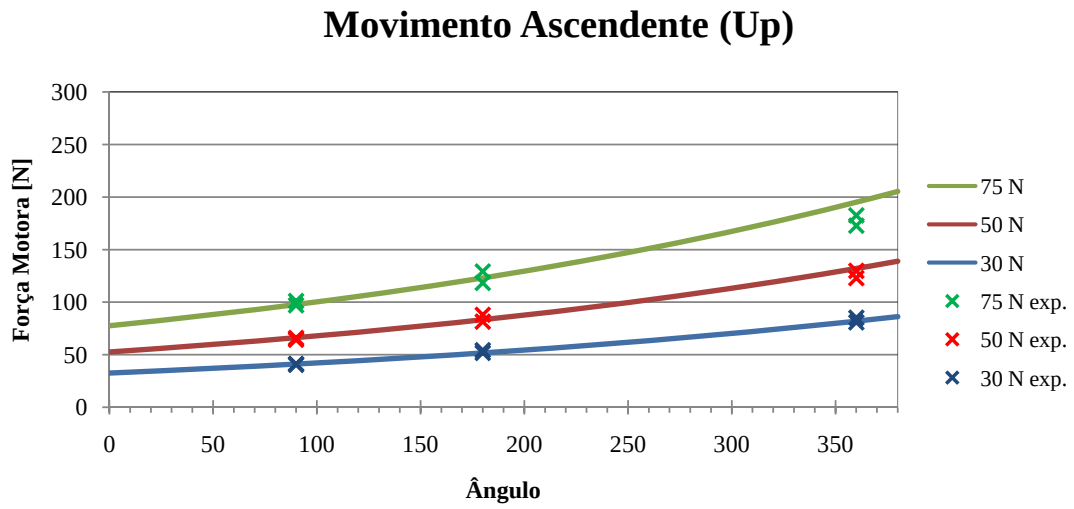


Figura G.1.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

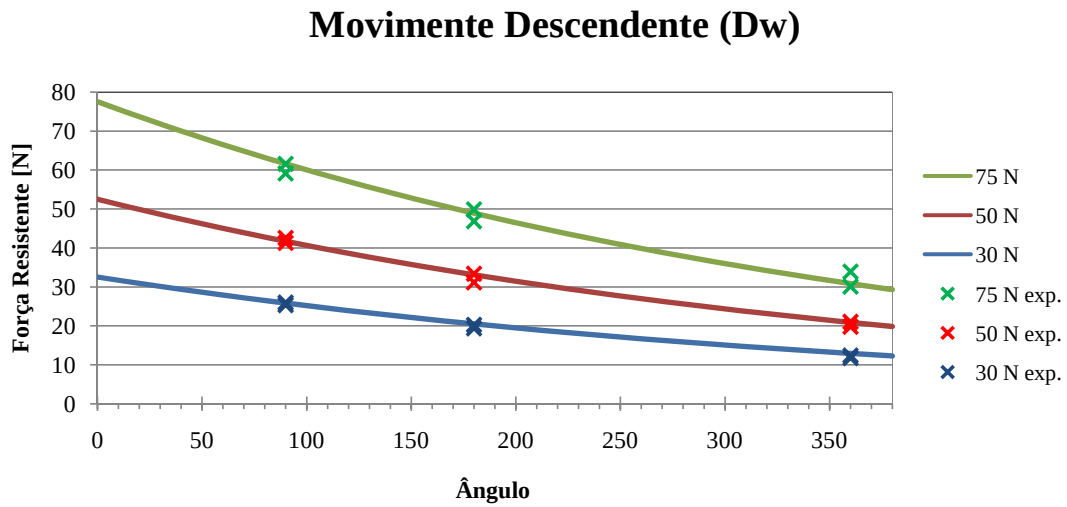


Figura G.2.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

Tabela G.1.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,147$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	41,00	25,86	66,11	41,70	97,68	61,61
180	51,62	20,54	83,24	33,11	123,00	48,93
360	81,84	12,95	131,97	20,89	195,01	30,86

Tabela G.2.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{AP} = 0,147$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	40,42	26,00	-1,4	0,6	64,22	42,59	-2,9	2,1	101,03	59,13	3,4	-4,0
90R300	41,35	25,38	0,0	-1,8	65,95	41,36	-0,2	-0,8	96,90	61,59	-0,8	0,0
180R200	54,23	19,40	5,1	-5,5	87,95	31,19	5,7	-5,8	129,14	46,88	5,0	-4,2
180R300	51,73	20,27	0,2	-1,3	81,41	33,38	-2,2	0,8	118,25	49,89	-3,9	2,0
360R200	85,19	11,77	4,1	-9,1	122,76	21,04	-7,0	0,7	172,72	33,90	-11,4	9,8
360R300	80,83	12,41	-1,2	-4,2	129,73	19,77	-1,7	-5,3	182,53	30,11	-6,4	-2,4

G.1.2. CABO RF

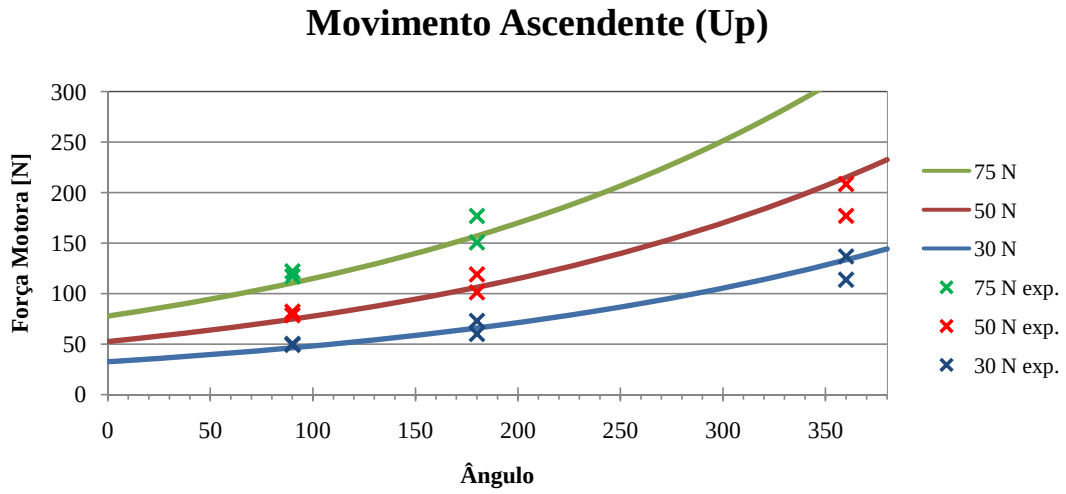


Figura G.3.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0,224$).

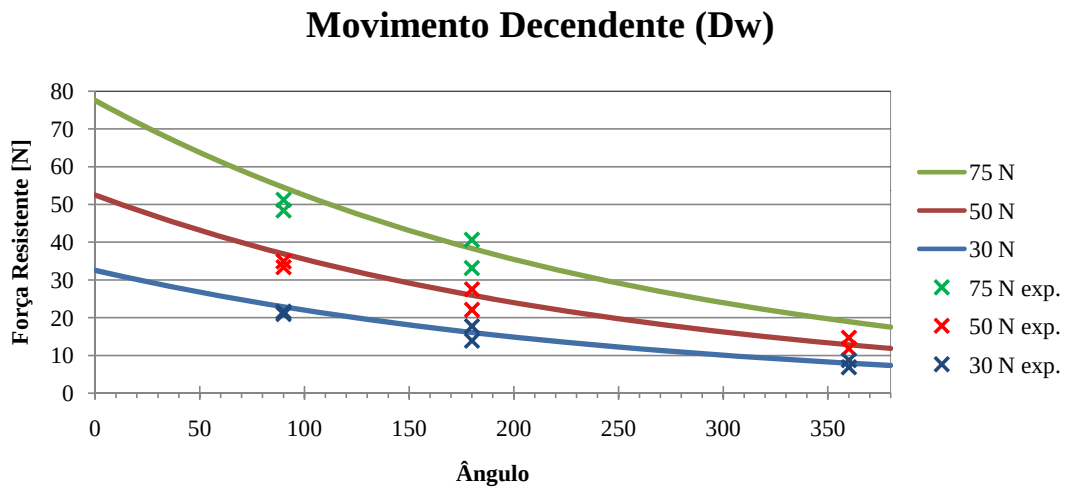


Figura G.4.: Força Resistente no movimento decendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0,224$).

Tabela G.3.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0,224$).

$\hat{Ângulo}$	$\mu = 0,224$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	46,32	22,89	74,69	36,90	110,36	54,53
180	65,89	16,09	106,25	25,94	157,00	38,33
360	133,35	7,95	215,03	12,82	317,74	18,94

Tabela G.4.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{AP} = 0,224$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	50,16	20,96	8,3	-8,4	81,90	33,35	9,7	-9,6	121,89	48,38	10,4	-11,3
90R300	49,07	21,60	5,9	-5,6	78,44	34,91	5,0	-5,4	116,81	51,21	5,8	-6,1
180R200	72,97	13,88	10,7	-13,7	118,90	22,06	11,9	-15,0	176,73	33,13	12,6	-13,6
180R300	59,89	17,71	-9,1	10,1	101,13	27,51	-4,8	6,0	150,51	40,61	-4,1	5,9
360R200	136,76	6,85	2,6	-13,8	208,51	11,78	-3,0	-8,1	---	---	---	---
360R300	113,73	8,73	-14,7	9,8	176,88	14,69	-17,7	14,6	209,68	23,62	-34,0	24,7

G.1.3. CABO EA

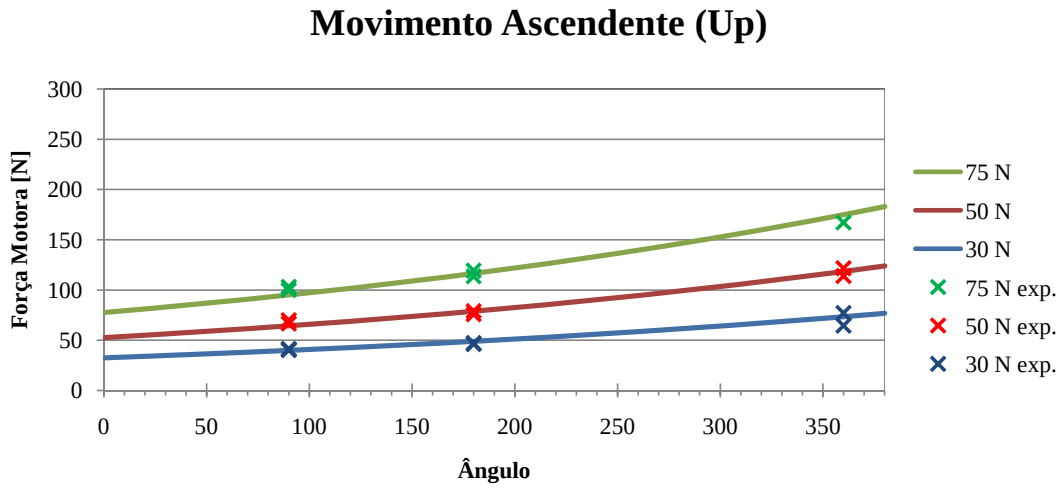


Figura G.5.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0,129$).

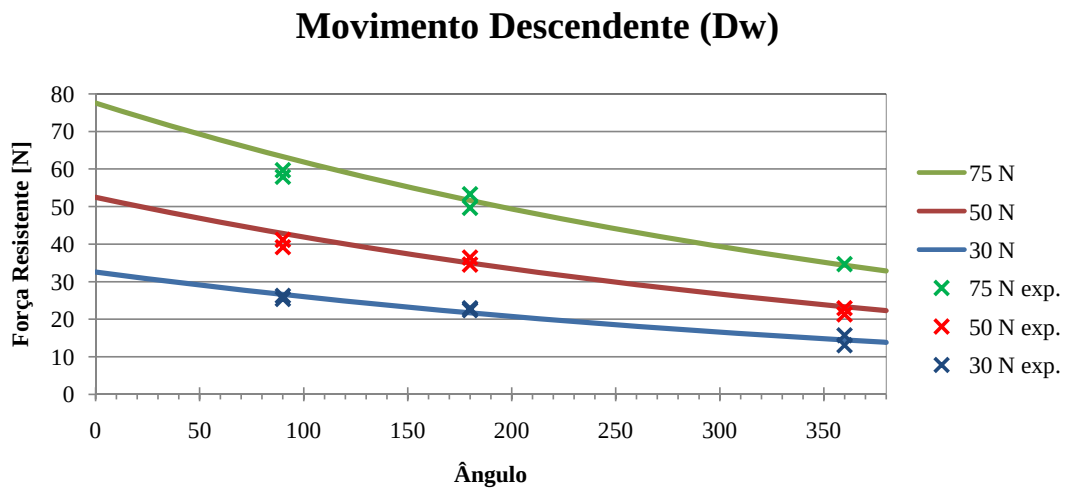


Figura G.6.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0,129$).

Tabela G.5.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0, 129$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0, 129$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	39, 89	26, 57	64, 32	42, 85	95, 05	63, 32
180	48, 87	21, 69	78, 81	34, 97	116, 45	51, 68
360	73, 36	14, 45	118, 30	23, 30	174, 81	34, 43

Tabela G.6.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{AP} = 0, 129$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	40, 14	26, 24	0, 6	-1, 3	66, 43	41, 16	3, 3	-3, 9	99, 81	59, 72	5, 0	-5, 7
90R300	41, 32	25, 43	3, 6	-4, 3	69, 68	39, 18	8, 3	-8, 6	102, 98	57, 93	8, 3	-8, 5
180R200	46, 27	22, 96	-5, 3	5, 9	75, 70	36, 43	-3, 9	4, 2	113, 50	53, 32	-2, 5	3, 2
180R300	47, 19	22, 44	-3, 4	3, 5	78, 85	34, 55	0, 1	-1, 2	119, 19	49, 70	2, 3	-3, 8
360R200	64, 55	15, 73	-12, 0	8, 9	113, 85	22, 94	-3, 8	-1, 5	167, 07	34, 69	-4, 4	0, 8
360R300	77, 10	13, 08	5, 1	-9, 5	121, 53	21, 28	2, 7	-8, 7	—	—	—	—

G.1.4. CABO EF

Movimento Ascendente (Up)

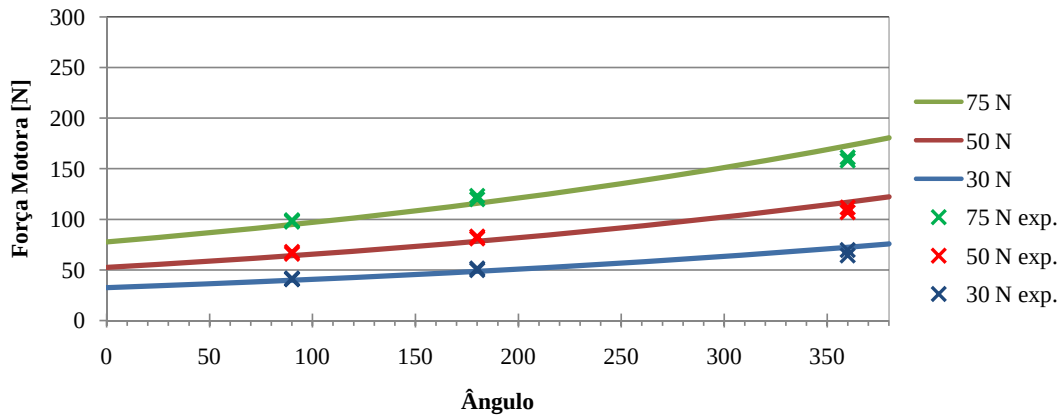


Figura G.7.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0,127$).

Movimento Descendente (Dw)

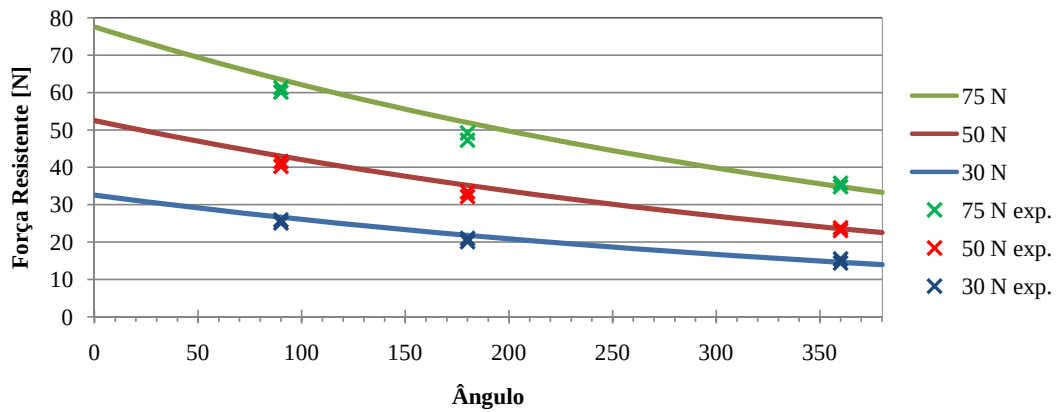


Figura G.8.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0,127$).

Tabela G.7.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0,127$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,127$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	39,77	26,65	64,13	42,98	94,77	63,51
180	48,58	21,82	78,34	35,18	115,76	51,99
360	72,49	14,62	116,90	23,58	172,74	34,84

Tabela G.8.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{AP} = 0,127$).

	Valores obtidos experimentalmente												
	30N			<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
<i>Ensaio</i>	F_M^{up}	F_R^{dw}		F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	41,77	25,09		5,0	-5,9	67,77	40,23	5,7	-6,4	99,19	60,15	4,7	-5,3
90R300	40,78	25,92		2,5	-2,8	65,97	41,56	2,9	-3,3	97,69	61,31	3,1	-3,5
180R200	49,92	20,96		2,8	-3,9	81,13	33,41	3,6	-5,0	119,82	49,25	3,5	-5,3
180R300	51,53	20,09		6,1	-7,9	83,11	32,14	6,1	-8,7	123,24	47,27	6,5	-9,1
360R200	69,79	14,43		-3,7	-1,3	111,67	23,09	-4,5	-2,1	161,21	35,81	-6,7	2,8
360R300	64,38	15,48		-11,2	5,9	106,98	23,81	-8,5	1,0	158,13	34,83	-8,5	0,0

G.2. Ensaio Não-Apoiados

G.2.1. CABO RA

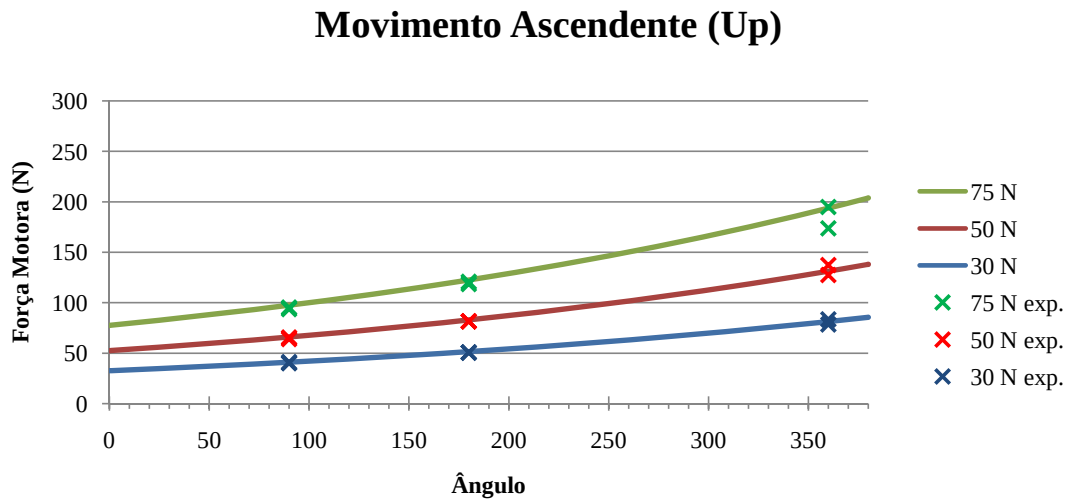


Figura G.9.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

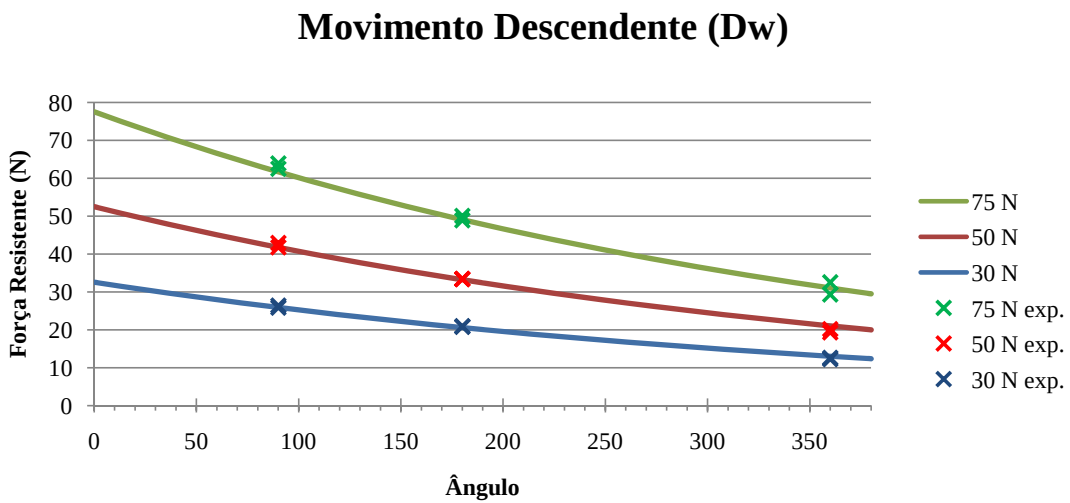


Figura G.10.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

Tabela G.9.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,146$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	40,93	25,90	66,00	41,76	97,53	61,71
180	51,46	20,60	82,98	33,22	122,61	49,09
360	81,33	13,03	131,14	21,02	193,79	31,06

Tabela G.10.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RA apoiado ($\mu_{RA}^{NAP} = 0,146$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	39,99	26,38	-2,3	1,9	63,95	42,90	-3,1	2,7	93,60	63,89	-4,0	3,5
90R300	40,99	25,84	0,1	-0,2	65,56	41,73	-0,7	-0,1	95,25	62,48	-2,3	1,2
180R200	50,82	20,80	-1,2	1,0	81,39	33,44	-1,9	0,7	118,44	50,03	-3,4	1,9
180R300	50,45	20,98	-2,0	1,8	81,67	33,33	-1,6	0,3	120,66	48,89	-1,6	-0,4
360R200	83,41	12,25	2,6	-6,0	137,24	19,29	4,6	-8,2	194,95	29,30	0,6	-5,7
360R300	78,41	12,59	-3,6	-3,4	127,30	20,14	-2,9	-4,2	173,66	32,50	-10,4	4,6

G.2.2. CABO RF

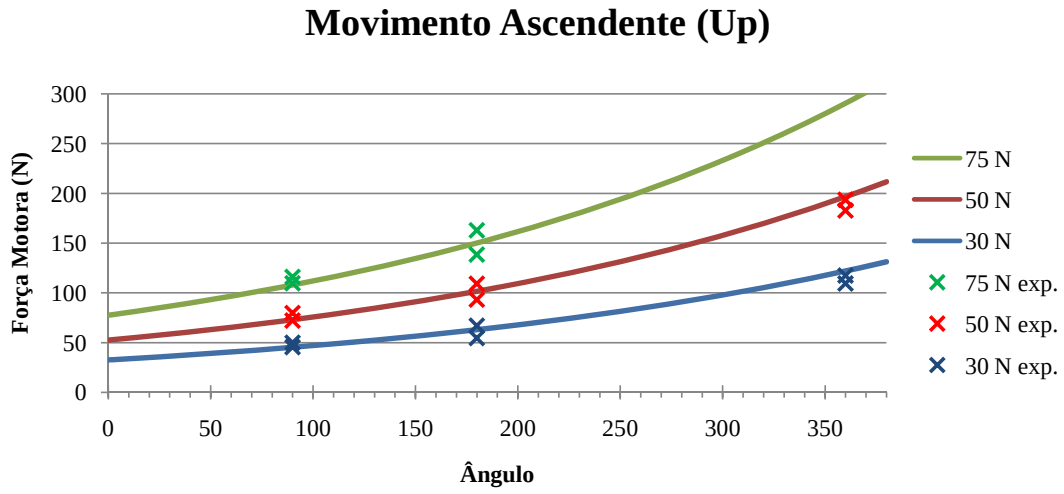


Figura G.11.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0,210$).

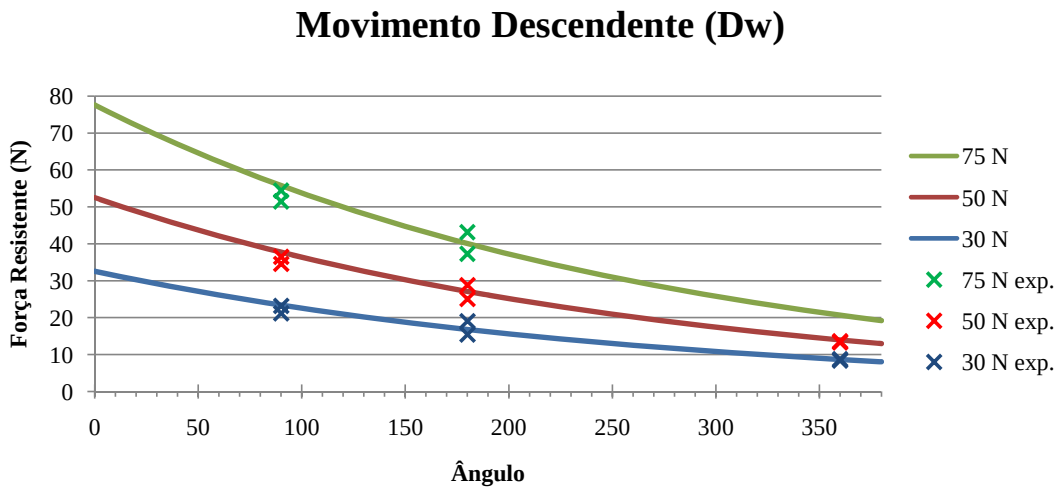


Figura G.12.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0,210$).

Tabela G.11.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0,210$).

$\hat{Ângulo}$	$\mu = 0,210$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	45,30	23,40	73,04	37,74	107,93	55,76
180	63,02	16,82	101,62	27,13	150,15	40,08
360	121,97	8,69	196,68	14,01	290,62	20,71

Tabela G.12.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RF apoiado ($\mu_{RF}^{NAP} = 0,210$).

	Valores obtidos experimentalmente																			
	30N			erro (%)		50N		erro (%)		75N		erro (%)								
Ensaio	F_M^{up}	F_R^{dw}			F_M^{up}	F_R^{dw}			F_M^{up}	F_R^{dw}										
90R200	45,52	23,19			0,5	-0,9			72,25	36,48			-1,1	-3,3	109,77	54,41			1,7	-2,4
90R300	50,16	21,16			10,7	-9,6			79,89	34,54			9,4	-8,5	116,16	51,45			7,6	-7,7
180R200	54,65	19,06			-13,3	13,3			93,24	28,80			-8,2	6,2	138,62	43,13			-7,7	7,6
180R300	67,07	15,45			6,4	-8,2			109,32	25,03			7,6	-7,7	162,93	37,25			8,5	-7,1
360R200	109,45	8,77			-10,3	0,9			182,87	13,59			-7,0	-3,0	209,66	20,39			-27,9	-1,5
360R300	117,51	8,40			-3,7	-3,3			193,72	13,27			-1,5	-5,3	209,66	20,02			-27,9	-3,3

G.2.3. CABO EA

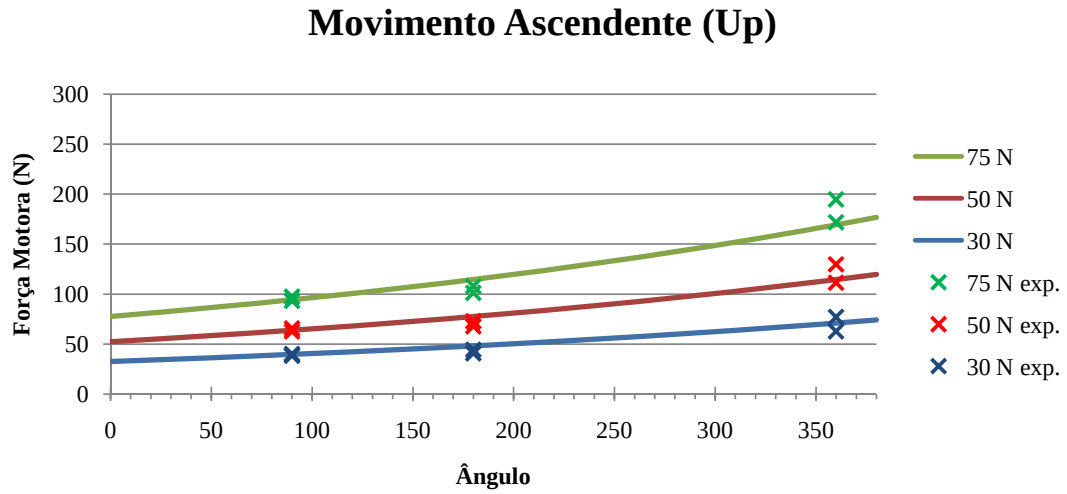


Figura G.13.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0,124$).

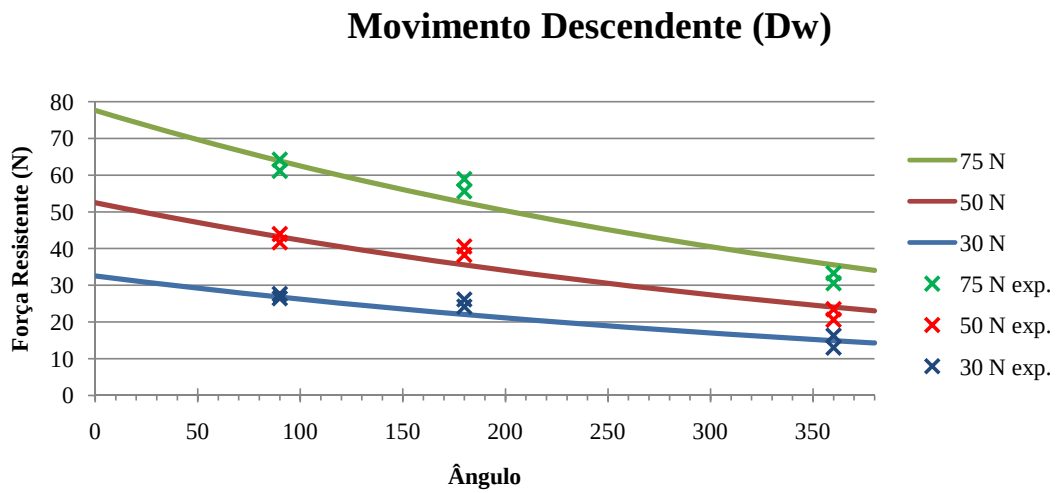


Figura G.14.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0,124$).

Tabela G.13.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0,124$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,124$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	39,57	26,79	63,81	43,20	94,29	63,83
180	48,10	22,04	77,56	35,54	114,60	52,52
360	71,05	14,92	114,57	24,06	169,30	35,55

Tabela G.14.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EA apoiado ($\mu_{EA}^{NAP} = 0,124$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	38,37	27,64	-3,0	3,2	62,69	43,97	-1,8	1,8	93,31	64,25	-1,0	0,7
90R300	40,00	26,46	1,1	-1,2	65,61	41,68	2,8	-3,5	97,49	61,19	3,4	-4,1
180R200	44,42	24,17	-7,6	9,7	72,79	38,29	-6,1	7,7	107,94	55,62	-5,8	5,9
180R300	40,74	26,13	-15,3	18,6	67,82	40,59	-12,6	14,2	101,32	58,99	-11,6	12,3
360R200	62,71	16,31	-11,7	9,3	111,54	23,50	-2,6	-2,3	171,98	33,31	1,6	-6,3
360R300	77,04	13,02	8,4	-12,7	129,86	20,60	13,3	-14,4	194,85	30,58	15,1	-14,0

G.2.4. CABO EF

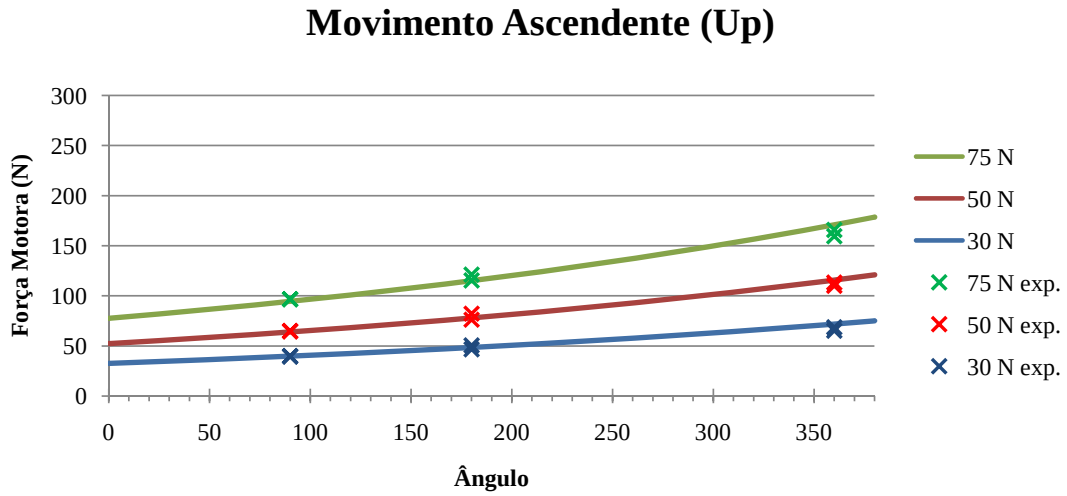


Figura G.15.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0,126$).

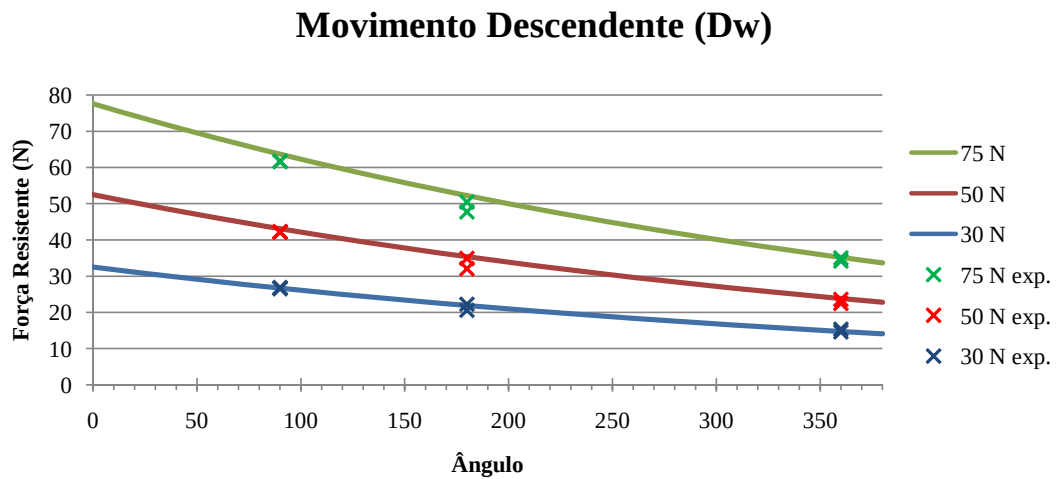


Figura G.16.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0,126$).

Tabela G.15.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0,126$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,126$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	39,67	26,72	63,97	43,09	94,53	63,67
180	48,34	21,93	77,95	35,36	115,18	52,25
360	71,77	14,77	115,73	23,82	171,01	35,19

Tabela G.16.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EF apoiado ($\mu_{EF}^{NAP} = 0,126$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	39,92	26,51	0,6	-0,8	64,47	42,31	0,8	-1,8	96,55	61,66	2,1	-3,2
90R300	39,49	26,84	-0,5	0,4	65,06	42,10	1,7	-2,3	96,71	61,71	2,3	-3,1
180R200	46,64	22,24	-3,5	1,4	76,20	34,91	-2,2	-1,3	115,41	50,49	0,2	-3,4
180R300	50,51	20,56	4,5	-6,2	82,25	32,08	5,5	-9,3	121,12	47,75	5,2	-8,6
360R200	68,68	14,61	-4,3	-1,1	113,29	22,48	-2,1	-5,6	165,83	34,21	-3,0	-2,8
360R300	65,33	15,36	-9,0	4,0	110,01	23,59	-4,9	-1,0	159,56	35,02	-6,7	-0,5

H. Curvas F_M^{up} e F_R^{dw} para *Lay-outs Complexos*

H.1. CABO RA

Movimento Ascendente (Up)

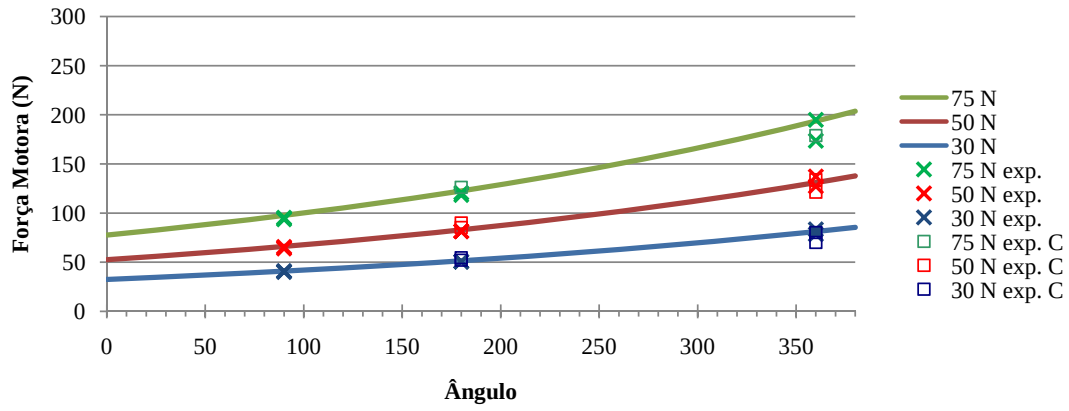


Figura H.1.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

Movimento Descendente (Dw)

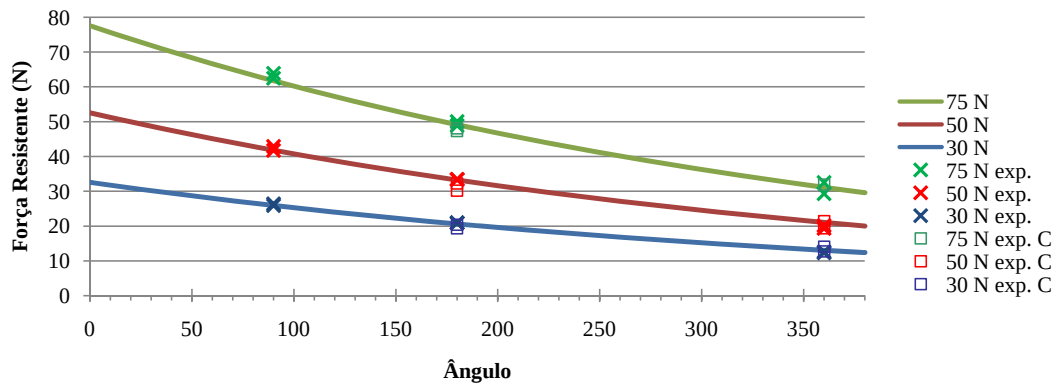


Figura H.2.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo RA ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

Tabela H.1.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo *RA* ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,146$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	40,92	25,91	65,98	41,77	97,50	61,73
180	51,43	20,61	82,92	33,24	122,54	49,12
360	81,23	13,05	130,98	21,04	193,54	31,10

Tabela H.2.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo *RA* ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	39,99	26,38	-2,3	1,8	63,95	42,90	-3,1	2,7	93,60	63,89	-4,0	3,5
90R300	40,99	25,84	0,2	-0,3	65,56	41,73	-0,6	-0,1	95,25	62,48	-2,3	1,2
180R200	50,82	20,80	-1,2	0,9	81,39	33,44	-1,9	0,6	118,44	50,03	-3,3	1,9
180R300	50,45	20,98	-1,9	1,8	81,67	33,33	-1,5	0,3	120,66	48,89	-1,5	-0,5
D2x160 + 400	54,62	19,35	6,2	-6,1	89,90	30,14	8,4	-9,3	126,23	47,29	3,0	-3,7
D2x150 + 0	52,16	20,38	1,4	-1,1	85,40	32,21	3,0	-3,1	126,22	48,08	3,0	-2,1
360R200	83,41	12,25	2,7	-6,1	137,24	19,29	4,8	-8,3	194,95	29,30	0,7	-5,8
360R300	78,41	12,59	-3,5	-3,5	127,30	20,14	-2,8	-4,3	173,66	32,50	-10,3	4,5
S2x150	70,17	14,08	-13,6	7,9	121,28	21,41	-7,4	1,7	— — — — —	— — — — —	— — — — —	— — — — —
SB200A100	80,22	12,72	-1,2	-2,5	134,03	19,32	2,3	-8,2	179,01	31,93	-7,5	2,7

H.2. CABO RF

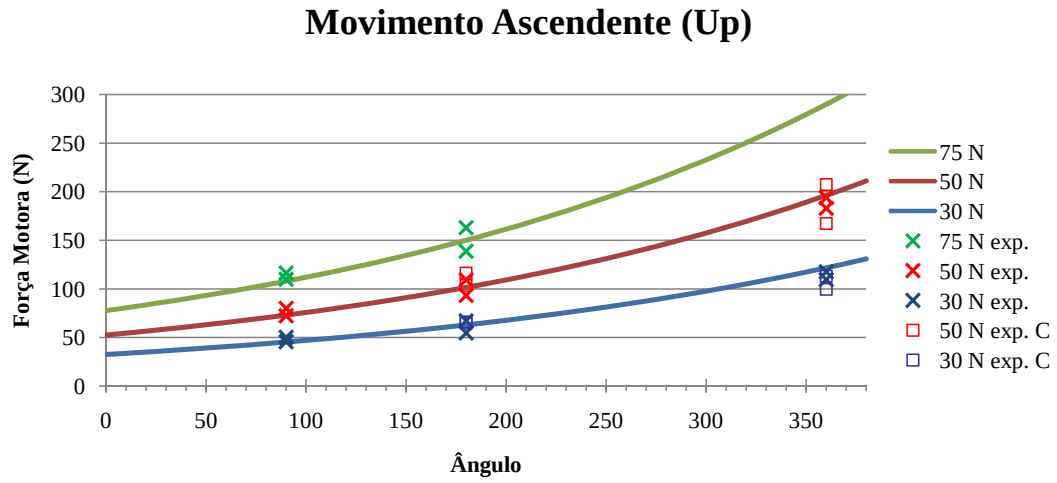


Figura H.3.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0, 210$).

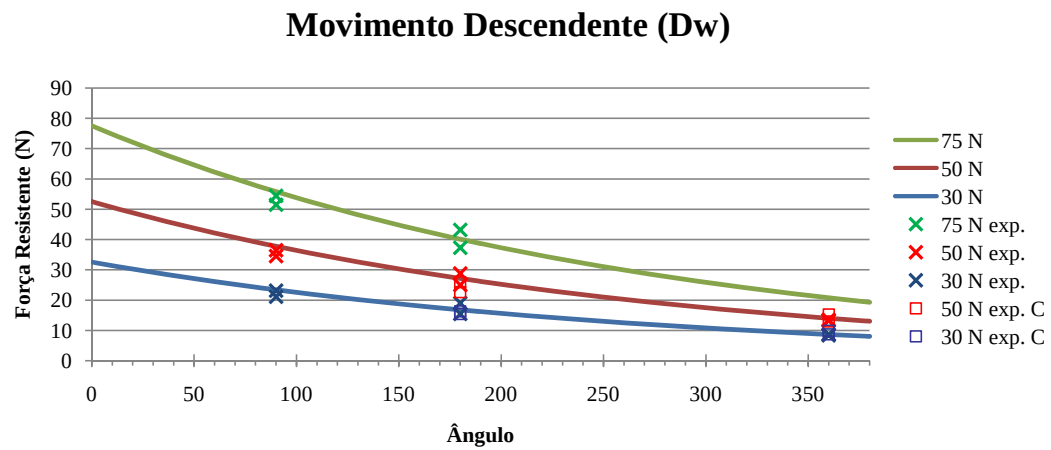


Figura H.4.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0, 210$).

Tabela H.3.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,210$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	45,27	23,42	72,99	37,76	107,86	55,80
180	62,94	16,84	101,49	27,16	149,97	40,13
360	121,66	8,71	196,18	14,05	289,89	20,76

Tabela H.4.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$).

<i>Ensaio</i>	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		<i>erro</i> (%)		50N		<i>erro</i> (%)		75N		<i>erro</i> (%)	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	45,52	23,19	-1,2	0,8	72,25	36,48	-2,7	-1,7	109,77	54,41	0,0	-0,8
90R300	50,16	21,16	8,9	-8,0	79,89	34,54	7,5	-6,9	116,16	51,45	5,8	-6,2
180R200	54,65	19,06	-16,2	17,2	93,24	28,80	-11,3	9,8	138,62	43,13	-10,8	11,3
180R300	67,07	15,45	2,9	-5,0	109,32	25,03	4,0	-4,5	162,93	37,25	4,9	-3,9
D2x160 + 400	66,08	15,44	1,4	-5,0	116,14	22,70	10,5	-13,4	167,57	35,13	7,9	-9,3
D2x150 + 0	64,64	16,34	-0,9	0,5	103,63	25,96	-1,4	-1,0	154,85	37,36	-0,3	-3,6
360R200	109,45	8,77	-16,2	8,0	182,87	13,59	-13,1	3,8	209,66	20,39	-32,6	5,4
360R300	117,51	8,40	-10,0	3,5	193,72	13,27	-8,0	1,3	209,66	20,02	-32,6	3,5
S2x150	99,59	9,96	-23,7	22,7	167,24	15,27	-20,6	16,6	---	---	---	---
SB200A100	113,10	8,78	-13,4	8,1	207,28	12,98	-1,5	-0,9	---	---	---	---

H.3. CABO EA

Movimento Ascendente (Up)

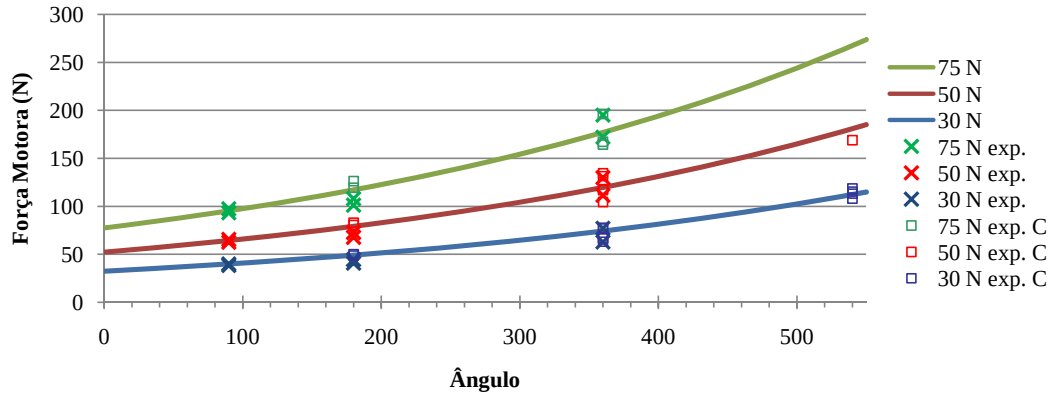


Figura H.5.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$).

Movimento Descendente (Dw)

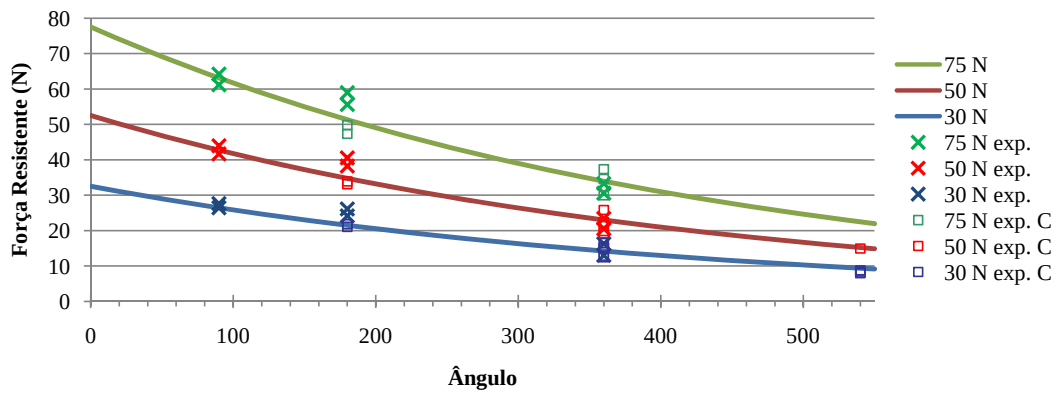


Figura H.6.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$).

Tabela H.5.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$).

$\hat{Angulo}$	$\mu = 0,131$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	40,03	26,48	64,55	42,70	95,38	63,10
180	49,21	21,54	79,36	34,73	117,26	51,32
360	74,39	14,25	119,95	22,98	177,25	33,96
540	112,44	9,43	181,31	15,20	267,91	22,46

Tabela H.6.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo EA ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$).

	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		erro (%)		50N		erro (%)		75N		erro (%)	
<i>Ensaio</i>	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	38,37	27,64	-4,1	4,4	62,69	43,97	-2,9	3,0	93,31	64,25	-2,2	1,8
90R300	40,00	26,46	-0,1	-0,1	65,61	41,68	1,6	-2,4	97,49	61,19	2,2	-3,0
180R200	44,42	24,17	-9,7	12,2	72,79	38,29	-8,3	10,2	107,94	55,62	-8,0	8,4
180R300	40,74	26,13	-17,2	21,3	67,82	40,59	-14,5	16,9	101,32	58,99	-13,6	14,9
D2x160 + 400	50,25	21,12	2,1	-1,9	82,98	33,16	4,6	-4,5	126,33	47,33	7,7	-7,8
D2x150 + 0	48,70	21,85	-1,0	1,4	80,40	33,91	1,3	-2,4	119,32	49,81	1,8	-3,0
360R200	62,71	16,31	-15,7	14,5	111,54	23,50	-7,0	2,3	171,98	33,31	-3,0	-1,9
360R300	77,04	13,02	3,6	-8,6	129,86	20,60	8,3	-10,4	194,85	30,58	9,9	-9,9
S2x150	67,06	15,00	-9,8	5,3	116,84	22,37	-2,6	-2,7	164,36	34,59	-7,3	1,9
	66,61	15,30	-10,5	7,4	117,95	22,33	-1,7	-2,8	208,69	28,67	17,7	-15,6
SB300A100	77,63	12,54	4,4	-12,0	131,39	19,88	9,5	-13,5	196,25	29,99	10,7	-11,7
SB200A100	77,10	12,94	3,6	-9,2	134,35	19,25	12,0	-16,2	209,45	26,38	18,2	-22,3
SA300B100	63,20	16,54	-15,0	16,1	104,45	25,84	-12,9	12,4	167,22	37,39	-5,7	10,1
3CB3x100A	107,90	8,83	-4,0	-6,3	168,91	14,98	-6,8	-1,5	---	---	---	---
3CB150100150A	113,12	8,50	0,6	-9,8	212,59	10,21	17,3	-32,8	---	---	---	---
3CB100200100A	118,57	8,05	5,5	-14,6	---	---	---	---	---	---	---	---
3CB100150150A	115,30	8,09	2,5	-14,2	---	---	---	---	---	---	---	---

H.4. CABO EF

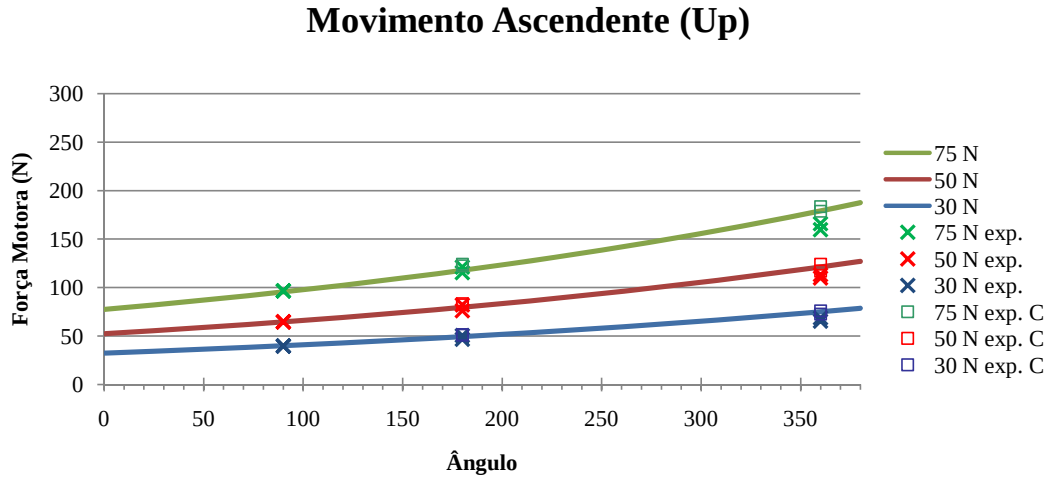


Figura H.7.: Força Motora no movimento ascendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$).

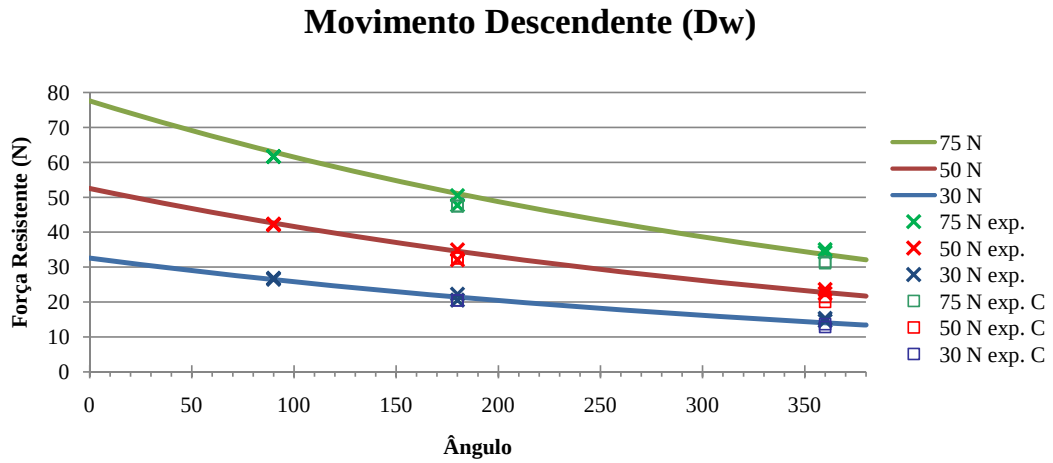


Figura H.8.: Força Resistente no movimento descendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$).

Tabela H.7.: Valores numéricos das Forças Motora e Resistente para o cabo *EF* ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$).

<i>Ângulo</i>	$\mu = 0,133$					
	30N		50N		75N	
	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90	40,14	26,41	64,72	42,59	95,63	62,93
180	49,48	21,43	79,78	34,55	117,89	51,05
360	75,18	14,10	121,24	22,74	179,15	33,59

Tabela H.8.: Erros dos valores experimentais das forças relativos ao valor numérico para o cabo *EF* ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$).

	Valores obtidos experimentalmente											
	30N		erro (%)		50N		erro (%)		75N		erro (%)	
Ensaio	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}	F_M^{up}	F_R^{dw}
90R200	39,92	26,51	-0,5	0,4	64,47	42,31	-0,4	-0,7	96,55	61,66	1,0	-2,0
90R300	39,49	26,84	-1,6	1,6	65,06	42,10	0,5	-1,1	96,71	61,71	1,1	-1,9
180R200	46,64	22,24	-5,7	3,8	76,20	34,91	-4,5	1,0	115,41	50,49	-2,1	-1,1
180R300	50,51	20,56	2,1	-4,0	82,25	32,08	3,1	-7,1	121,12	47,75	2,7	-6,5
D2x160 + 400	50,89	20,44	2,9	-4,6	82,27	32,77	3,1	-5,1	122,52	47,61	3,9	-6,7
D2x150 + 0	51,49	20,52	4,1	-4,2	83,41	32,50	4,5	-5,9	124,11	47,38	5,3	-7,2
360R200	68,68	14,61	-8,7	3,6	113,29	22,48	-6,6	-1,1	165,83	34,21	-7,4	1,8
360R300	65,33	15,36	-13,1	8,9	110,01	23,59	-9,3	3,8	159,56	35,02	-10,9	4,2
S2x150	75,99	12,84	1,1	-8,9	124,10	20,04	2,4	-11,9	178,57	31,10	-0,3	-7,4
SB200A100	72,70	13,64	-3,3	-3,3	117,07	21,48	-3,4	-5,5	183,41	31,47	2,4	-6,3

I. Resultados dos Ensaaios TF nas
Curvas F_M^{up} e F_R^{dw} para *Lay-outs*
Complexos

I.1. CABO *RA*

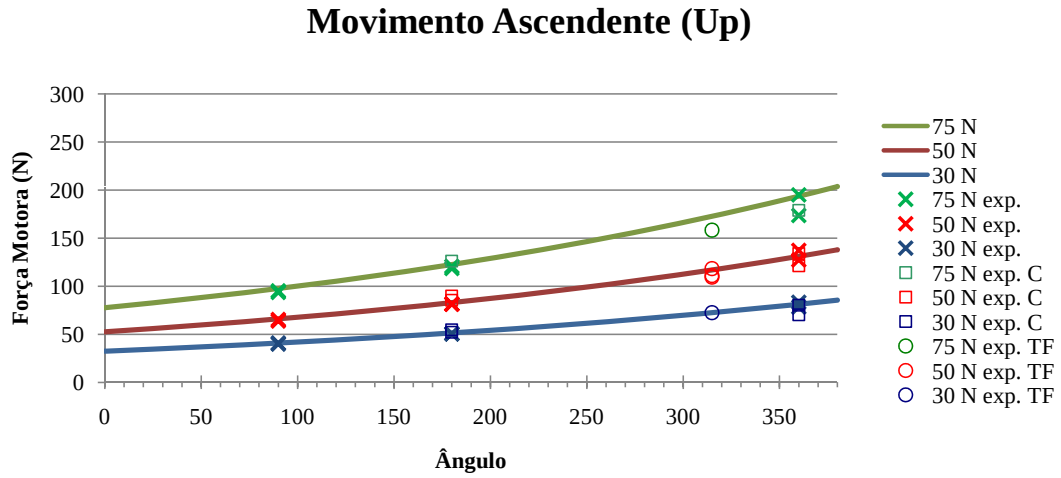


Figura I.1.: Força motora no movimento ascendente para o cabo *RA* ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.

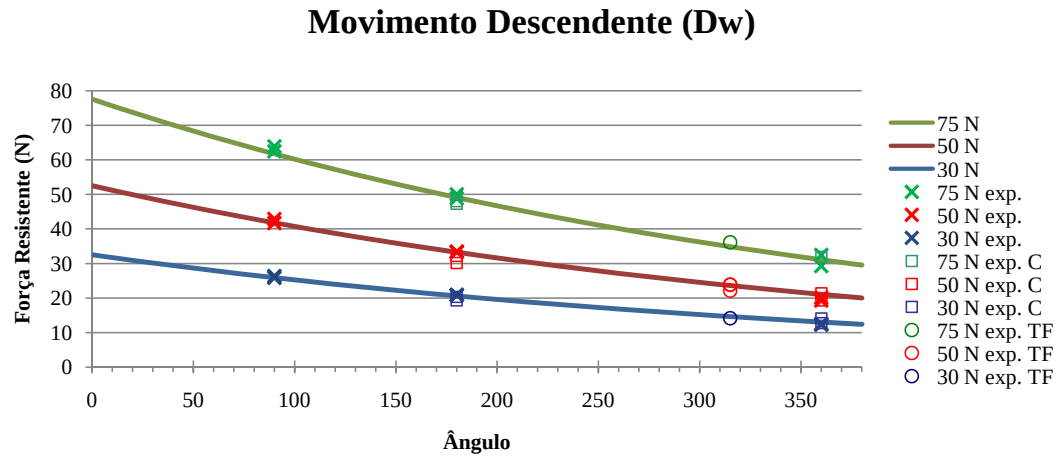


Figura I.2.: Força resistente no movimento descendente para o cabo *RA* ($\mu_{RA}^{CPLX} = 0,146$) e representação dos valores experimentais obtidos.

I.2. CABO RF

Movimento Ascendente (Up)

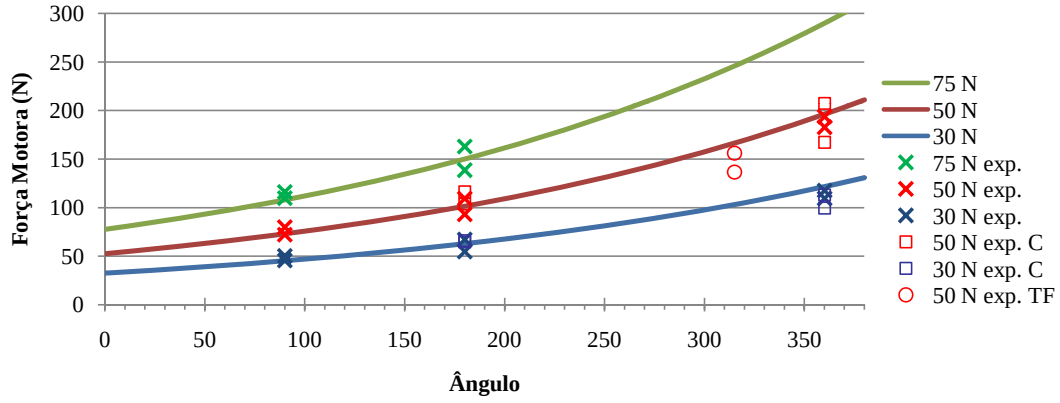


Figura I.3.: Força motora no movimento ascendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$) e representação dos valores experimentais obtidos.

Movimento Descendente (Dw)

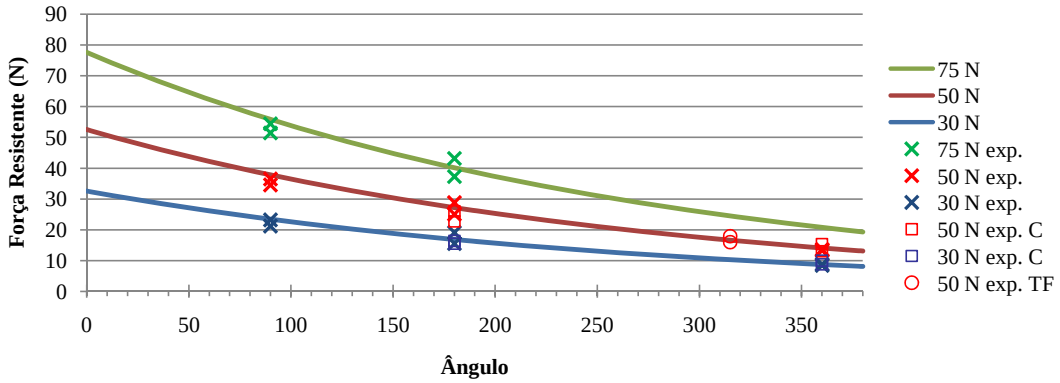


Figura I.4.: Força resistente no movimento descendente para o cabo RF ($\mu_{RF}^{CPLX} = 0,210$) e representação dos valores experimentais obtidos.

I.3. CABO *EA*

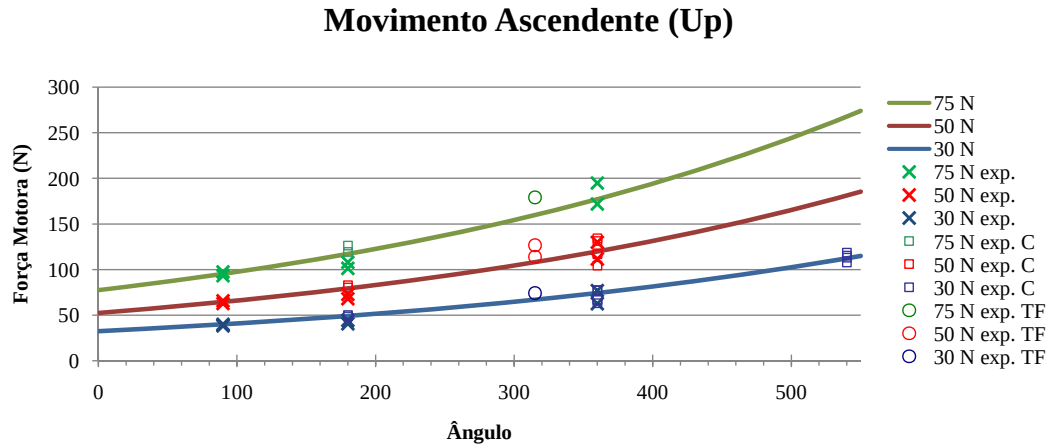


Figura I.5.: Força motora no movimento ascendente para o cabo *EA* ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$) e representação dos valores experimentais obtidos.

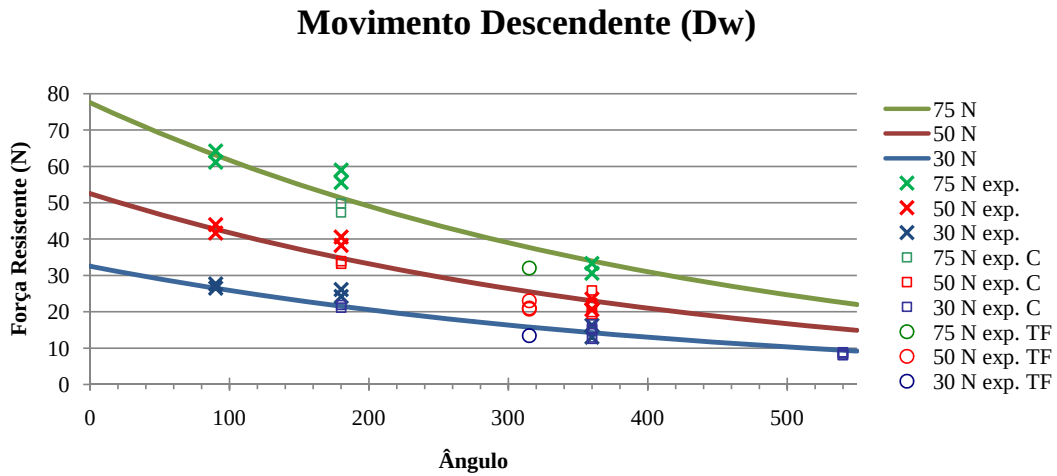


Figura I.6.: Força resistente no movimento descendente para o cabo *EA* ($\mu_{EA}^{CPLX} = 0,132$) e representação dos valores experimentais obtidos.

I.4. CABO EF

Movimento Ascendente (Up)

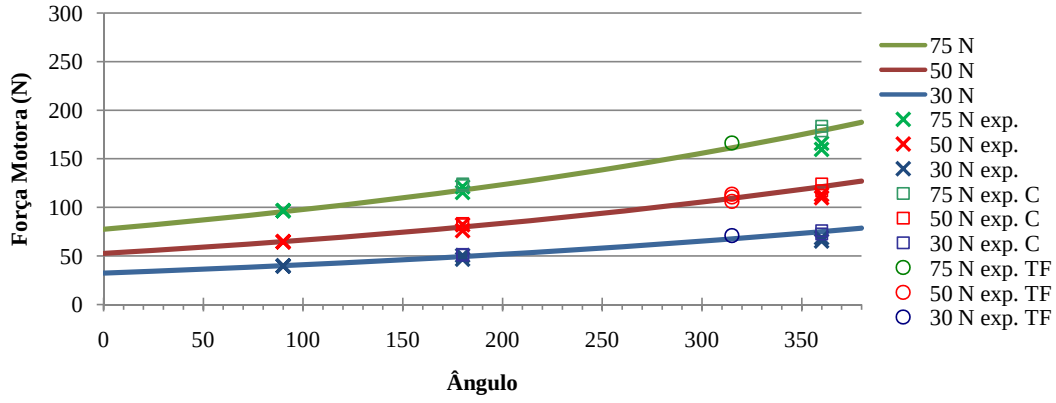


Figura I.7.: Força motora no movimento ascendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$) e representação dos valores experimentais obtidos.

Movimento Descendente (Dw)

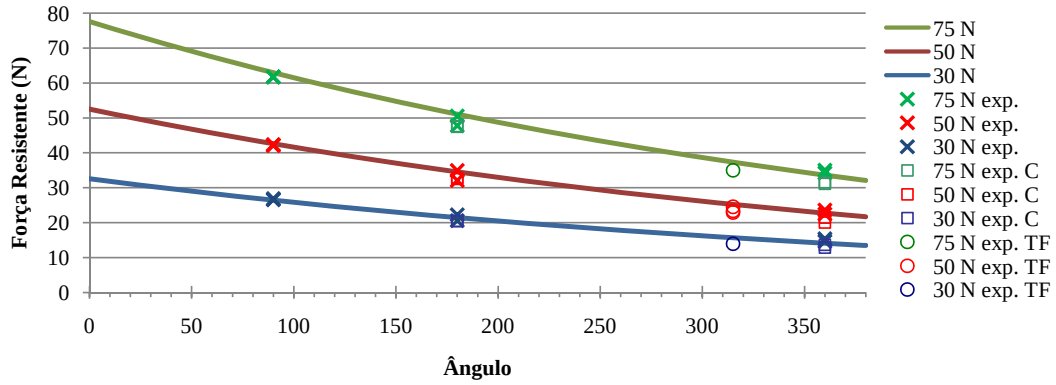


Figura I.8.: Força resistente no movimento descendente para o cabo EF ($\mu_{EF}^{CPLX} = 0,133$) e representação dos valores experimentais obtidos.

J. Comparação dos Cabos

J.1. Carga 30N

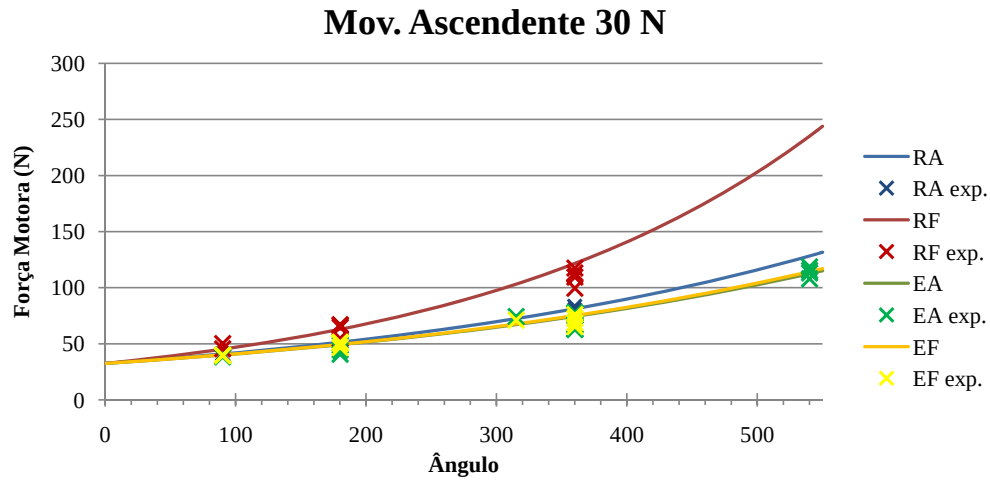


Figura J.1.: Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para ensaios solicitados a 30N.

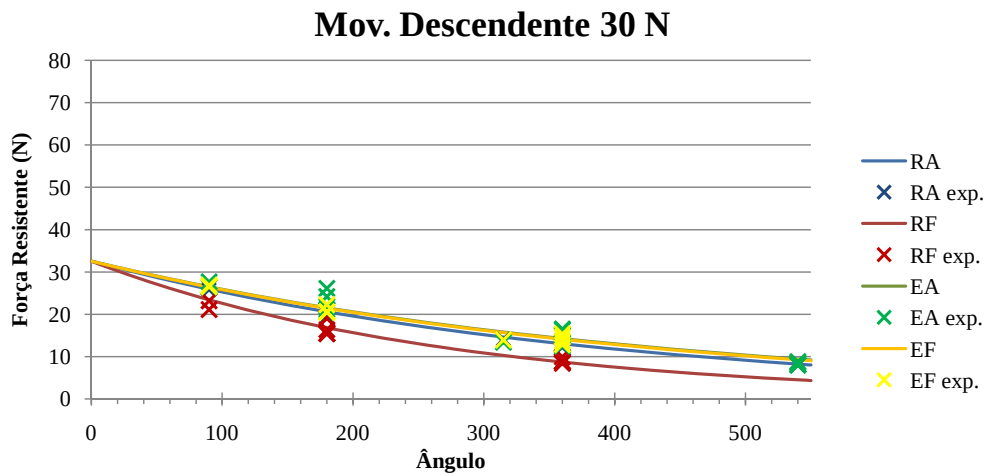


Figura J.2.: Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaios solicitados a 30N.

J.2. Carga 50N

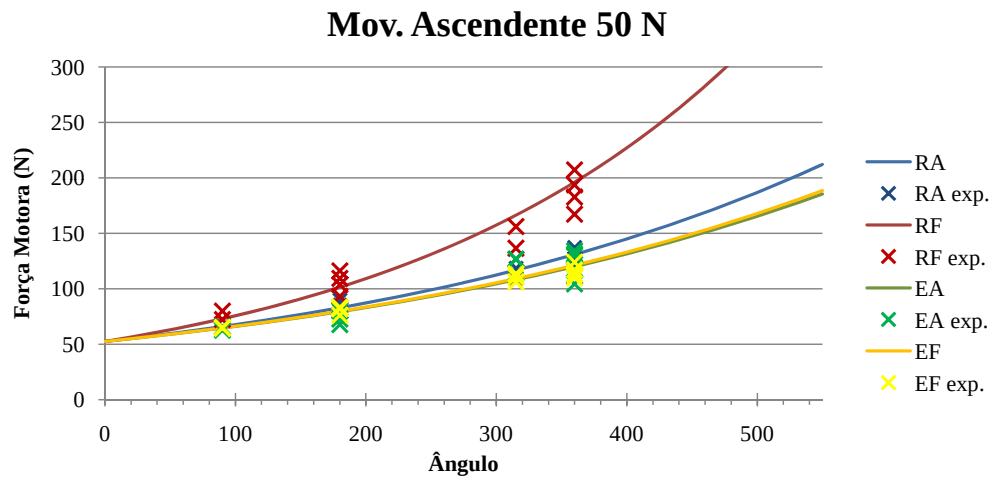


Figura J.3.: Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para ensaios solicitados a 50N.

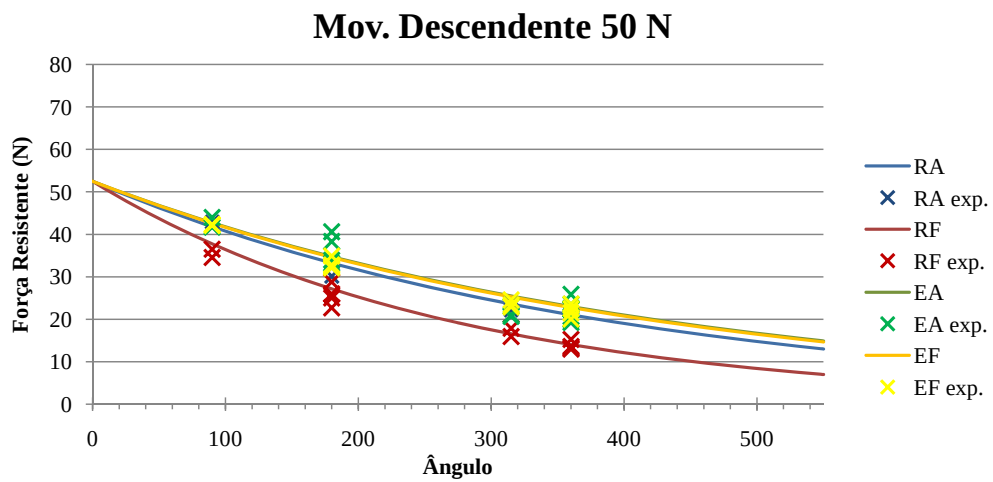


Figura J.4.: Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaios solicitados a 50N.

J.3. Carga 75N

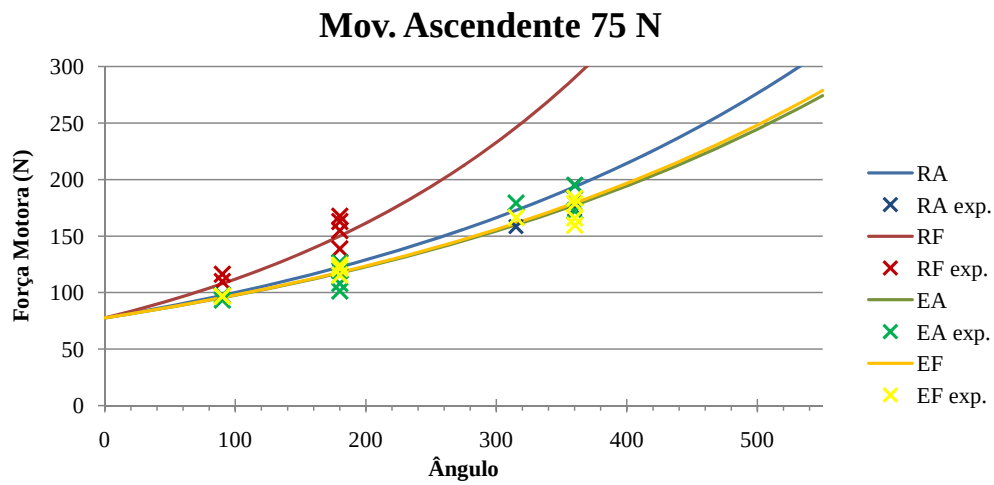


Figura J.5.: Comparação dos diferentes cabos no movimento ascendente para ensaios solicitados a 75N.

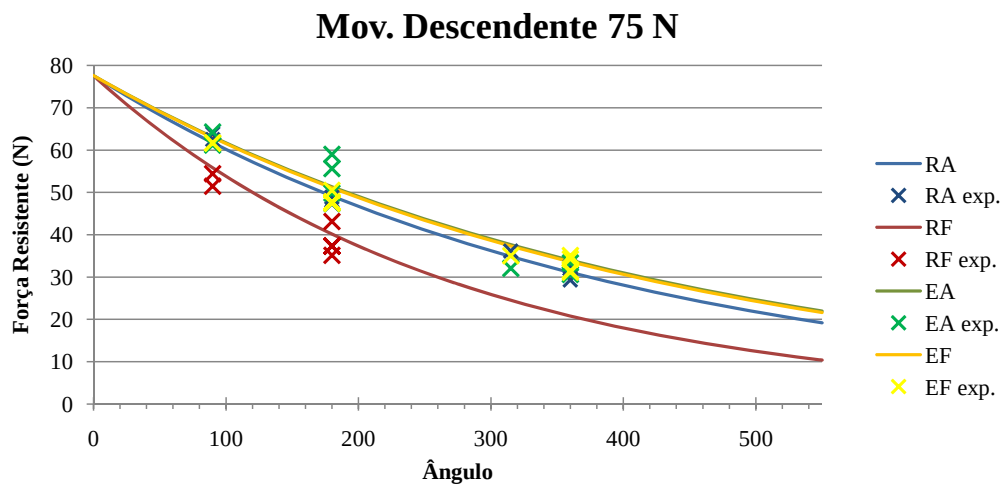


Figura J.6.: Comparação dos diferentes cabos no movimento descendente para ensaios solicitados a 75N.

K. Código *Matlab*

K.1. Optimiza o 1 Apoiado


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 28 Out. 2008 %%%
%%% (Optimização da função do coef. de atrito 0AP) %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = optimization0AP()
clear all; clc;

exl = actxserver('excel.application');
exlWkbk = exl.Workbooks;
exlFile = exlWkbk.Open('C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable\Fase 3\SimCable v3.7.xls');

exlSheet1 = exlFile.Sheets.Item('Resul. p cabo');
dat_range = 'D7:AG30';
rngObj = exlSheet1.Range(dat_range);
exlCellData = rngObj.Value;
exlData=cell2mat(exlCellData);

e=1;
for i=1:3
    FMup(:,i)=exlData(:,e);
    FRdw(:,i)=exlData(:,e+1);
    FRup(:,i)=exlData(:,e+2);
    FMdw(:,i)=exlData(:,e+3);
    miuUp(:,i)=exlData(:,e+6);
    miuDw(:,i)=exlData(:,e+7);
    velUp(:,i)=exlData(:,e+8);
    velDw(:,i)=exlData(:,e+9);
    e=e+10;
end

FMShapeUp=reshape(FMup',3*length(FMup),1);
FRShapeDw=reshape(FRdw',3*length(FRdw),1);
FRShapeUp=reshape(FRup',3*length(FRup),1);
FMShapeDw=reshape(FMdw',3*length(FMdw),1);
miuShapeUp=reshape(miuUp',3*length(miuUp),1);
miuShapeDw=reshape(miuDw',3*length(miuDw),1);
velShapeUp=reshape(velUp',3*length(velUp),1);
velShapeDw=reshape(velDw',3*length(velDw),1);

FMRA(:,1)=FMShapeUp(1:18,:);
FRRA(:,2)=FRShapeDw(1:18,:);
FRRA(:,1)=FRShapeUp(1:18,:);
FMRA(:,2)=FMShapeDw(1:18,:);
miuRA(:,1)=miuShapeUp(1:18,:);
miuRA(:,2)=miuShapeDw(1:18,:);
velRA(:,1)=velShapeUp(1:18,:);

```

```

velRA(:,2)=velShapeDw(1:18,:);

FMRF(:,1)=FMShapeUp(19:36,:);
FRRF(:,2)=FRShapeDw(19:36,:);
FRRF(:,1)=FRShapeUp(19:36,:);
FMRF(:,2)=FMShapeDw(19:36,:);
miuRF(:,1)=miuShapeUp(19:36,:);
miuRF(:,2)=miuShapeDw(19:36,:);
velRF(:,1)=velShapeUp(19:36,:);
velRF(:,2)=velShapeDw(19:36,:);
%Casos RF a eliminar:
FMRF(18,:)=[];FRRF(18,:)=[];
FMRF(15,:)=[];FRRF(15,:)=[];
FMRF(14,:)=[];FRRF(14,:)=[];
miuRF(18,:)=[];miuRF(15,:)=[];miuRF(14,:)=[];
velRF(18,:)=[];velRF(15,:)=[];velRF(14,:)=[];

FMEA(:,1)=FMShapeUp(37:54,:);
FREA(:,2)=FRShapeDw(37:54,:);
FREA(:,1)=FRShapeUp(37:54,:);
FMEA(:,2)=FMShapeDw(37:54,:);
miuEA(:,1)=miuShapeUp(37:54,:);
miuEA(:,2)=miuShapeDw(37:54,:);
velEA(:,1)=velShapeUp(37:54,:);
velEA(:,2)=velShapeDw(37:54,:);
%Casos EA a eliminar:
FMEA(18,:)=[];
FREA(18,:)=[];
miuEA(18,:)=[];
velEA(18,:)=[];

FMEF(:,1)=FMShapeUp(55:72,:);
FREF(:,2)=FRShapeDw(55:72,:);
FREF(:,1)=FRShapeUp(55:72,:);
FMEF(:,2)=FMShapeDw(55:72,:);
miuEF(:,1)=miuShapeUp(55:72,:);
miuEF(:,2)=miuShapeDw(55:72,:);
velEF(:,1)=velShapeUp(55:72,:);
velEF(:,2)=velShapeDw(55:72,:);

miumedSep(1,:)=mean(miuRA);
miumedSep(2,:)=mean(miuRF);
miumedSep(3,:)=mean(miuEA);
miumedSep(4,:)=mean(miuEF);

Betha(1:6,1:2)=pi/2; Betha(7:12,1:2)=pi; Betha(13:18,1:2)=2*pi;
BethaRA=Betha;

```

```

BethaRF=Betha;BethaRF(18,:)=[];BethaRF(15,:)=[];BethaRF(14,:)=[];
BethaEA=Betha;BethaEA(18,:)=[];
BethaEF=Betha;

for i=1:3:(length(FMRA)-2)
    Load(i,1)=32.558;
    Load(i+1,1)=52.501;
    Load(i+2,1)=77.579;
end

LoadRA=Load;
LoadRF=Load;LoadRF(18,:)=[];LoadRF(15,:)=[];LoadRF(14,:)=[];
LoadEA=Load;LoadEA(18,:)=[];
LoadEF=Load;

x0=0;
%Cabo RA
errorRA = @(x)[((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1))))./...
    (LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1))))*100 ((FRA(:,2)-(LoadRA(:)
    (:)./...
    exp(x(1).*BethaRA(:,1))))./(LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1))))*
    *100];

xRA = lsqnonlin(errorRA,x0)

erroRA(:,1) = ((FMRA(:,1)-(LoadRA(:,1).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1))))./
    /...
    (LoadRA(:,1).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1))))*100;

erroRA(:,2) = ((FRA(:,2)-(LoadRA(:,1)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1))))./
    /...
    (LoadRA(:,1)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1))))*100;

erroRAmax=max(erroRA)
erroRAmin=min(erroRA)

erroabsRA(:,:)=abs(erroRA(:,:));
erromedioRA=sum(sum(erroabsRA))/(2*length(erroabsRA))

%Cabo RF
errorRF = @(x)[((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1))))./...
    (LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1))))*100 ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)
    /...
    exp(x(1).*BethaRF(:,1))))./(LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(:,1))))*
    *100];

xRF = lsqnonlin(errorRF,x0)

```

```

erroRF(:,1) = ((FMRF(:,1)-(LoadRF(:,1).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)))))./...
    (LoadRF(:,1).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1))))*100;

erroRF(:,2) = ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:,1)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)))))./...
    (LoadRF(:,1)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1))))*100;

erroRFmax=max(erroRF)
erroRFmin=min(erroRF)

erroabsRF(:,:)=abs(erroRF(:,:));
erromedioRF=sum(sum(erroabsRF))/(2*length(erroabsRF))

%Cabo EA
errorEA = @(x)[((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)))))./...
    (LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1))))*100 ((FREA(:,2)-(LoadEA(:).*
    exp(x(1).*BethaEA(:,1))))./(LoadEA(:)./exp(x(1).*BethaEA(:,1))))\
*100];

xEA = lsqnonlin(errorEA,x0)

erroEA(:,1) = ((FMEA(:,1)-(LoadEA(:,1).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)))))./...
    (LoadEA(:,1).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1))))*100;

erroEA(:,2) = ((FREA(:,2)-(LoadEA(:,1)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)))))./...
    (LoadEA(:,1)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1))))*100;

erroEAmx=max(erroEA)
erroEAmin=min(erroEA)

erroabsEA(:,:)=abs(erroEA(:,:));
erromedioEA=sum(sum(erroabsEA))/(2*length(erroabsEA))

%Cabo EF
errorEF = @(x)[((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)))))./...
    (LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1))))*100 ((FREF(:,2)-(LoadEF(:).*
    exp(x(1).*BethaEF(:,1))))./(LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(:,1))))\
*100];

xEF = lsqnonlin(errorEF,x0)

```

```
erroEF(:,1) = ((FMEF(:,1)-(LoadEF(:,1).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1))))).\n...\n(LoadEF(:,1).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1))))*100;\n\nerroEF(:,2) = ((FREF(:,2)-(LoadEF(:,1)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1))))).\n...\n(LoadEF(:,1)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1))))*100;\n\nerroEFmax=max(erroEF)\nerroEFmin=min(erroEF)\n\nerroabsEF(:,:)=abs(erroEF(:,:));\nerromedioEF=sum(sum(erroabsEF))/(2*length(erroabsEF))
```

K.2. Optimização 2 Apoiado

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 28 Out. 2008 %%%
%%% (Optimização da função do coef. de atrito 1AP) %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = optimization1AP()
clear all; clc;

exl = actxserver('excel.application');
exlwkbk = exl.Workbooks;
exlFile = exlwkbk.Open('C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable\Fase 3\SimCable v3.7.xls');

exlSheet1 = exlFile.Sheets.Item('Resul. p cabo');
dat_range = 'D7:AG30';
rngObj = exlSheet1.Range(dat_range);
exlCellData = rngObj.Value;
exlData=cell2mat(exlCellData);

radim=250; %Constante para adimensionalização do raio
fadim=50; %Constante para adimensionalização da força

e=1;
for i=1:3
    FMup(:,i)=exlData(:,e);
    FRdw(:,i)=exlData(:,e+1);
    FRup(:,i)=exlData(:,e+2);
    FMdw(:,i)=exlData(:,e+3);
    miuUp(:,i)=exlData(:,e+6);
    miuDw(:,i)=exlData(:,e+7);
    velUp(:,i)=exlData(:,e+8);
    velDw(:,i)=exlData(:,e+9);
    e=e+10;
end

FMShapeUp=reshape(FMup',3*length(FMup),1);
FRShapeDw=reshape(FRdw',3*length(FRdw),1);
FRShapeUp=reshape(FRup',3*length(FRup),1);
FMShapeDw=reshape(FMdw',3*length(FMdw),1);
miuShapeUp=reshape(miuUp',3*length(miuUp),1);
miuShapeDw=reshape(miuDw',3*length(miuDw),1);
velShapeUp=reshape(velUp',3*length(velUp),1);
velShapeDw=reshape(velDw',3*length(velDw),1);

FMRA(:,1)=FMShapeUp(1:18,:);
FRR(:,2)=FRShapeDw(1:18,:);
FRR(:,1)=FRShapeUp(1:18,:);
FMRA(:,2)=FMShapeDw(1:18,:);

```

```
miuRA(:,1)=miuShapeUp(1:18,:);
miuRA(:,2)=miuShapeDw(1:18,:);
velRA(:,1)=velShapeUp(1:18,:);
velRA(:,2)=velShapeDw(1:18,:);

FRA=FRRA/fadim;

FMRF(:,1)=FMShapeUp(19:36,:);
FRRF(:,2)=FRShapeDw(19:36,:);
FRRF(:,1)=FRShapeUp(19:36,:);
FMRF(:,2)=FMShapeDw(19:36,:);
miuRF(:,1)=miuShapeUp(19:36,:);
miuRF(:,2)=miuShapeDw(19:36,:);
velRF(:,1)=velShapeUp(19:36,:);
velRF(:,2)=velShapeDw(19:36,:);
%Casos RF a eliminar:
FMRF(18,:)=[];FRRF(18,:)=[];
FMRF(15,:)=[];FRRF(15,:)=[];
FMRF(14,:)=[];FRRF(14,:)=[];
miuRF(18,:)=[];miuRF(15,:)=[];miuRF(14,:)=[];
velRF(18,:)=[];velRF(15,:)=[];velRF(14,:)=[];

FRF=FRRF/fadim;

FMEA(:,1)=FMShapeUp(37:54,:);
FREA(:,2)=FRShapeDw(37:54,:);
FREA(:,1)=FRShapeUp(37:54,:);
FMEA(:,2)=FMShapeDw(37:54,:);
miuEA(:,1)=miuShapeUp(37:54,:);
miuEA(:,2)=miuShapeDw(37:54,:);
velEA(:,1)=velShapeUp(37:54,:);
velEA(:,2)=velShapeDw(37:54,:);
%Casos EA a eliminar:
FMEA(18,:)=[];
FREA(18,:)=[];
miuEA(18,:)=[];
velEA(18,:)=[];

FEA=FREA/fadim;

FMEF(:,1)=FMShapeUp(55:72,:);
FREF(:,2)=FRShapeDw(55:72,:);
FREF(:,1)=FRShapeUp(55:72,:);
FMEF(:,2)=FMShapeDw(55:72,:);
miuEF(:,1)=miuShapeUp(55:72,:);
miuEF(:,2)=miuShapeDw(55:72,:);
velEF(:,1)=velShapeUp(55:72,:);
```

```

velEF(:,2)=velShapeDw(55:72,:);

FEF=FREF/fadim;

Betha(1:6,1:2)=pi/2; Betha(7:12,1:2)=pi; Betha(13:18,1:2)=2*pi;
BethaRA=Betha;
BethaRF=Betha;BethaRF(18,:)=[];BethaRF(15,:)=[];BethaRF(14,:)=[];
BethaEA=Betha;BethaEA(18,:)=[];
BethaEF=Betha;

for i=1:3:(length(FMRA)-2)
    Load(i,1)=32.558;
    Load(i+1,1)=52.501;
    Load(i+2,1)=77.579;
end

LoadRA=Load;
LoadRF=Load;LoadRF(18,:)=[];LoadRF(15,:)=[];LoadRF(14,:)=[];
LoadEA=Load;LoadEA(18,:)=[];
LoadEF=Load;

for i=1:6:(length(FMRA)-5)
    RadiusRA(i,1:2)=200;
    RadiusRA(i+1,1:2)=200;
    RadiusRA(i+2,1:2)=200;
end

for i=4:6:(length(FMRA)-2)
    RadiusRA(i,1:2)=300;
    RadiusRA(i+1,1:2)=300;
    RadiusRA(i+2,1:2)=300;
end

RRA=RadiusRA/radim;
RRF=RRA;RRF(18,:)=[];RRF(15,:)=[];RRF(14,:)=[];
REA=RRA;REA(18,:)=[];
REF=RRA;

x0=[0; 0; 0; 0];
% Cabo RA
errorRA = @(x)[(FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*
*...
RRA(:,1)+x(3).*RRA(:,1).*BethaRA(:,1)+x(4).*FRA(:,1))))./(LoadRA*
(:)...
.*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*RRA(:,1)+x(3).*RRA(:,1).*BethaRA(:,1)+
1)...
+x(4).*FRA(:,1))))*100 ((FRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA

```

```

(:,1)...
    +x(2).*RRA(:,1)+x(3).*RRA(:,1).*BethaRA(:,1)+x(4).*FRA(:,1)))./...
/...
    (LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*RRA(:,1)+x(3).*RRA(:,1).
*...
    BethaRA(:,1)+x(4).*FRA(:,1))).*100];

xRA = lsqnonlin(errorRA,x0)

erroRA(:,1) = ((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(
(2)...
    .*RRA(:,1)+xRA(3).*RRA(:,1).*BethaRA(:,1)+xRA(4).*FRA(:,1)))./...
    (LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*RRA(:,1)+xRA(3).*...
    RRA(:,1).*BethaRA(:,1)+xRA(4).*FRA(:,1))).*100);

erroRA(:,2) = ((FRRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(
(2)...
    .*RRA(:,1)+xRA(3).*RRA(:,1).*BethaRA(:,1)+xRA(4).*FRA(:,1)))./...
    (LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*RRA(:,1)+xRA(3).*...
    RRA(:,1).*BethaRA(:,1)+xRA(4).*FRA(:,1))).*100);

erroRAmax=max(erroRA)
erroRAmin=min(erroRA)

%Cabo RF
errorRF = @(x)[((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).
*...
    RRF(:,1)+x(3).*RRF(:,1).*BethaRF(:,1)+x(4).*FRF(:,1)))./(LoadRF(
(:)...
    .*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*RRF(:,1)+x(3).*RRF(:,1).*BethaRF(:,
1)...
    +x(4).*FRF(:,1))).*100 ((FRRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(
(:,1)...
    +x(2).*RRF(:,1)+x(3).*RRF(:,1).*BethaRF(:,1)+x(4).*FRF(:,1)))./...
/...
    (LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*RRF(:,1)+x(3).*RRF(:,1).
*...
    BethaRF(:,1)+x(4).*FRF(:,1))).*100];

xRF = lsqnonlin(errorRF,x0)

erroRF(:,1) = ((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(
(2)...
    .*RRF(:,1)+xRF(3).*RRF(:,1).*BethaRF(:,1)+xRF(4).*FRF(:,1)))./...
    (LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*RRF(:,1)+xRF(3).*...
    RRF(:,1).*BethaRF(:,1)+xRF(4).*FRF(:,1))).*100);

```

```
erroRF(:,2) = ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:).exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).
(2)...
.*RRF(:,1)+xRF(3).*RRF(:,1).*BethaRF(:,1)+xRF(4).*FRF(:,1))))./...
(LoadRF(:).exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*RRF(:,1)+xRF(3).*...
RRF(:,1).*BethaRF(:,1)+xRF(4).*FRF(:,1))))*100;
```

```
erroRFmax=max(erroRF)
erroRFmin=min(erroRF)
```

```
%Cabo EA
```

```
errorEA = @(x)[((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).
*...
REA(:,1)+x(3).*REA(:,1).*BethaEA(:,1)+x(4).*FEA(:,1))))./((LoadEA(
(:)...
.*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*REA(:,1)+x(3).*REA(:,1).*BethaEA(:,
1)...
+x(4).*FEA(:,1))))*100 ((FREA(:,2)-(LoadEA(:).exp(x(1).*BethaEA(
(:,1)...
+x(2).*REA(:,1)+x(3).*REA(:,1).*BethaEA(:,1)+x(4).*FEA(:,1)))).*
/...
(LoadEA(:).exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*REA(:,1)+x(3).*REA(:,1).
*...
BethaEA(:,1)+x(4).*FEA(:,1))))*100];
```

```
xEA = lsqnonlin(errorEA,x0)
```

```
erroEA(:,1) = ((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(
(2)...
.*REA(:,1)+xEA(3).*REA(:,1).*BethaEA(:,1)+xEA(4).*FEA(:,1))))./...
(LoadEA(:).exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*REA(:,1)+xEA(3).*...
REA(:,1).*BethaEA(:,1)+xEA(4).*FEA(:,1))))*100;
```

```
erroEA(:,2) = ((FREA(:,2)-(LoadEA(:).exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(
(2)...
.*REA(:,1)+xEA(3).*REA(:,1).*BethaEA(:,1)+xEA(4).*FEA(:,1))))./...
(LoadEA(:).exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*REA(:,1)+xEA(3).*...
REA(:,1).*BethaEA(:,1)+xEA(4).*FEA(:,1))))*100;
```

```
erroEAmx=max(erroEA)
erroEAmn=min(erroEA)
```

```
%Cabo EF
```

```
errorEF = @(x)[((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).
*...
REF(:,1)+x(3).*REF(:,1).*BethaEF(:,1)+x(4).*FEF(:,1))))./((LoadEF(
(:)...
.*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*REF(:,1)+x(3).*REF(:,1).*BethaEF(:,
```

```

1)...
+x(4).*FEF(:,1)))*100 ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(
(:,1)...
+x(2).*REF(:,1)+x(3).*REF(:,1).*BethaEF(:,1)+x(4).*FEF(:,1)))).\
/...
(LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*REF(:,1)+x(3).*REF(:,1).\
*...
BethaEF(:,1)+x(4).*FEF(:,1)))).*100];

xEF = lsqnonlin(errorEF,x0)

erroEF(:,1) = ((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(
(2)...
.*REF(:,1)+xEF(3).*REF(:,1).*BethaEF(:,1)+xEF(4).*FEF(:,1))))./...
(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*REF(:,1)+xEF(3).*...
REF(:,1).*BethaEF(:,1)+xEF(4).*FEF(:,1)))).*100;

erroEF(:,2) = ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(
(2)...
.*REF(:,1)+xEF(3).*REF(:,1).*BethaEF(:,1)+xEF(4).*FEF(:,1))))./...
(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*REF(:,1)+xEF(3).*...
REF(:,1).*BethaEF(:,1)+xEF(4).*FEF(:,1)))).*100;

erroEFmax=max(erroEF)
erroEFmin=min(erroEF)

```

K.3. Optimiza o 3 Apoiado


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 28 Out. 2008 %%%
%%% (Optimização da função do coef. de atrito 2AP) %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = optimization2AP()
clear all; clc;

exl = actxserver('excel.application');
exlwkbk = exl.Workbooks;
exlFile = exlwkbk.Open('C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable\Fase 3\SimCable v3.7.xls');

exlSheet1 = exlFile.Sheets.Item('Resul. p cabo');
dat_range = 'D7:AG30';
rngObj = exlSheet1.Range(dat_range);
exlCellData = rngObj.Value;
exlData=cell2mat(exlCellData);

radim=250; %Constante para adimensionalização do raio
fadim=50; %Constante para adimensionalização da força

e=1;
for i=1:3
    FMup(:,i)=exlData(:,e);
    FRdw(:,i)=exlData(:,e+1);
    FRup(:,i)=exlData(:,e+2);
    FMdw(:,i)=exlData(:,e+3);
    miuUp(:,i)=exlData(:,e+6);
    miuDw(:,i)=exlData(:,e+7);
    velUp(:,i)=exlData(:,e+8);
    velDw(:,i)=exlData(:,e+9);
    e=e+10;
end

FMShapeUp=reshape(FMup',3*length(FMup),1);
FRShapeDw=reshape(FRdw',3*length(FRdw),1);
FRShapeUp=reshape(FRup',3*length(FRup),1);
FMShapeDw=reshape(FMdw',3*length(FMdw),1);
miuShapeUp=reshape(miuUp',3*length(miuUp),1);
miuShapeDw=reshape(miuDw',3*length(miuDw),1);
velShapeUp=reshape(velUp',3*length(velUp),1);
velShapeDw=reshape(velDw',3*length(velDw),1);

FMRA(:,1)=FMShapeUp(1:18,:);
FRRA(:,2)=FRShapeDw(1:18,:);
FRRA(:,1)=FRShapeUp(1:18,:);
FMRA(:,2)=FMShapeDw(1:18,:);

```

```

miuRA(:,1)=miuShapeUp(1:18,:);
miuRA(:,2)=miuShapeDw(1:18,:);
velRA(:,1)=velShapeUp(1:18,:);
velRA(:,2)=velShapeDw(1:18,:);

FRA=FRRA/fadim;

FMRF(:,1)=FMShapeUp(19:36,:);
FRRF(:,2)=FRShapeDw(19:36,:);
FRRF(:,1)=FRShapeUp(19:36,:);
FMRF(:,2)=FMShapeDw(19:36,:);
miuRF(:,1)=miuShapeUp(19:36,:);
miuRF(:,2)=miuShapeDw(19:36,:);
velRF(:,1)=velShapeUp(19:36,:);
velRF(:,2)=velShapeDw(19:36,:);
%Casos RF a eliminar:
FMRF(18,:)=[];FRRF(18,:)=[];
FMRF(15,:)=[];FRRF(15,:)=[];
FMRF(14,:)=[];FRRF(14,:)=[];
miuRF(18,:)=[];miuRF(15,:)=[];miuRF(14,:)=[];
velRF(18,:)=[];velRF(15,:)=[];velRF(14,:)=[];

FRF=FRRF/fadim;

FMEA(:,1)=FMShapeUp(37:54,:);
FREA(:,2)=FRShapeDw(37:54,:);
FREA(:,1)=FRShapeUp(37:54,:);
FMEA(:,2)=FMShapeDw(37:54,:);
miuEA(:,1)=miuShapeUp(37:54,:);
miuEA(:,2)=miuShapeDw(37:54,:);
veLEA(:,1)=velShapeUp(37:54,:);
veLEA(:,2)=velShapeDw(37:54,:);
%Casos EA a eliminar:
FMEA(18,:)=[];
FREA(18,:)=[];
miuEA(18,:)=[];
veLEA(18,:)=[];

FEA=FREA/fadim;

FMEF(:,1)=FMShapeUp(55:72,:);
FREF(:,2)=FRShapeDw(55:72,:);
FREF(:,1)=FRShapeUp(55:72,:);
FMEF(:,2)=FMShapeDw(55:72,:);
miuEF(:,1)=miuShapeUp(55:72,:);
miuEF(:,2)=miuShapeDw(55:72,:);
veLEF(:,1)=velShapeUp(55:72,:);

```

```

velEF(:,2)=velShapeDw(55:72,:);

FEF=FREF/fadim;

Betha(1:6,1:2)=pi/2; Betha(7:12,1:2)=pi; Betha(13:18,1:2)=2*pi;
BethaRA=Betha;
BethaRF=Betha;BethaRF(18,:)=[];BethaRF(15,:)=[];BethaRF(14,:)=[];
BethaEA=Betha;BethaEA(18,:)=[];
BethaEF=Betha;

for i=1:3:(length(FMRA)-2)
    Load(i,1)=32.558;
    Load(i+1,1)=52.501;
    Load(i+2,1)=77.579;
end

LoadRA=Load;
LoadRF=Load;LoadRF(18,:)=[];LoadRF(15,:)=[];LoadRF(14,:)=[];
LoadEA=Load;LoadEA(18,:)=[];
LoadEF=Load;

for i=1:6:(length(FMRA)-5)
    RadiusRA(i,1:2)=200;
    RadiusRA(i+1,1:2)=200;
    RadiusRA(i+2,1:2)=200;
end

for i=4:6:(length(FMRA)-2)
    RadiusRA(i,1:2)=300;
    RadiusRA(i+1,1:2)=300;
    RadiusRA(i+2,1:2)=300;
end

RRA=RadiusRA/radim;
RRF=RRA;RRF(18,:)=[];RRF(15,:)=[];RRF(14,:)=[];
REA=RRA;REA(18,:)=[];
REF=RRA;

x0=[0; 0; 0];
%Cabo RA
errorRA = @(x)[((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*
*...
    RRA(:,1)+x(3).*FRA(:,1))))./(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).
(2).*...
    RRA(:,1)+x(3).*FRA(:,1))))*100 ((FRR(:,2)-(LoadRA(:)./exp(x(1).
*...
    BethaRA(:,1)+x(2).*RRA(:,1)+x(3).*FRA(:,1))))./(LoadRA(:)./...

```

```

exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*RRA(:,1)+x(3).*FRA(:,1)))*100];

xRA = lsqnonlin(errorRA,x0)

erroRA(:,1) = ((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).
*...
RRA(:,1)+xRA(3).*FRA(:,1))))./(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)
+...
xRA(2).*RRA(:,1)+xRA(3).*FRA(:,1)))*100;

erroRA(:,2) = ((FRRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).
*...
RRA(:,1)+xRA(3).*FRA(:,1))))./(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)
+...
xRA(2).*RRA(:,1)+xRA(3).*FRA(:,1)))*100;

erroRAmax=max(erroRA)
erroRAmin=min(erroRA)

%Cabo RF
errorRF = @(x)[((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).
*...
RRF(:,1)+x(3).*FRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x
(2).
*...
RRF(:,1)+x(3).*FRF(:,1)))*100 ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(x(1).
*...
BethaRF(:,1)+x(2).*RRF(:,1)+x(3).*FRF(:,1))))./(LoadRF(:)./.
exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*RRF(:,1)+x(3).*FRF(:,1)))*100];

xRF = lsqnonlin(errorRF,x0)

erroRF(:,1) = ((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).
*...
RRF(:,1)+xRF(3).*FRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)
+...
xRF(2).*RRF(:,1)+xRF(3).*FRF(:,1)))*100;

erroRF(:,2) = ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).
*...
RRF(:,1)+xRF(3).*FRF(:,1))))./(LoadRF(:)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)
+...
xRF(2).*RRF(:,1)+xRF(3).*FRF(:,1)))*100;

erroRFmax=max(erroRF)
erroRFmin=min(erroRF)

%Cabo EA

```

```

errorEA = @(x)[((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).
*...
    REA(:,1)+x(3).*FEA(:,1))))./(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x
(2).*...
    REA(:,1)+x(3).*FEA(:,1))))*100 ((FREA(:,2)-(LoadEA(:)./exp(x(1).
*...
    BethaEA(:,1)+x(2).*REA(:,1)+x(3).*FEA(:,1))))./(LoadEA(:)./...
    exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*REA(:,1)+x(3).*FEA(:,1))))*100];

```

```

xEA = lsqnonlin(errorEA,x0)

```

```

erroEA(:,1) = ((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).
*...
    REA(:,1)+xEA(3).*FEA(:,1))))./(LoadEA(:).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)
+...
    xEA(2).*REA(:,1)+xEA(3).*FEA(:,1))))*100;

```

```

erroEA(:,2) = ((FREA(:,2)-(LoadEA(:)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).
*...
    REA(:,1)+xEA(3).*FEA(:,1))))./(LoadEA(:)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)
+...
    xEA(2).*REA(:,1)+xEA(3).*FEA(:,1))))*100;

```

```

erroEAmx=max(erroEA)

```

```

erroEAmin=min(erroEA)

```

```

%Cabo EF

```

```

errorEF = @(x)[((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).
*...
    REF(:,1)+x(3).*FEF(:,1))))./(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x
(2).*...
    REF(:,1)+x(3).*FEF(:,1))))*100 ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(x(1).
*...
    BethaEF(:,1)+x(2).*REF(:,1)+x(3).*FEF(:,1))))./(LoadEF(:)./...
    exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*REF(:,1)+x(3).*FEF(:,1))))*100];

```

```

xEF = lsqnonlin(errorEF,x0)

```

```

erroEF(:,1) = ((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).
*...
    REF(:,1)+xEF(3).*FEF(:,1))))./(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)
+...
    xEF(2).*REF(:,1)+xEF(3).*FEF(:,1))))*100;

```

```

erroEF(:,2) = ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).
*...
    REF(:,1)+xEF(3).*FEF(:,1))))./(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)

```

```
+...  
    xEF(2).*REF(:,1)+xEF(3).*FEF(:,1))) *100;  
  
erroEFmax=max(erroEF)  
erroEFmin=min(erroEF)
```

K.4. Optimiza o 4 Apoiado


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 28 Out. 2008 %%%
%%% (Optimização da função do coef. de atrito 3AP) %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = optimization3AP()
clear all; clc;

exl = actxserver('excel.application');
exlwkbk = exl.Workbooks;
exlFile = exlwkbk.Open('C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable\Fase 3\SimCable v3.7.xls');

exlSheet1 = exlFile.Sheets.Item('Resul. p cabo');
dat_range = 'D7:AG30';
rngObj = exlSheet1.Range(dat_range);
exlCellData = rngObj.Value;
exlData=cell2mat(exlCellData);

radim=250; %Constante para adimensionalização do raio
fadim=50; %Constante para adimensionalização da força

e=1;
for i=1:3
    FMup(:,i)=exlData(:,e);
    FRdw(:,i)=exlData(:,e+1);
    FRup(:,i)=exlData(:,e+2);
    FMdw(:,i)=exlData(:,e+3);
    miuUp(:,i)=exlData(:,e+6);
    miuDw(:,i)=exlData(:,e+7);
    velUp(:,i)=exlData(:,e+8);
    velDw(:,i)=exlData(:,e+9);
    e=e+10;
end

FMShapeUp=reshape(FMup',3*length(FMup),1);
FRShapeDw=reshape(FRdw',3*length(FRdw),1);
FRShapeUp=reshape(FRup',3*length(FRup),1);
FMShapeDw=reshape(FMdw',3*length(FMdw),1);
miuShapeUp=reshape(miuUp',3*length(miuUp),1);
miuShapeDw=reshape(miuDw',3*length(miuDw),1);
velShapeUp=reshape(velUp',3*length(velUp),1);
velShapeDw=reshape(velDw',3*length(velDw),1);

FMRA(:,1)=FMShapeUp(1:18,:);
FRR(:,2)=FRShapeDw(1:18,:);
FRR(:,1)=FRShapeUp(1:18,:);
FMRA(:,2)=FMShapeDw(1:18,:);

```

```

miuRA(:,1)=miuShapeUp(1:18,:);
miuRA(:,2)=miuShapeDw(1:18,:);
velRA(:,1)=velShapeUp(1:18,:);
velRA(:,2)=velShapeDw(1:18,:);

FRA=FRRA/fadim;

FMRF(:,1)=FMShapeUp(19:36,:);
FRRF(:,2)=FRShapeDw(19:36,:);
FRRF(:,1)=FRShapeUp(19:36,:);
FMRF(:,2)=FMShapeDw(19:36,:);
miuRF(:,1)=miuShapeUp(19:36,:);
miuRF(:,2)=miuShapeDw(19:36,:);
velRF(:,1)=velShapeUp(19:36,:);
velRF(:,2)=velShapeDw(19:36,:);
%Casos RF a eliminar:
FMRF(18,:)=[];FRRF(18,:)=[];
FMRF(15,:)=[];FRRF(15,:)=[];
FMRF(14,:)=[];FRRF(14,:)=[];
miuRF(18,:)=[];miuRF(15,:)=[];miuRF(14,:)=[];
velRF(18,:)=[];velRF(15,:)=[];velRF(14,:)=[];

FRF=FRRF/fadim;

FMEA(:,1)=FMShapeUp(37:54,:);
FREA(:,2)=FRShapeDw(37:54,:);
FREA(:,1)=FRShapeUp(37:54,:);
FMEA(:,2)=FMShapeDw(37:54,:);
miuEA(:,1)=miuShapeUp(37:54,:);
miuEA(:,2)=miuShapeDw(37:54,:);
velEA(:,1)=velShapeUp(37:54,:);
velEA(:,2)=velShapeDw(37:54,:);
%Casos EA a eliminar:
FMEA(18,:)=[];
FREA(18,:)=[];
miuEA(18,:)=[];
velEA(18,:)=[];

FEA=FREA/fadim;

FMEF(:,1)=FMShapeUp(55:72,:);
FREF(:,2)=FRShapeDw(55:72,:);
FREF(:,1)=FRShapeUp(55:72,:);
FMEF(:,2)=FMShapeDw(55:72,:);
miuEF(:,1)=miuShapeUp(55:72,:);
miuEF(:,2)=miuShapeDw(55:72,:);
velEF(:,1)=velShapeUp(55:72,:);

```

```

velEF(:,2)=velShapeDw(55:72,:);

FEF=FREF/fadim;

Betha(1:6,1:2)=pi/2; Betha(7:12,1:2)=pi; Betha(13:18,1:2)=2*pi;
BethaRA=Betha;
BethaRF=Betha;BethaRF(18,:)=[];BethaRF(15,:)=[];BethaRF(14,:)=[];
BethaEA=Betha;BethaEA(18,:)=[];
BethaEF=Betha;

for i=1:3:(length(FMRA)-2)
    Load(i,1)=32.558;
    Load(i+1,1)=52.501;
    Load(i+2,1)=77.579;
end

LoadRA=Load;
LoadRF=Load;LoadRF(18,:)=[];LoadRF(15,:)=[];LoadRF(14,:)=[];
LoadEA=Load;LoadEA(18,:)=[];
LoadEF=Load;

for i=1:6:(length(FMRA)-5)
    RadiusRA(i,1:2)=200;
    RadiusRA(i+1,1:2)=200;
    RadiusRA(i+2,1:2)=200;
end

for i=4:6:(length(FMRA)-2)
    RadiusRA(i,1:2)=300;
    RadiusRA(i+1,1:2)=300;
    RadiusRA(i+2,1:2)=300;
end

RRA=RadiusRA/radim;
RRF=RRA;RRF(18,:)=[];RRF(15,:)=[];RRF(14,:)=[];
REA=RRA;REA(18,:)=[];
REF=RRA;

x0=[0; 0];
% Cabo RA
errorRA = @(x)[((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*
*...
RRA(:,1))))./(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*RRA(:,1))))*
*...
100 ((FRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*RRA(:,
1))))...
./(LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*RRA(:,1))))*100];

```

```

xRA = lsqnonlin(errorRA,x0)

erroRA(:,1) = ((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(xRA(1)*BethaRA(:,1)+xRA(2).
* ...
RRA(:,1))))./(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*RRA(:,
1))))*100;

erroRA(:,2) = ((FRRa(:,2)-(LoadRA(:)./exp(xRA(1)*BethaRA(:,1)+xRA(2).
* ...
RRA(:,1))))./(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*RRA(:,
1))))*100;

erroRAmax=max(erroRA)
erroRAmin=min(erroRA)

%Cabo RF
errorRF = @(x)[((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).
* ...
RRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*RRF(:,1))))
* ...
100 ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*RRF(:,
1))))...
./(LoadRF(:)./exp(x(1)*BethaRF(:,1)+x(2).*RRF(:,1))))*100];

xRF = lsqnonlin(errorRF,x0)

erroRF(:,1) = ((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(xRF(1)*BethaRF(:,1)+xRF(2).
* ...
RRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*RRF(:,
1))))*100;

erroRF(:,2) = ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(xRF(1)*BethaRF(:,1)+xRF(2).
* ...
RRF(:,1))))./(LoadRF(:)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*RRF(:,
1))))*100;

erroRFmax=max(erroRF)
erroRFmin=min(erroRF)

%Cabo EA
errorEA = @(x)[((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).
* ...
REA(:,1))))./(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*REA(:,1))))
* ...
100 ((FREa(:,2)-(LoadEA(:)./exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*REA(:,
1))))...

```

```

./(LoadEA(:)./exp(x(1)*BethaEA(:,1)+x(2).*REA(:,1))))*100];

xEA = lsqnonlin(errorEA,x0)

erroEA(:,1) = ((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(xEA(1)*BethaEA(:,1)+xEA(2).*
*...
REA(:,1))))./(LoadEA(:).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*REA(:,
1)))))*100;

erroEA(:,2) = ((FREA(:,2)-(LoadEA(:)./exp(xEA(1)*BethaEA(:,1)+xEA(2).*
*...
REA(:,1))))./(LoadEA(:)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*REA(:,
1)))))*100;

erroEAmx=max(erroEA)
erroEAmin=min(erroEA)

%Cabo EF
errorEF = @(x)[((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*
*...
REF(:,1))))./(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*REF(:,1))))*
*...
100 ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*REF(:,
1)))))...
./(LoadEF(:)./exp(x(1)*BethaEF(:,1)+x(2).*REF(:,1))))*100];

xEF = lsqnonlin(errorEF,x0)

erroEF(:,1) = ((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(xEF(1)*BethaEF(:,1)+xEF(2).*
*...
REF(:,1))))./(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*REF(:,
1)))))*100;

erroEF(:,2) = ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(xEF(1)*BethaEF(:,1)+xEF(2).*
*...
REF(:,1))))./(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*REF(:,
1)))))*100;

erroEFmax=max(erroEF)
erroEFmin=min(erroEF)

```

K.5. Optimização 5 Apoiado

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 28 Out. 2008 %%
%% (Optimização da função do coef. de atrito 4AP) %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = optimization4AP()
clear all; clc;

exl = actxserver('excel.application');
exlwkbk = exl.Workbooks;
exlFile = exlwkbk.Open('C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable\Fase 3\SimCable v3.7.xls');

exlSheet1 = exlFile.Sheets.Item('Resul. p cabo');
dat_range = 'D7:AG30';
rngObj = exlSheet1.Range(dat_range);
exlCellData = rngObj.Value;
exlData=cell2mat(exlCellData);

radim=50; %Constante para adimensionalização do raio
fadim=15; %Constante para adimensionalização da força

e=1;
for i=1:3
    FMup(:,i)=exlData(:,e);
    FRdw(:,i)=exlData(:,e+1);
    FRup(:,i)=exlData(:,e+2);
    FMdw(:,i)=exlData(:,e+3);
    miuUp(:,i)=exlData(:,e+6);
    miuDw(:,i)=exlData(:,e+7);
    velUp(:,i)=exlData(:,e+8);
    velDw(:,i)=exlData(:,e+9);
    e=e+10;
end

FMShapeUp=reshape(FMup',3*length(FMup),1);
FRShapeDw=reshape(FRdw',3*length(FRdw),1);
FRShapeUp=reshape(FRup',3*length(FRup),1);
FMShapeDw=reshape(FMdw',3*length(FMdw),1);
miuShapeUp=reshape(miuUp',3*length(miuUp),1);
miuShapeDw=reshape(miuDw',3*length(miuDw),1);
velShapeUp=reshape(velUp',3*length(velUp),1);
velShapeDw=reshape(velDw',3*length(velDw),1);

FMRA(:,1)=FMShapeUp(1:18,:);
FRRA(:,2)=FRShapeDw(1:18,:);
FRRA(:,1)=FRShapeUp(1:18,:);
FMRA(:,2)=FMShapeDw(1:18,:);

```

```
miuRA(:,1)=miuShapeUp(1:18,:);
miuRA(:,2)=miuShapeDw(1:18,:);
velRA(:,1)=velShapeUp(1:18,:);
velRA(:,2)=velShapeDw(1:18,:);

FRA=FRRA/fadim;

FMRF(:,1)=FMShapeUp(19:36,:);
FRRF(:,2)=FRShapeDw(19:36,:);
FRRF(:,1)=FRShapeUp(19:36,:);
FMRF(:,2)=FMShapeDw(19:36,:);
miuRF(:,1)=miuShapeUp(19:36,:);
miuRF(:,2)=miuShapeDw(19:36,:);
velRF(:,1)=velShapeUp(19:36,:);
velRF(:,2)=velShapeDw(19:36,:);
%Casos RF a eliminar:
FMRF(18,:)=[];FRRF(18,:)=[];
FMRF(15,:)=[];FRRF(15,:)=[];
FMRF(14,:)=[];FRRF(14,:)=[];
miuRF(18,:)=[];miuRF(15,:)=[];miuRF(14,:)=[];
velRF(18,:)=[];velRF(15,:)=[];velRF(14,:)=[];

FRF=FRRF/fadim;

FMEA(:,1)=FMShapeUp(37:54,:);
FREA(:,2)=FRShapeDw(37:54,:);
FREA(:,1)=FRShapeUp(37:54,:);
FMEA(:,2)=FMShapeDw(37:54,:);
miuEA(:,1)=miuShapeUp(37:54,:);
miuEA(:,2)=miuShapeDw(37:54,:);
velEA(:,1)=velShapeUp(37:54,:);
velEA(:,2)=velShapeDw(37:54,:);
%Casos EA a eliminar:
FMEA(18,:)=[];
FREA(18,:)=[];
miuEA(18,:)=[];
velEA(18,:)=[];

FEA=FREA/fadim;

FMEF(:,1)=FMShapeUp(55:72,:);
FREF(:,2)=FRShapeDw(55:72,:);
FREF(:,1)=FRShapeUp(55:72,:);
FMEF(:,2)=FMShapeDw(55:72,:);
miuEF(:,1)=miuShapeUp(55:72,:);
miuEF(:,2)=miuShapeDw(55:72,:);
velEF(:,1)=velShapeUp(55:72,:);
```

```

velEF(:,2)=velShapeDw(55:72,:);

FEF=FREF/fadim;

Betha(1:6,1:2)=pi/2; Betha(7:12,1:2)=pi; Betha(13:18,1:2)=2*pi;
BethaRA=Betha;
BethaRF=Betha;BethaRF(18,:)=[];BethaRF(15,:)=[];BethaRF(14,:)=[];
BethaEA=Betha;BethaEA(18,:)=[];
BethaEF=Betha;

for i=1:3:(length(FMRA)-2)
    Load(i,1)=32.558;
    Load(i+1,1)=52.501;
    Load(i+2,1)=77.579;
end

LoadRA=Load;
LoadRF=Load;LoadRF(18,:)=[];LoadRF(15,:)=[];LoadRF(14,:)=[];
LoadEA=Load;LoadEA(18,:)=[];
LoadEF=Load;

for i=1:6:(length(FMRA)-5)
    RadiusRA(i,1:2)=200;
    RadiusRA(i+1,1:2)=200;
    RadiusRA(i+2,1:2)=200;
end

for i=4:6:(length(FMRA)-2)
    RadiusRA(i,1:2)=300;
    RadiusRA(i+1,1:2)=300;
    RadiusRA(i+2,1:2)=300;
end

RRA=RadiusRA/radim;
RRF=RRA;RRF(18,:)=[];RRF(15,:)=[];RRF(14,:)=[];
REA=RRA;REA(18,:)=[];
REF=RRA;

x0=[0; 0; 0];
%Cabo RA
errorRA = @(x)[((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2))....
    +x(3)))./(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2))+x(3)))*100
    ((FRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2))+x(3)))./...
    (LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2))+x(3)))*100)];

xRA = lsqnonlin(errorRA,x0)

```

```
erroRA(:,1) = ((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2)))+...
+...
xRA(3)))./(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2))+xRA(3)))\
*100;
```

```
erroRA(:,2) = ((FRRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2)))+...
+...
xRA(3)))./(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2))+xRA(3)))\
*100;
```

```
erroRAmax=max(erroRA)
erroRAmin=min(erroRA)
```

%Cabo RF

```
errorRF = @(x)((((FMRF)-(FRRF .* exp(x(1)* BethaRF + x(2))+x(3)))./...
(FRRF .* exp(x(1)* BethaRF + x(2))+x(3)))*100);
```

```
xRF = lsqnonlin(errorRF,x0)
```

```
erroRF = (((FMRF)-(FRRF .* exp(xRF(1)* BethaRF + xRF(2))+xRF(3)))./...
(FRRF .* exp(xRF(1)* BethaRF + xRF(2))+xRF(3)))*100;
```

```
erroRFmax=max(erroRF)
erroRFmin=min(erroRF)
```

%Cabo EA

```
errorEA = @(x)((((FMEA)-(FREA .* exp(x(1)* BethaEA + x(2))+x(3)))./...
(FREA .* exp(x(1)* BethaEA + x(2))+x(3)))*100);
```

```
xEA = lsqnonlin(errorEA,x0)
```

```
erroEA = (((FMEA)-(FREA .* exp(xEA(1)* BethaEA + xEA(2))+xEA(3)))./...
(FREA .* exp(xEA(1)* BethaEA + xEA(2))+xEA(3)))*100;
```

```
erroEAmx=max(erroEA)
erroEAmn=min(erroEA)
```

%Cabo EF

```
errorEF = @(x)((((FMEF)-(FREF .* exp(x(1)* BethaEF + x(2))+x(3)))./...
(FREF .* exp(x(1)* BethaEF + x(2))+x(3)))*100);
```

```
xEF = lsqnonlin(errorEF,x0)
```

```
erroEF = (((FMEF)-(FREF .* exp(xEF(1)* BethaEF + xEF(2))+xEF(3)))./...
(FREF .* exp(xEF(1)* BethaEF + xEF(2))+xEF(3)))*100;
```

```
erroEFmax=max(erroEF)
```

erroEFmin=min(erroEF)

K.6. Optimização 6 Apoiado

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 28 Out. 2008 %%
%% (Optimização da função do coef. de atrito 5AP) %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = optimization5AP()
clear all; clc;

exl = actxserver('excel.application');
exlWkbk = exl.Workbooks;
exlFile = exlWkbk.Open('C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable\Fase 3\SimCable v3.7.xls');

exlSheet1 = exlFile.Sheets.Item('Resul. p cabo');
dat_range = 'D7:AG30';
rngObj = exlSheet1.Range(dat_range);
exlCellData = rngObj.Value;
exlData=cell2mat(exlCellData);

radim=50; %Constante para adimensionalização do raio
fadim=15; %Constante para adimensionalização da força

e=1;
for i=1:3
    FMup(:,i)=exlData(:,e);
    FRdw(:,i)=exlData(:,e+1);
    FRup(:,i)=exlData(:,e+2);
    FMdw(:,i)=exlData(:,e+3);
    miuUp(:,i)=exlData(:,e+6);
    miuDw(:,i)=exlData(:,e+7);
    velUp(:,i)=exlData(:,e+8);
    velDw(:,i)=exlData(:,e+9);
    e=e+10;
end

FMShapeUp=reshape(FMup',3*length(FMup),1);
FRShapeDw=reshape(FRdw',3*length(FRdw),1);
FRShapeUp=reshape(FRup',3*length(FRup),1);
FMShapeDw=reshape(FMdw',3*length(FMdw),1);
miuShapeUp=reshape(miuUp',3*length(miuUp),1);
miuShapeDw=reshape(miuDw',3*length(miuDw),1);
velShapeUp=reshape(velUp',3*length(velUp),1);
velShapeDw=reshape(velDw',3*length(velDw),1);

FMRA(:,1)=FMShapeUp(1:18,:);
FRRA(:,2)=FRShapeDw(1:18,:);
FRRA(:,1)=FRShapeUp(1:18,:);
FMRA(:,2)=FMShapeDw(1:18,:);

```

```

miuRA(:,1)=miuShapeUp(1:18,:);
miuRA(:,2)=miuShapeDw(1:18,:);
velRA(:,1)=velShapeUp(1:18,:);
velRA(:,2)=velShapeDw(1:18,:);

FRA=FRRA/fadim;

FMRF(:,1)=FMShapeUp(19:36,:);
FRRF(:,2)=FRShapeDw(19:36,:);
FRRF(:,1)=FRShapeUp(19:36,:);
FMRF(:,2)=FMShapeDw(19:36,:);
miuRF(:,1)=miuShapeUp(19:36,:);
miuRF(:,2)=miuShapeDw(19:36,:);
velRF(:,1)=velShapeUp(19:36,:);
velRF(:,2)=velShapeDw(19:36,:);
%Casos RF a eliminar:
FMRF(18,:)=[];FRRF(18,:)=[];
FMRF(15,:)=[];FRRF(15,:)=[];
FMRF(14,:)=[];FRRF(14,:)=[];
miuRF(18,:)=[];miuRF(15,:)=[];miuRF(14,:)=[];
velRF(18,:)=[];velRF(15,:)=[];velRF(14,:)=[];

FRF=FRRF/fadim;

FMEA(:,1)=FMShapeUp(37:54,:);
FREA(:,2)=FRShapeDw(37:54,:);
FREA(:,1)=FRShapeUp(37:54,:);
FMEA(:,2)=FMShapeDw(37:54,:);
miuEA(:,1)=miuShapeUp(37:54,:);
miuEA(:,2)=miuShapeDw(37:54,:);
velEA(:,1)=velShapeUp(37:54,:);
velEA(:,2)=velShapeDw(37:54,:);
%Casos EA a eliminar:
FMEA(18,:)=[];
FREA(18,:)=[];
miuEA(18,:)=[];
velEA(18,:)=[];

FEA=FREA/fadim;

FMEF(:,1)=FMShapeUp(55:72,:);
FREF(:,2)=FRShapeDw(55:72,:);
FREF(:,1)=FRShapeUp(55:72,:);
FMEF(:,2)=FMShapeDw(55:72,:);
miuEF(:,1)=miuShapeUp(55:72,:);
miuEF(:,2)=miuShapeDw(55:72,:);
velEF(:,1)=velShapeUp(55:72,:);

```

```

velEF(:,2)=velShapeDw(55:72,:);

FEF=FREF/fadim;

Betha(1:6,1:2)=pi/2; Betha(7:12,1:2)=pi; Betha(13:18,1:2)=2*pi;
BethaRA=Betha;
BethaRF=Betha;BethaRF(18,:)=[];BethaRF(15,:)=[];BethaRF(14,:)=[];
BethaEA=Betha;BethaEA(18,:)=[];
BethaEF=Betha;

for i=1:3:(length(FMRA)-2)
    Load(i,1)=32.558;
    Load(i+1,1)=52.501;
    Load(i+2,1)=77.579;
end

LoadRA=Load;
LoadRF=Load;LoadRF(18,:)=[];LoadRF(15,:)=[];LoadRF(14,:)=[];
LoadEA=Load;LoadEA(18,:)=[];
LoadEF=Load;

for i=1:6:(length(FMRA)-5)
    RadiusRA(i,1:2)=200;
    RadiusRA(i+1,1:2)=200;
    RadiusRA(i+2,1:2)=200;
end

for i=4:6:(length(FMRA)-2)
    RadiusRA(i,1:2)=300;
    RadiusRA(i+1,1:2)=300;
    RadiusRA(i+2,1:2)=300;
end

RRA=RadiusRA/radim;
RRF=RRA;RRF(18,:)=[];RRF(15,:)=[];RRF(14,:)=[];
REA=RRA;REA(18,:)=[];
REF=RRA;

x0=[0; 0];
% Cabo RA
errorRA = @(x)[((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*
*...
    FRA(:,1)))))./(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*FRA(:,1))))*
*100
    ((FRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*FRA(:,1))))).*
/...
    (LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*FRA(:,1))))*100];

```

```

xRA = lsqnonlin(errorRA,x0)

erroRA(:,1) = ((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).
* ...
FRA(:,1))))./(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*FRA(:,
1))))*100;

erroRA(:,2) = ((FRRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).
* ...
FRA(:,1))))./(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*FRA(:,
1))))*100;

erroRAmax=max(erroRA)
erroRAmin=min(erroRA)

%Cabo RF
errorRF = @(x)[((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).
* ...
FRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*FRF(:,1))))
*100
((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*FRF(:,1))))
/...
(LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*FRF(:,1))))*100];

xRF = lsqnonlin(errorRF,x0)

erroRF(:,1) = ((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).
* ...
FRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*FRF(:,
1))))*100;

erroRF(:,2) = ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).
* ...
FRF(:,1))))./(LoadRF(:)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*FRF(:,
1))))*100;

erroRFmax=max(erroRF)
erroRFmin=min(erroRF)

%Cabo EA
errorEA = @(x)[((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).
* ...
FEA(:,1))))./(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*FEA(:,1))))
*100
((FREAE(:,2)-(LoadEA(:)./exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*FEA(:,1))))
/...

```

```

        (LoadEA(:)./exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*FEA(:,1))))*100];

xEA = lsqnonlin(errorEA,x0)

erroEA(:,1) = ((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*
* ...
        FEA(:,1)))))./(LoadEA(:).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*FEA(:,
1)))))*100;

erroEA(:,2) = ((FREA(:,2)-(LoadEA(:)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*
* ...
        FEA(:,1)))))./(LoadEA(:)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*FEA(:,
1)))))*100;

erroEAmx=max(erroEA)
erroEAmin=min(erroEA)

%Cabo EF
errorEF = @(x)[((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*
* ...
        FEF(:,1)))))./(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*FEF(:,1))))
*100
        ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*FEF(:,1))))).
/ ...
        (LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*FEF(:,1))))*100];

xEF = lsqnonlin(errorEF,x0)

erroEF(:,1) = ((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*
* ...
        FEF(:,1)))))./(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*FEF(:,
1)))))*100;

erroEF(:,2) = ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*
* ...
        FEF(:,1)))))./(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*FEF(:,
1)))))*100;

erroEFmax=max(erroEF)
erroEFmin=min(erroEF)

```

K.7. Optimização 7 Apoiado

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 28 Out. 2008 %%
%% (Optimização da função do coef. de atrito 5AP) %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [] = optimization6AP()
clear all; clc;

exl = actxserver('excel.application');
exlwkbk = exl.Workbooks;
exlFile = exlwkbk.Open('C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable\Fase 3\SimCable v3.7.xls');

exlSheet1 = exlFile.Sheets.Item('Resul. p cabo');
dat_range = 'D7:AG30';
rngObj = exlSheet1.Range(dat_range);
exlCellData = rngObj.Value;
exlData=cell2mat(exlCellData);

radim=50; %Constante para adimensionalização do raio
vadim=3; %Constante para adimensionalização da velocidade

e=1;
for i=1:3
    FMup(:,i)=exlData(:,e);
    FRdw(:,i)=exlData(:,e+1);
    FRup(:,i)=exlData(:,e+2);
    FMdw(:,i)=exlData(:,e+3);
    miuUp(:,i)=exlData(:,e+6);
    miuDw(:,i)=exlData(:,e+7);
    velUp(:,i)=exlData(:,e+8);
    velDw(:,i)=exlData(:,e+9);
    e=e+10;
end

FMShapeUp=reshape(FMup',3*length(FMup),1);
FRShapeDw=reshape(FRdw',3*length(FRdw),1);
FRShapeUp=reshape(FRup',3*length(FRup),1);
FMShapeDw=reshape(FMdw',3*length(FMdw),1);
miuShapeUp=reshape(miuUp',3*length(miuUp),1);
miuShapeDw=reshape(miuDw',3*length(miuDw),1);
velShapeUp=reshape(velUp',3*length(velUp),1);
velShapeDw=reshape(velDw',3*length(velDw),1);

FMRA(:,1)=FMShapeUp(1:18,:);
FRRD(:,2)=FRShapeDw(1:18,:);
FRRU(:,1)=FRShapeUp(1:18,:);
FMRA(:,2)=FMShapeDw(1:18,:);

```

```
miuRA(:,1)=miuShapeUp(1:18,:);
miuRA(:,2)=miuShapeDw(1:18,:);
velRA(:,1)=velShapeUp(1:18,:);
velRA(:,2)=velShapeDw(1:18,:);

VRA=velRA/vadim;

FMRF(:,1)=FMShapeUp(19:36,:);
FRRF(:,2)=FRShapeDw(19:36,:);
FRRF(:,1)=FRShapeUp(19:36,:);
FMRF(:,2)=FMShapeDw(19:36,:);
miuRF(:,1)=miuShapeUp(19:36,:);
miuRF(:,2)=miuShapeDw(19:36,:);
velRF(:,1)=velShapeUp(19:36,:);
velRF(:,2)=velShapeDw(19:36,:);
%Casos RF a eliminar:
FMRF(18,:)=[];FRRF(18,:)=[];
FMRF(15,:)=[];FRRF(15,:)=[];
FMRF(14,:)=[];FRRF(14,:)=[];
miuRF(18,:)=[];miuRF(15,:)=[];miuRF(14,:)=[];
velRF(18,:)=[];velRF(15,:)=[];velRF(14,:)=[];

VRF=velRF/vadim;

FMEA(:,1)=FMShapeUp(37:54,:);
FREA(:,2)=FRShapeDw(37:54,:);
FREA(:,1)=FRShapeUp(37:54,:);
FMEA(:,2)=FMShapeDw(37:54,:);
miuEA(:,1)=miuShapeUp(37:54,:);
miuEA(:,2)=miuShapeDw(37:54,:);
veLEA(:,1)=velShapeUp(37:54,:);
veLEA(:,2)=velShapeDw(37:54,:);
%Casos EA a eliminar:
FMEA(18,:)=[];
FREA(18,:)=[];
miuEA(18,:)=[];
veLEA(18,:)=[];

VEA=veLEA/vadim;

FMEF(:,1)=FMShapeUp(55:72,:);
FREF(:,2)=FRShapeDw(55:72,:);
FREF(:,1)=FRShapeUp(55:72,:);
FMEF(:,2)=FMShapeDw(55:72,:);
miuEF(:,1)=miuShapeUp(55:72,:);
miuEF(:,2)=miuShapeDw(55:72,:);
veLEF(:,1)=velShapeUp(55:72,:);
```

```

velEF(:,2)=velShapeDw(55:72,:);

VEF=velEF/vadim;

Betha(1:6,1:2)=pi/2; Betha(7:12,1:2)=pi; Betha(13:18,1:2)=2*pi;
BethaRA=Betha;
BethaRF=Betha;BethaRF(18,:)=[];BethaRF(15,:)=[];BethaRF(14,:)=[];
BethaEA=Betha;BethaEA(18,:)=[];
BethaEF=Betha;

for i=1:3:(length(FMRA)-2)
    Load(i,1)=32.558;
    Load(i+1,1)=52.501;
    Load(i+2,1)=77.579;
end

LoadRA=Load;
LoadRF=Load;LoadRF(18,:)=[];LoadRF(15,:)=[];LoadRF(14,:)=[];
LoadEA=Load;LoadEA(18,:)=[];
LoadEF=Load;

for i=1:6:(length(FMRA)-5)
    RadiusRA(i,1:2)=200;
    RadiusRA(i+1,1:2)=200;
    RadiusRA(i+2,1:2)=200;
end

for i=4:6:(length(FMRA)-2)
    RadiusRA(i,1:2)=300;
    RadiusRA(i+1,1:2)=300;
    RadiusRA(i+2,1:2)=300;
end

RRA=RadiusRA/radim;
RRF=RRA;RRF(18,:)=[];RRF(15,:)=[];RRF(14,:)=[];
REA=RRA;REA(18,:)=[];
REF=RRA;

x0=[0; 0];
% Cabo RA
errorRA = @(x)[((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*
*...
    VRA(:,1))))./(LoadRA(:).*exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*VRA(:,1))))*
*100
    ((FRRA(:,2)-(LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*VRA(:,1))))*
/...
    (LoadRA(:)./exp(x(1).*BethaRA(:,1)+x(2).*VRA(:,1))))*100)];

```

```

xRA = lsqnonlin(errorRA,x0)

erroRA(:,1) = ((FMRA(:,1)-(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).
* ...
    VRA(:,1))))./(LoadRA(:).*exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*VRA(:,
1))))*100;

erroRA(:,2) = ((FRRa(:,2)-(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).
* ...
    VRA(:,1))))./(LoadRA(:)./exp(xRA(1).*BethaRA(:,1)+xRA(2).*VRA(:,
1))))*100;

erroRAmax=max(erroRA)
erroRAmin=min(erroRA)

%Cabo RF
errorRF = @(x)[((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).
* ...
    VRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*VRF(:,1))))
*100
    ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*VRF(:,1))))
/ ...
    (LoadRF(:)./exp(x(1).*BethaRF(:,1)+x(2).*VRF(:,1))))*100];

xRF = lsqnonlin(errorRF,x0)

erroRF(:,1) = ((FMRF(:,1)-(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).
* ...
    VRF(:,1))))./(LoadRF(:).*exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*VRF(:,
1))))*100;

erroRF(:,2) = ((FRRF(:,2)-(LoadRF(:)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).
* ...
    VRF(:,1))))./(LoadRF(:)./exp(xRF(1).*BethaRF(:,1)+xRF(2).*VRF(:,
1))))*100;

erroRFmax=max(erroRF)
erroRFmin=min(erroRF)

%Cabo EA
errorEA = @(x)[((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).
* ...
    VEA(:,1))))./(LoadEA(:).*exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*VEA(:,1))))
*100
    ((FREa(:,2)-(LoadEA(:)./exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*VEA(:,1))))
/ ...
    (LoadEA(:)./exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*VEA(:,1))))*100];

```

```

        (LoadEA(:)./exp(x(1).*BethaEA(:,1)+x(2).*VEA(:,1))))*100];

xEA = lsqnonlin(errorEA,x0)

erroEA(:,1) = ((FMEA(:,1)-(LoadEA(:).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*
*...
        VEA(:,1)))))./(LoadEA(:).*exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*VEA(:,
1)))))*100;

erroEA(:,2) = ((FREA(:,2)-(LoadEA(:)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*
*...
        VEA(:,1)))))./(LoadEA(:)./exp(xEA(1).*BethaEA(:,1)+xEA(2).*VEA(:,
1)))))*100;

erroEAmx=max(erroEA)
erroEAmin=min(erroEA)

%Cabo EF
errorEF = @(x)[((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*
*...
        VEF(:,1)))))./(LoadEF(:).*exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*VEF(:,1))))
*100
        ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*VEF(:,1))))).
/...
        (LoadEF(:)./exp(x(1).*BethaEF(:,1)+x(2).*VEF(:,1))))*100];

xEF = lsqnonlin(errorEF,x0)

erroEF(:,1) = ((FMEF(:,1)-(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*
*...
        VEF(:,1)))))./(LoadEF(:).*exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*VEF(:,
1)))))*100;

erroEF(:,2) = ((FREF(:,2)-(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*
*...
        VEF(:,1)))))./(LoadEF(:)./exp(xEF(1).*BethaEF(:,1)+xEF(2).*VEF(:,
1)))))*100;

erroEFmax=max(erroEF)
erroEFmin=min(erroEF)

```

K.8. *SimCable2*

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 20 Abr. 2008 %%
%% (Importa dados do ficheiro de valores médios) %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function varargout = SimCable2(varargin)
% SIMCABLE2 M-file for SimCable2.fig

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
clc;
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @SimCable2_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @SimCable2_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before SimCable2 is made visible.
function SimCable2_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% Choose default command line output for SimCable2
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

%Parâmetros do sistema
global PC1 PC2

set(handles.graphLogo, 'HandleVisibility', 'ON');
axes(handles.graphLogo);
image(imread('CETRIBlogo', 'bmp'));
axis equal;
axis tight;
axis off;
set(handles.graphLogo, 'HandleVisibility', 'OFF');

```

```
set(handles.graphInegi, 'HandleVisibility', 'ON');
axes(handles.graphInegi);
image(imread('INEGI', 'jpg'));
axis equal;
axis tight;
axis off;
set(handles.graphInegi, 'HandleVisibility', 'OFF');

PC1 = 1.438; %Peso da célula 1
PC2 = 2.472; %Peso da célula 2

set(handles.int1Text, 'String', num2str(PC1));
set(handles.int2Text, 'String', num2str(PC2));

set(handles.statusbar, 'String', 'Status: Ready.      Select file to ↵
read');

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = SimCable2_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function angEdit_Callback(hObject, eventdata, handles)

global ang
ang = str2double(get(hObject, 'String'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function angEdit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

% --- Executes on button press in exePush.
function exePush_Callback(hObject, eventdata, handles)

global ang F1 F2 PC1 PC2 percentbeg percentend fnameMd xx

set(handles.statusbar, 'String', 'Status: Processing Data...');

[fnameUp, fnameDw] = buildname(fnameMd);

CorrPC1 = cos(ang*pi/180)*PC1;
```

```

%Importação do ficheiro das médias do ensaio
importUpDw(fnameUp);

for hin=1:length(F1)
    F1up(hin,1)=mean(F1(percentbeg*50:percentend*50,hin));
    F2up(hin,1)=mean(F2(percentbeg*50:percentend*50,hin));
end

importUpDw(fnameDw);

for hin=1:length(F1)
    F1dw(hin,1)=mean(F1((1-percentend)*50:(1-percentbeg)*50,hin));
    F2dw(hin,1)=mean(F2((1-percentend)*50:(1-percentbeg)*50,hin));
end

%Correcção das forças
factor=1;

FMup = F1up - CorrPC1;
FRdw = F1dw - CorrPC1;
FRup = F2up + PC2*factor;
FMdw = F2dw + PC2*factor;

FaUp = FMup - FRup;
FaDw = FMdw - FRdw;

%Plot da variação da força da célula 1 com o nº de ciclos
ciclo = 1:length(FMup);

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'OFF');
set(handles.graphUp, 'HandleVisibility', 'ON');

axes(handles.graphUp);

plot(ciclo,FMup,'b',ciclo,FaUp,'r',0,0);
xlabel('Cycle');ylabel('FMup [N]');
title('Pulling Tension Variation on Ascending Direction'...
    , 'FontWeight', 'bold');
legend('Pulling Tension', 'Frictional Force', 'Location', 'East');
grid on;

set(handles.statusbar, 'String', 'Status: Select limits for mean values');
[xx yy]=ginput(2);
set(handles.statusbar, 'String', 'Status: Processing Data...');

set(handles.graphUp, 'HandleVisibility', 'OFF');

```

```

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'ON');

axes(handles.graphDw);

plot(ciclo, FRdw, 'b', ciclo, FaDw, 'r', 0, 0);
xlabel('Cycle'); ylabel('FRdw [N]');
title('Incoming Tension Variation on Descending Direction', ...
      'FontWeight', 'bold');
legend('Incoming Tension', 'Frictional Force', 'Location', 'East');
grid on;

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'OFF');

%Cálculo das médias das forças medidas pelas células
medF1up = mean(F1up(xx(1):xx(2)));
medF1dw = mean(F1dw(xx(1):xx(2)));
medF2up = mean(F2up(xx(1):xx(2)));
medF2dw = mean(F2dw(xx(1):xx(2)));

set(handles.c1upText, 'String', sprintf('%.2f', medF1up));
set(handles.c1dwText, 'String', sprintf('%.2f', medF1dw));
set(handles.c2upText, 'String', sprintf('%.2f', medF2up));
set(handles.c2dwText, 'String', sprintf('%.2f', medF2dw));

%Cálculo das médias das forças motoras e resistentes
digits(2);
medFMup = mean(FMup(xx(1):xx(2)));
medFRdw = mean(FRdw(xx(1):xx(2)));
medFRup = mean(FRup(xx(1):xx(2)));
medFMdw = mean(FMdw(xx(1):xx(2)));

set(handles.fmupText, 'String', sprintf('%.2f', medFMup));
set(handles.frdwText, 'String', sprintf('%.2f', medFRdw));
set(handles.frupText, 'String', sprintf('%.2f', medFRup));
set(handles.fmdwText, 'String', sprintf('%.2f', medFMdw));

%Cálculo das forças de atrito para os dois movimentos
medFaUp = mean(FaUp(xx(1):xx(2)));
medFaDw = mean(FaDw(xx(1):xx(2)));

set(handles.faupText, 'String', sprintf('%.2f', medFaUp));
set(handles.fadwText, 'String', sprintf('%.2f', medFaDw));

%Cálculo dos coeficientes de atrito médios para os dois movimentos
miuUp = 1/(ang*pi/180)*log(medFMup/medFRup);
miuDw = 1/(ang*pi/180)*log(medFMdw/medFRdw);

```

```
set(handles.caupText, 'String', sprintf( '%.4f', miuUp));
set(handles.cadwText, 'String', sprintf( '%.4f', miuDw));

set(handles.statusbar, 'String', 'Status: Data Processment Completed');

% --- Executes on button press in atritoPush.
function atritoPush_Callback(hObject, eventdata, handles)

SimCableAtrito_v1;

% --- Executes on button press in dinamPush.
function dinamPush_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Desl Temp fnameMd xx percentbeg percentend

[fnameUp, fnameDw] = buildname(fnameMd);

importUpDw(fnameUp);

midle=round((xx(1)+xx(2))/2);
for ipef = 2:50
    veloc= 1000*(Desl(ipef+1,midle)-Desl(ipef-1,midle))/(Temp(ipef+1,↵
midle)-Temp(ipef-1,midle));
    VelUp(ipef-1,1)=veloc;
    ipef=ipef+1;
end

for fepi = 2:48
    aceler= 1000*(VelUp(fepi+1)-VelUp(fepi-1))/(Temp(fepi+2,midle)-↵
Temp(fepi,midle));
    AcelUp(fepi-1)=aceler;
    fepi=fepi+1;
end

importUpDw(fnameDw);

for ipef = 2:50
    veloc= 1000*(Desl(ipef+1,midle)-Desl(ipef-1,midle))/(Temp(ipef+1,↵
midle)-Temp(ipef-1,midle));
    VelDw(ipef-1,1)=veloc;
    ipef=ipef+1;
end

for fepi = 2:48
    aceler= 1000*(VelDw(fepi+1)-VelDw(fepi-1))/(Temp(fepi+2,midle)-↵
Temp(fepi,midle));
    AcelDw(fepi-1)=aceler;
```

```

        fepi=fepi+1;
end

mVelUp=mean(VelUp(round(percentbeg*length(VelUp)):round(
(percentend*length(VelUp))));
mVelDw=mean(VelDw(round((1-percentend)*length(VelDw)):round((1-
percentbeg)*length(VelDw))));

figurename=sprintf('System Velocity on cycle %s',num2str(midle));
fighand = figure('Name',figurename,'NumberTitle','off');

subplot(2,1,1);
plot((Desl(2:50,midle))',VelUp,'-.r*');
hold on;
plot((Desl(3:49,midle))',AcelUp,'-.b*');
grid on;
title('Ascending Direction','FontWeight','bold');
xlabel('Displacement');ylabel('Speed. & Acel. ');
legend(sprintf('Speed (%.1f) [mm/s]',mVelUp),'Aceleration [mm/s^2]');

subplot(2,1,2);
plot((Desl(2:50,midle))',VelDw,'-.r*');
hold on;
plot((Desl(3:49,midle))',AcelDw,'-.b*');
set(gca,'XDir','reverse');
grid on;
title('Descending Direction','FontWeight','bold');
xlabel('Displacement');ylabel('Speed. & Acel. ');
legend(sprintf('Speed (%.1f) [mm/s]',mVelDw),'Aceleration
[mm/s^2]','Location','SouthEast');

set(fighand,'Position',[360, 150, 620, 530])

% --- Executes on button press in pushdinam.
function pushdinam_Callback(hObject, eventdata, handles)

SimCableDin;

% --- Executes on button press in openpush.
function openpush_Callback(hObject, eventdata, handles)
global fnameMd fpath

[fnameMd, fpath]=uigetfile('*.txt','Open Md test file',...
'C:\Documents and Settings\wilson\My Documents\SimCable');

if isequal(fnameMd,0)
    set(handles.statusbar,'String','Status: User Selected Cancel');

```

```
else
    statusprint=sprintf('Status: User Selected %s',fnameMd);
    set(handles.statusbar, 'String', statusprint);
    fdate=fpath(length(fpath)-14:length(fpath)-1);
    dateprint=sprintf('Test performed on %s',fdate);
    set(handles.dattext, 'String', dateprint);
end
```

K.9. *Cycle Dynamic*

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 20 Nov. 2008 %%
%%(Importa dados do ficheiro de valores Up e Down)%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function varargout = SimCableDin(varargin)
% SIMCABLEDIN M-file for SimCableDin.fig

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @SimCableDin_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @SimCableDin_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
end

% --- Executes just before SimCableDin is made visible.
function SimCableDin_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% Choose default command line output for SimCableDin
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes SimCableDin wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

set(handles.graphLogo, 'HandleVisibility', 'ON');
axes(handles.graphLogo);
image(imread('CETRIBlogo', 'bmp'));
axis equal;
axis tight;
axis off;
set(handles.graphLogo, 'HandleVisibility', 'OFF');

set(handles.graphInegi, 'HandleVisibility', 'ON');

```

```
axes(handles.graphInegi);
image(imread('INEGI', 'jpg'));
axis equal;
axis tight;
axis off;
set(handles.graphInegi, 'HandleVisibility', 'OFF');

set(handles.statdintext, 'String', 'Status: Ready to Compute');
%Parâmetros do sistema
global PC1 PC2 ang cicloini cicloint

set(handles.int1Text, 'String', num2str(PC1));
set(handles.int2Text, 'String', num2str(PC2));

set(handles.angEditA, 'String', ang);

set(handles.cicloiniEdit, 'String', 50);
cicloini = 50;
set(handles.ciclointEdit, 'String', 50);
cicloint = 50;

end
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = SimCableDin_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

end

function angEditA_Callback(hObject, eventdata, handles)

global ang
ang = str2double(get(hObject, 'String'));

end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function angEditA_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

end
```

```
function ciclointEdit_Callback(hObject, eventdata, handles)

global cicloint
cicloint = str2double(get(handles.ciclointEdit, 'String'));

end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ciclointEdit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

end
function cicloiniEdit_Callback(hObject, eventdata, handles)

global cicloini
cicloini = str2double(get(handles.cicloiniEdit, 'String'));

end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function cicloiniEdit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

end
% --- Executes on button press in exePush.
function exePush_Callback(hObject, eventdata, handles)

set(handles.statdintext, 'String', 'Status: Processing Data...');

global ang PC1 Desl F1 pole cicloini cicloint medFMUp...
medFRDw percentbeg percentend fnameMd SColor

set(handles.dwCheck, 'value', 0);
set(handles.upCheck, 'value', 0);

HandleCT=handles.cicloText;
HandleMT=handles.miuText;

for nn =1:12
    set(HandleCT(nn), 'String', blanks(2));
    set(HandleMT(nn), 'String', blanks(2));
```

```

end

[fnameUp, fnameDw] = buildname(fnameMd);

CorrPC1 = cos(ang*pi/180)*PC1;

% A - Tratamento do movimento ascendente
%Importação do ficheiro das médias do ensaio
importUpDw(fnameUp);

colm=1;
for indc=cicloini:cicloint:length(F1)
    for cic=1:51
        FMUp(cic,colm) = F1(cic,indc)-CorrPC1;
    end
    colm=colm+1;
end

%Plot da variação do coeficiente de atrito ao longo de um ciclo
SColor = [1.0 0.0 0.0; 0.4 0.8 0.0; 1.0 0.9 0.0;...
          0.4 0.3 1.0; 1.0 0.6 0.1; 0.0 0.0 0.0;...
          1.0 0.0 0.0; 0.4 0.8 0.0; 1.0 0.9 0.0;...
          0.4 0.3 1.0; 1.0 0.6 0.1; 0.0 0.0 0.0];

set(handles.dwCheck, 'value',0);

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility','OFF');
set(handles.graphUp, 'HandleVisibility','ON');

axes(handles.graphUp);

for plotind=1:(colm-1)
    colorind=sprintf('%.1f,%.1f,%.1f',SColor(plotind,1),SColor↵
(plotind,2),SColor(plotind,3));
    plot(Desl(2:51),FMUp(2:51,plotind), 'Color',str2num(colorind)); %↵
#ok<ST2NM>
    hold on
end
plot(0,0);
hold off;
xlabel('Displacement');ylabel('Pulling Tension');
title('Pulling Tension Variation on Ascending Direction'...
      , 'FontWeight','bold');
grid on;

set(handles.datdintext, 'String','Select mean values');
[xx yy]=ginput(2);

```

```

set(handles.datdintext, 'String', '');

percentbeg = round(xx(1))/50;
percentend = round(xx(2))/50;

set(handles.graphUp, 'HandleVisibility', 'OFF');

medFMUp=NaN(1,15);
medfmup=mean(FMUp(percentbeg*length(FMUp):length(FMUp)*percentend,:));
for index = 1:length(medfmup)
    medFMUp(1,index)= medfmup(1,index);
end

% B - Tratamento do movimento descendente
%Importação do ficheiro das médias do ensaio
importUpDw(fnameDw);

colm=1;
for indc=cicloini:cicloint:length(F1)
    for cic=1:51
        FRDw(cic,colm) = F1(cic,indc)-CorrPC1;
    end
    colm=colm+1;
end

medFRDw=NaN(1,15);
medfrdw=mean(F1((1-percentend)*length(FRDw):length(FRDw)*(1-
percentbeg),:));
for index = 1:length(medfrdw)
    medFRDw(1,index)= medfrdw(1,index);
end

%Plot da variação do coeficiente de atrito ao longo de um ciclo

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'ON');

axes(handles.graphDw);

for plotind=1:(colm-1)
    colorind=sprintf('%.1f,%.1f,%.1f',SColor(plotind,1),SColor
(plotind,2),SColor(plotind,3));
    plot(Desl(1:50),FRDw(1:50,plotind), 'Color', str2num(colorind)); %
#ok<ST2NM>
    hold on
end
plot(0,0);
hold off;

```

```

set(gca,'XDir','reverse');
xlabel('Displacement');ylabel('Incoming Tension');
title('Incoming Tension Variation on Descending Direction'...
      , 'FontWeight', 'bold');
grid on;

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'OFF');

set(handles.upCheck, 'value', 1);

pole=(length(F1)-cicloini)/cicloint;

HandleCT=handles.cicloText;
HandleMT=handles.miuText;

if get(handles.upCheck, 'value')== 1
    for nn =0:pole
        colorind=sprintf('[%.1f,%.1f,%.1f]', SColor(nn+1,1), SColor(nn+1,2), SColor(nn+1,3));
        set(HandleCT(length(HandleCT)-nn), 'String', sprintf('%.0f', cicloini+nn*cicloint), 'ForegroundColor', str2num(colorind)); %ok<ST2NM>
        set(HandleMT(length(HandleMT)-nn), 'String', sprintf('%.2f', medFMUp(nn+1)));
    end
end
set(handles.statdintext, 'String', 'Status: Done. Ready!');
end
% --- Executes on button press in backPush.
function backPush_Callback(hObject, eventdata, handles)

close;

end
% --- Executes on button press in upCheck.
function upCheck_Callback(hObject, eventdata, handles)

global cicloini cicloint medFMUp pole SColor

HandleCT=handles.cicloText;
HandleMT=handles.miuText;

if get(handles.upCheck, 'value')== 1
    for nn =0:pole
        colorind=sprintf('[%.1f,%.1f,%.1f]', SColor(nn+1,1), SColor(nn+1,2), SColor(nn+1,3));
        set(HandleCT(length(HandleCT)-nn), 'String', sprintf('%.0f',

```

```

cicloini+nn*cicloint), 'ForegroundColor', str2num(colorind)); %↵
#ok<ST2NM>
    set(HandleMT(length(HandleMT)-nn), 'String', sprintf('%.2f', ↵
medFMUp(nn+1)));
    end
end

set(handles.dwCheck, 'value', 0);

end
% --- Executes on button press in dwCheck.
function dwCheck_Callback(hObject, eventdata, handles)

global cicloini cicloint medFRDw pole SColor

HandleCT=handles.cicloText;
HandleMT=handles.miuText;

if get(handles.dwCheck, 'value')== 1
    for nn =0:pole
        colorind=sprintf('[%.1f,%.1f,%.1f]', SColor(nn+1,1), SColor ↵
(nn+1,2), SColor(nn+1,3));
        set(HandleCT(length(HandleCT)-nn), 'String', sprintf('%.0f', ↵
cicloini+nn*cicloint), 'ForegroundColor', str2num(colorind)); %↵
#ok<ST2NM>
        set(HandleMT(length(HandleMT)-nn), 'String', sprintf('%.2f', ↵
medFRDw(nn+1)));
        end
    end

set(handles.upCheck, 'value', 0);

end

```

K.10. *Friction Coefficient*

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Helder Wilson Oliveira - CETRIB - 30 Abr. 2008 %%
%%(Importa dados do ficheiro de valores Up e Down)%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function varargout = SimCableAtrito_v1(varargin)
% SIMCABLEATRITO_V1 M-file for SimCableAtrito_v1.fig

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @SimCableAtrito_v1_OpeningFcn, ...
                  ...
                  'gui_OutputFcn',  @SimCableAtrito_v1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
end

% --- Executes just before SimCableAtrito_v1 is made visible.
function SimCableAtrito_v1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% Choose default command line output for SimCableAtrito_v1
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

set(handles.graphLogo, 'HandleVisibility', 'ON');
axes(handles.graphLogo);
image(imread('CETRIBlogo', 'bmp'));
axis equal;
axis tight;
axis off;
set(handles.graphLogo, 'HandleVisibility', 'OFF');

set(handles.graphInegi, 'HandleVisibility', 'ON');
axes(handles.graphInegi);

```

```
image(imread('INEGI', 'jpg'));
axis equal;
axis tight;
axis off;
set(handles.graphInegi, 'HandleVisibility', 'OFF');

set(handles.statfritext, 'String', 'Status: Ready to Compute');
%Parâmetros do sistema
global PC1 PC2 ang cicloini cicloint

set(handles.int1Text, 'String', num2str(PC1));
set(handles.int2Text, 'String', num2str(PC2));

set(handles.angEditA, 'String', ang);

set(handles.cicloiniEdit, 'String', 50);
cicloini = 50;
set(handles.ciclointEdit, 'String', 50);
cicloint = 50;

end
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = SimCableAtrito_v1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

end

function angEditA_Callback(hObject, eventdata, handles)

global ang
ang = str2double(get(hObject, 'String'));

end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function angEditA_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

end

function ciclointEdit_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
global cicloint
cicloint = str2double(get(handles.ciclointEdit, 'String'));

end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ciclointEdit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

end
function cicloiniEdit_Callback(hObject, eventdata, handles)

global cicloini
cicloini = str2double(get(handles.cicloiniEdit, 'String'));

end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function cicloiniEdit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(
(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

end
% --- Executes on button press in exePush.
function exePush_Callback(hObject, eventdata, handles)

set(handles.statfritext, 'String', 'Status: Processing Data...');

global ang PC1 PC2 Desl F1 F2 pole cicloini cicloint ...
    medmiuUp medmiuDw percentbeg percentend fnameMd SColor

set(handles.dwCheck, 'value', 0);
set(handles.upCheck, 'value', 0);

HandleCT=handles.cicloText;
HandleMT=handles.miuText;

for nn =1:12
    set(HandleCT(nn), 'String', blanks(2));
    set(HandleMT(nn), 'String', blanks(2));
end
```

```

[fnameUp, fnameDw] = buildname(fnameMd);

CorrPC1 = cos(ang*pi/180)*PC1;

% A - Tratamento do movimento ascendente
%Importação do ficheiro das médias do ensaio
importUpDw(fnameUp);

colm=1;
for indc=cicloini:cicloint:length(F1)
    for cic=1:51
        miuUp(cic,colm) = 1/(ang*pi/180)*log((F1(cic,indc)-CorrPC1)↵
/...
        (F2(cic,indc)+PC2));
    end
    colm=colm+1;
end
medmiuUp=NaN(1,15);
medUpp=mean(miuUp(percentbeg*length(miuUp):length(miuUp)↵
*percentend,:));
for index = 1:length(medUpp)
    medmiuUp(1,index)= medUpp(1,index);
end

%Plot da variação do coeficiente de atrito ao longo de um ciclo
SColor = [1.0 0.0 0.0; 0.4 0.8 0.0; 1.0 0.9 0.0;...
0.4 0.3 1.0; 1.0 0.6 0.1; 0.0 0.0 0.0;...
1.0 0.0 0.0; 0.4 0.8 0.0; 1.0 0.9 0.0;...
0.4 0.3 1.0; 1.0 0.6 0.1; 0.0 0.0 0.0];

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'OFF');
set(handles.graphUp, 'HandleVisibility', 'ON');

axes(handles.graphUp);

for plotind=1:(colm-1)
    colorind=sprintf('%.1f,%.1f,%.1f',SColor(plotind,1),SColor↵
(plotind,2),SColor(plotind,3));
    plot(Desl(2:51),miuUp(2:51,plotind), 'Color',str2num(colorind)); %↵
#ok<ST2NM>
    hold on
end
plot(0,0);
hold off;
xlabel('Displacement');ylabel('Friction Coef. ');
title('Friction Coef. Variation on Ascending Direction'...
```

```

        , 'FontWeight', 'bold');
grid on;

set(handles.graphUp, 'HandleVisibility', 'OFF');

% B - Tratamento do movimento descendente
%Importação do ficheiro das médias do ensaio
importUpDw(fnameDw);

colm=1;
for indc=cicloini:cicloint:length(F1)
    for cic=1:51
        miuDw(cic,colm) = 1/(ang*pi/180)*log((F2(cic,indc)+PC2)/...
            (F1(cic,indc)-CorrPC1));
    end
    colm=colm+1;
end

medmiuDw=NaN(1,15);
medDww=mean(miuDw((1-percentend)*length(miuDw):length(miuDw)*(1-
percentbeg),:));
for index = 1:length(medDww)
    medmiuDw(1,index)= medDww(1,index);
end

%Plot da variação do coeficiente de atrito ao longo de um ciclo

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'ON');

axes(handles.graphDw);

for plotind=1:(colm-1)
    colorind=sprintf('%.1f,%.1f,%.1f', SColor(plotind,1), SColor
(plotind,2), SColor(plotind,3));
    plot(Desl(1:50),miuDw(1:50,plotind), 'Color', str2num(colorind)); %
#ok<ST2NM>
    hold on
end
plot(0,0);
hold off;
set(gca, 'XDir', 'reverse');
xlabel('Displacement');ylabel('Friction Coef. ');
title('Friction Coef. Variation on Descending Direction'...
    , 'FontWeight', 'bold');
grid on;

set(handles.graphDw, 'HandleVisibility', 'OFF');

```

```
set(handles.upCheck, 'value', 1);

pole=(length(F1)-cicloini)/cicloint;

if get(handles.upCheck, 'value')== 1
    for nn =0:pole
        colorind=sprintf('%.1f,%.1f,%.1f', SColor(nn+1,1), SColor(nn+1,2), SColor(nn+1,3));
        set(HandleCT(length(HandleCT)-nn), 'String', sprintf('%.0f', cicloini+nn*cicloint), 'ForegroundColor', str2num(colorind)); %ok<ST2NM>
        set(HandleMT(length(HandleMT)-nn), 'String', sprintf('%.4f', medmiuUp(nn+1)));
    end
end
set(handles.statfritext, 'String', 'Status: Done. Ready!');
end
% --- Executes on button press in backPush.
function backPush_Callback(hObject, eventdata, handles)

close;

end
% --- Executes on button press in upCheck.
function upCheck_Callback(hObject, eventdata, handles)

global cicloini cicloint medmiuUp pole SColor

HandleCT=handles.cicloText;
HandleMT=handles.miuText;

if get(handles.upCheck, 'value')== 1
    for nn =0:pole
        colorind=sprintf('%.1f,%.1f,%.1f', SColor(nn+1,1), SColor(nn+1,2), SColor(nn+1,3));
        set(HandleCT(length(HandleCT)-nn), 'String', sprintf('%.0f', cicloini+nn*cicloint), 'ForegroundColor', str2num(colorind)); %ok<ST2NM>
        set(HandleMT(length(HandleMT)-nn), 'String', sprintf('%.4f', medmiuUp(nn+1)));
    end
end

set(handles.dwCheck, 'value', 0);

end
```

```
% --- Executes on button press in dwCheck.
function dwCheck_Callback(hObject, eventdata, handles)

global cicloini cicloint medmiuDw pole SColor

HandleCT=handles.cicloText;
HandleMT=handles.miuText;

if get(handles.dwCheck, 'value')== 1
    for nn =0:pole
        colorind=sprintf('%.1f,%.1f,%.1f', SColor(nn+1,1), SColor(nn+1,2), SColor(nn+1,3));
        set(HandleCT(length(HandleCT)-nn), 'String', sprintf('%.0f', cicloini+nn*cicloint), 'ForegroundColor', str2num(colorind)); %ok<ST2NM>
        set(HandleMT(length(HandleMT)-nn), 'String', sprintf('%.4f', medmiuDw(nn+1)));
    end
end

set(handles.upCheck, 'value', 0);

end
```

