



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Bruno André Martins Oliveira

Investigação e desenvolvimento de cabos em  
material polimérico para acionamento de  
autoclismos





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Bruno André Martins Oliveira

Investigação e desenvolvimento de cabos em  
material polimérico para acionamento de  
autoclismos

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor António Sérgio Pouzada  
Engenheira Andreia Costa

julho de 2015

## DECLARAÇÃO

Nome: Bruno André Martins Oliveira

Endereço eletrónico: [a61979@alunos.uminho.pt](mailto:a61979@alunos.uminho.pt) Telefone:916538286

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14177893

Título da dissertação: Investigação e desenvolvimento de cabos em material polimérico para acionamento de autoclismos

Orientador/a/es:

Professor António Sérgio Pouzada

Engenheira Andreia Costa

Ano de conclusão: 2015

Mestrado em Engenharia de Polímeros

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura:

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer aos meus tutores Professor António Sérgio Pouzada e à Engenheira Andreia Costa, por todo o apoio prestado durante a dissertação e por terem sido uns guias que tornaram o meu trabalho muito mais objetivo.

Gostaria de agradecer à OLI e a todos os seus colaboradores, que viveram comigo esta fase importante da minha vida, sobretudo aos colaboradores do Departamento de Desenvolvimento e do Departamento de Inovação, pelo acolhimento, paciência e espírito crítico que tornaram o meu trabalho mais rigoroso. Agradeço à minha família pelo apoio e pela paciência para aqueles dias em que estava menos bem, e em que eles souberam contornar.

Por último, mas com a mesma importância dos anteriores, aos meus amigos que me apoiaram, desde o início desta minha caminhada, mas não posso deixar de referir o grupo de IAC's de Aveiro que mudaram por completo a minha vida.

**A todos, um muito obrigado!**

## RESUMO

A otimização de artigos técnicos produzidos em grandes séries, designadamente para a redução do seu custo de produção, é hoje um aspeto prioritário para as empresas. Neste sentido, a empresa Oliveira & Irmão, S.A pretende a substituição do conjunto cabo-de-aço/manga-polimérica no mecanismo de acionamento de autoclismos *Atlas Cabos*, por um monofilamento polimérico com valor de produção mais baixo.

Neste trabalho estudaram-se vários materiais poliméricos disponíveis no mercado, tanto monofilamentares como multifilamentares. As possíveis soluções alternativas foram testadas em situação real de serviço e, também, num equipamento-protótipo de ensaio de conjuntos cabo-manga desenvolvido no âmbito deste estudo. Foi analisada a variação da força de acionamento do mecanismo de acionamento de autoclismos em condições de serviço real. O equipamento-protótipo foi usado para a análise preliminar da variação da força de atrito no acionamento de vários conjuntos cabo-manga.

No equipamento-protótipo verificou-se não existir variação da força de atrito com o aumento do número de ciclos. Também se obtiveram os melhores resultados (menor força de atrito) com o conjunto cabo monofilamentar em PEEK, com diâmetro de 0,5 mm e manga em HDPE segmentada transversalmente, com um espaçamento entre cortes de 20 mm. Este conjunto também teve o melhor desempenho em condições de serviço reais.

**Palavras-chave:** conjunto cabo-manga, monofilamento polimérico, força de atrito.

## **ABSTRACT**

The optimization of technical articles produced in large series, namely to reduce their cost of production, is now a priority issue in the industry. In this regard, the company Oliveira & Irmão, S.A aims at replacing the steel cable in the flush mechanism *Atlas Cabos*, by a lower costing polymeric monofilament.

In this study various polymeric materials available in the market, both monofilament and multifilament, were investigated. Possible alternative solutions were tested in service operation conditions and also in a prototype-equipment specially designed for testing cable-sleeve sets. The variation of the activation force of cable-sleeve sets of the flushing mechanism driving force in real operating conditions was analysed. The prototype was used for the preliminary analyses of the variation of the friction force in the operation of the cable-sleeve sets.

In the prototype equipment it was found that here is no variation of the friction force with the increasing number of cycles. The best results (lowest frictional force) were achieved with the PEEK cable / HDPE sleeve consisting of a cable of PEEK monofilament with diameter of 0.5 mm and HDPE sleeve transversely segmented with 20 mm spacing between cuts. This set also showed the best in the service operation tests.

**Key words:** cable-sleeve, polymer monofilament, friction force

## ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xi
1. Introdução.....	1
1.1 OLI.....	1
1.2 Sistemas de acionamento de autoclismos.....	2
1.2.1 Sistema de acionamento por cabos ( <i>Atlas Cabos</i> ).....	3
1.2.2 Especificações do produto.....	4
1.2.3 Análise do conjunto cabo-manga e problema em análise.....	5
1.3 Objetivos gerais da dissertação.....	6
2. Estado da arte.....	7
2.1.1 Prós e contras dos conjuntos cabo-manga.....	8
2.2.1 Atrito seco.....	10
2.2.2 Desgaste.....	12
3. Desenvolvimento do equipamento protótipo de ensaio de conjuntos cabo-manga.....	17
4. Métodos experimentais.....	21
4.1.1 Materiais para cabos.....	21
4.1.2 Materiais para mangas.....	22
5. Resultados e discussão.....	27
5.2.1 Conjunto cabo-manga usado atualmente.....	28
5.2.2 Conjuntos cabo-manga, com cabo polimérico.....	29
5.2.3 <i>Endurance</i> do monofilamento em PEEK 0,5 mm.....	30
5.2.4 Influência do ângulo de curvatura.....	31

5.2.5	Estudo do efeito do corte da manga .....	32
5.2.6	Aproximação dos resultados a partir do modelo de Phee .....	33
5.2.7	Conjuntos com monofilamentos poliméricos.....	35
5.2.8	Monofilamentos poliméricos com manga segmentada .....	36
	Conclusões.....	37
	Recomendações para trabalhos futuros.....	38
	Bibliografia .....	39
	Anexos .....	41
	Anexo A – Desenho técnico do equipamento - Protótipo.....	42
	Anexo B – Gráfico dos ensaios aos diferentes conjuntos cabo-manga.....	44
	Anexo C – Fichas de ensaio em testes de vida .....	49

## Lista de Figuras

Figura 1 - Organigrama da OLI .....	2
Figura 2 – Mecanismos de acionamento de descarga da OLI .....	3
Figura 3 - Sistema de acionamento por cabos .....	4
Figura 4 - Desenho técnico do conjunto cabo-manga .....	5
Figura 5 – Pormenor do terminal do cabo .....	5
Figura 6 - Distinção entre cirurgia invasiva e cirurgia minimamente invasiva .....	7
Figura 7 - Cronologia de efeitos nos conjuntos cabo-manga .....	8
Figura 8 - Componentes de um tribossistema .....	10
Figura 9 – Diagrama de forças de um corpo em repouso sobre uma superfície .....	11
Figura 10 -Força tangencial em função do tempo; $F_{static}$ - atrito estático; $F_{kinetic}$ – atrito cinético .....	11
Figura 11 – Variação do coeficiente de atrito com a rugosidade no caso do HDPE .....	13
Figura 12 - Propriedades tribológicas de contacto polímero-polímero em micro rolamentos.....	14
Figura 13 – Modelo de Dahl .....	15
Figura 14 - Modelo considerando a variação do raio de curvatura .....	16
Figura 15 - Conceito do equipamento protótipo a desenvolver .....	19
Figura 16 - Solução final do equipamento de ensaio do conjunto cabo-manga .....	20
Figura 17 - Interface do software.....	22
Figura 18 - Interface do software para ajustar o cilindro à posição .....	23
Figura 19 - Interface do software durante o ensaio (1-Ajuste da posição inicial e final;2-Ajuste da velocidade do ensaio; 3-Interface gráfica com o utilizador a cada instante; 4-Valor da força lida pela célula de carga a cada instante; 5-Botão Start/Stop) .....	23
Figura 20 – Bancada de ensaio do laboratório .....	24
Figura 21 - Encaixe no sistema de acionamento com cerra-cabos.....	25
Figura 22 - Ficha de registo de ensaio em testes de vida .....	26
Figura 23 - Caracterização no EP do conjunto aço-HDPE usado atualmente.....	29
Figura 24 - Ensaio de endurance ao monofilamento em PEEK 0,5 mm.....	31
Figura 25 - Variação da carga lida em função do número de ciclos e para diferentes ângulos de curvatura.....	32
Figura 26 - Estudo do efeito do corte da manga .....	33
Figura 27 – Raio de curvatura considerado (75mm).....	34

Figura 28 - Força de acionamento dos diferentes conjuntos.....	35
Figura 29- Variação da força de atrito dos conjuntos com monofilamento em PEEK 0,5mm..	36
Figura 30 – Suporte da estrutura .....	43
Figura 31 – Conjunto cabo-manga em ensaio .....	43
Figura 32 – Ensaio no EP do cabo PA6 com diâmetro 0,8mm.....	44
Figura 33 - Ensaio no EP do cabo PA6 com diâmetro 1mm.....	44
Figura 34 - Ensaio no EP do cabo PA6 com diâmetro 1,5mm.....	45
Figura 35 - Ensaio no EP do cabo PEEK com diâmetro 0,5mm.....	45
Figura 36 - Ensaio no EP do cabo PEEK com diâmetro 0,8mm.....	46
Figura 37 - Ensaio no EP do cabo PEEK com diâmetro 1mm.....	46
Figura 38 - Ensaio no EP do cabo PPS com diâmetro 0,7mm.....	47
Figura 39 - Ensaio no EP do cabo PPS com diâmetro 0,8mm.....	47
Figura 40 - Ensaio no EP do cabo Dyneema com diâmetro 0,5mm.....	48

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Passos para o desenvolvimento do conceito.....	18
Tabela 2 – Características dos cabos monofilamentares e multifilamentares (*-Cabos multifilamentares) .....	21
Tabela 3 - Amostras de mangas recolhidas .....	22
Tabela 4 - Avaliação do EP .....	27
Tabela 5 - Parâmetros de ensaio.....	28
Tabela 6 - Carga lida no final dos 700 ciclos nas posições definidas .....	29
Tabela 7 - Valor médio do coeficiente de atrito de diferentes materiais.....	34

## Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

OLI – Oliveira & Irmão, S.A

PEEK – Poli(éter-éter-cetona)

HDPE – Polietileno de Baixa Densidade

NF076 – Norma Francesa 076

PET – Poli(tereftalato de etileno)

EP – Equipamento Protótipo

PPS - Poli(sulfureto de fenileno)

PTFE – Politetrafluoroetileno

PVDF – Poli(floureto de vinilideno)

PBO – Poli (p-fenilo benzoxazole)

UHMWPE – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

PA6 – Poliamida 6

TECHNORA – Fibra de aramida

PE – Polietileno

PMMA – Poli(metacrilato de metilo)

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 OLI

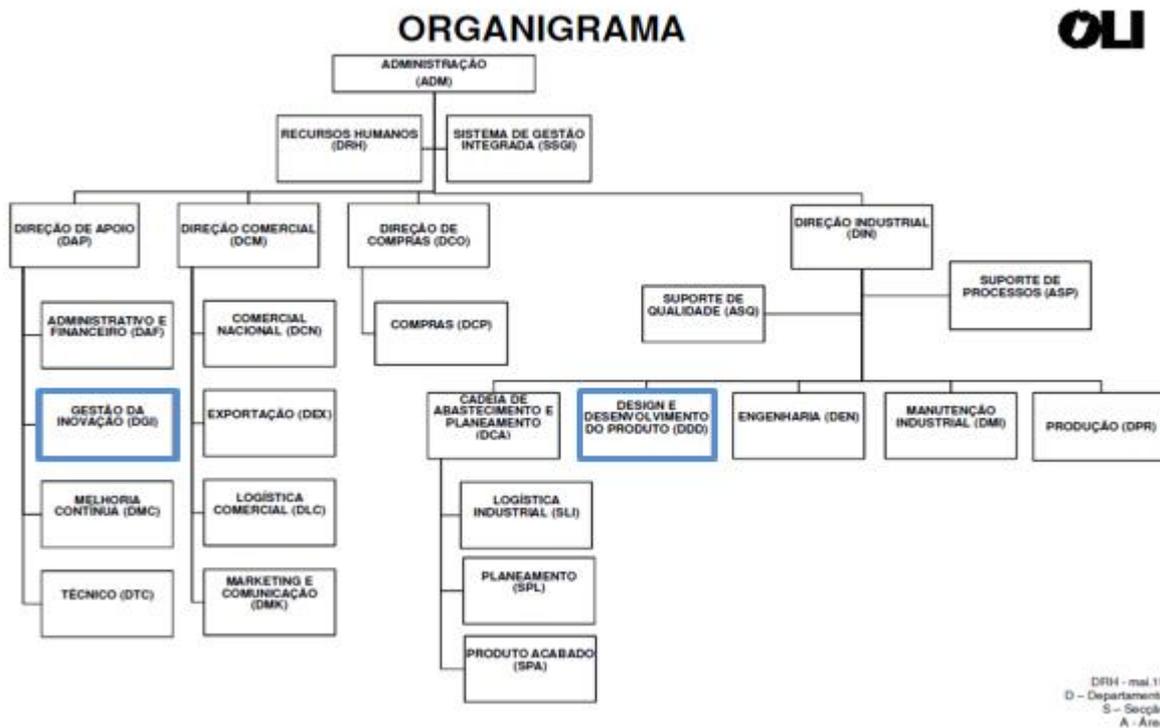
A empresa OLI foi fundada em 1954 em Aveiro, dedicando-se inicialmente apenas à área comercial. Para dar resposta às crescentes solicitações do mercado, em 1981, criou a sua primeira unidade industrial, em que se especializou no fabrico de autoclismos em componentes plásticos, e em mecanismos de enchimento e de descarga de autoclismos para a indústria cerâmica.

A OLI é atualmente líder ibérica na produção de autoclismos, e dedica-se à conceção, industrialização, produção e comercialização de sistemas de instalação sanitária para a indústria cerâmica. Os seus produtos estão presentes em cerca de 60 países dos cinco continentes, empregando hoje mais de 350 colaboradores. É uma das unidades industriais mais modernas e dinâmicas com garantia de qualidade comprovada por vários organismos nacionais e internacionais e pela crescente procura na inovação dos seus produtos.

“Uma empresa portuguesa, que lidera o mercado de autoclismos na península ibérica, anunciou hoje o investimento de meio milhão de euros no seu laboratório (...)”. (“Diário de Notícias” 2015)

O laboratório é essencial para uma aprovação preliminar de todos os novos produtos em desenvolvimento. Este foi construído de forma a poder aplicar as diferentes normas que regem estes produtos nos diferentes países. Além disso, permite testar todos os produtos em água da chuva, calcária e marítima. Por exemplo, em Hong Kong é utilizada a água do mar nos autoclismos, e isto permitirá abrir caminho para novos mercados.

Na OLI, uma equipa de cerca de 20 colaboradores trabalha diariamente na valência de inovação. Foi integrado nesta equipa que o autor da presente dissertação realizou o trabalho na área de Gestão da Inovação, com auxílio do departamento de Design e Desenvolvimento de Produto, (Figura 1).



*Figura 1 - Organigrama da OLI*

## 1.2 Sistemas de acionamento de autoclismos

O mecanismo de descarga, comumente designado por *válvula* é o principal elemento de controlo das descargas de água dos autoclismos. Existem vários tipos de soluções para este elemento que permite, por exemplo, controlar o volume de descarga.

A atuação deste mecanismo é efetuada com um sistema de comando que pode ser mecânico (botão) ou elétrico (sensor). No caso do sistema mecânico é possível interromper a descarga a qualquer momento, enquanto no caso elétrico o volume de água vai depender do tempo que o utilizador permanece junto ao sensor.

Esta diversidade de soluções vem no sentido de responder às exigências do mercado, entre as quais se destacam:

- A crescente necessidade de poupança de água;
- As exigentes normas em vigor;
- Diferenciação em relação ao mercado;
- A especificidade dos tanques cerâmicos;



Figura 2 – Mecanismos de acionamento de descarga da OLI

A OLI fabrica quatro tipos de mecanismos de acionamento de descarga (Figura 2):

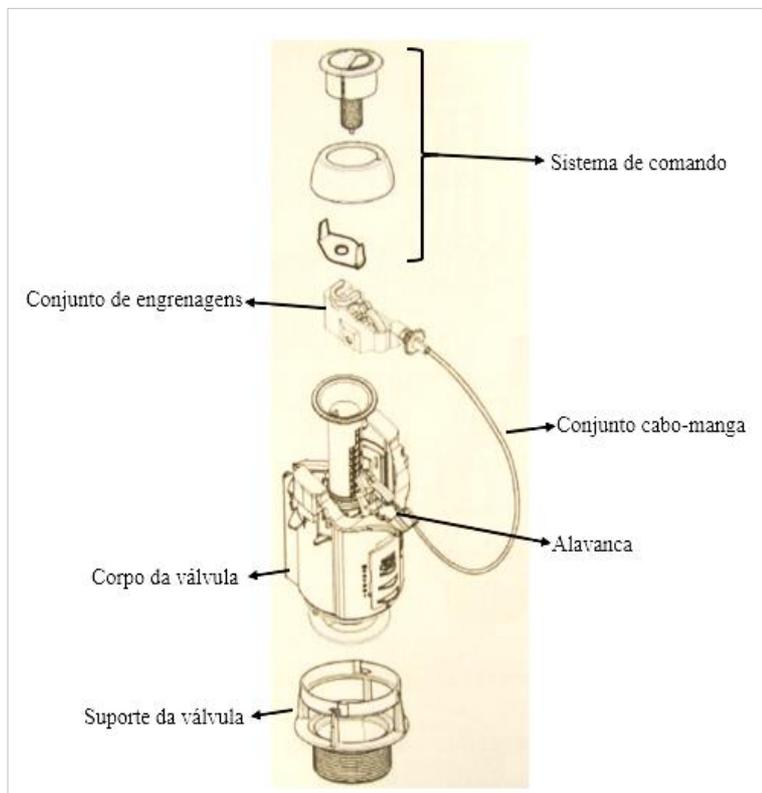
1. *Mecânico* – o movimento é acionado através de alavancas;
2. *Pneumático* – o movimento de acionamento é realizado por compressão/transferência de ar entre duas câmaras;
3. *Eletrónico* – o acionamento é desencadeado através de sensores infravermelhos;
4. *Cabos* – o movimento é transmitido por um cabo que desliza dentro de uma manga externa.

#### 1.2.1 Sistema de acionamento por cabos (*Atlas Cabos*)

O sistema de acionamento por cabos, designado por *Atlas Cabos*, é constituído por um conjunto de elementos fundamentais, cujas funções estão interligadas. Os elementos são:

- *Sistema de comando* – responsável pelo movimento das engrenagens;
- *Conjunto de engrenagens* – consoante o sistema de comando vai originar um determinado deslocamento do cabo na manga, e isso define se a descarga é completa ou parcial;
- *Conjunto cabo-manga* – o conjunto de engrenagens vai obrigar o cabo a deslizar dentro da manga, permitindo que a força se exerça na outra extremidade do cabo, junto à alavanca;
- *Alavanca* – responsável por levantar o corpo da válvula para que a água passe entre este e o suporte do mesmo;

- *Suporte da válvula* – permite a fixação do sistema de acionamento ao tanque e suporta o corpo da válvula no tanque cerâmico.



*Figura 3 - Sistema de acionamento por cabos*

O mercado exige, cada vez mais, este tipo de sistema, devido à sua fácil instalação e manutenção. Em comparação com os outros mecanismos de acionamento de descarga, o fato de a *Atlas Cabos* possuir um cabo flexível, faz com que a ligação entre o sistema de comando e os restantes componentes tenha um ajuste mais rápido e fácil à altura do reservatório cerâmico, podendo o sistema de acionamento ser frontal, de topo ou lateral (Vieira 2013). Além disto, o sistema de acionamento por cabos é de dupla descarga, permitindo o controlo do gasto de água, em cada descarga.

### 1.2.2 Especificações do produto

A grande vantagem deste sistema é a universalidade e a separação que é permitida entre o sistema de comando e o mecanismo de descarga, que permite grandes tolerâncias de concentricidade entre os furos da tampa do autoclismo cerâmico e a sua base (Vieira 2013).

Este produto é atualmente certificado pela norma *NF076* (CSTB 2013), que certifica mecanismos de acionamento de descargas de autoclismos para tanques de autoclismos.

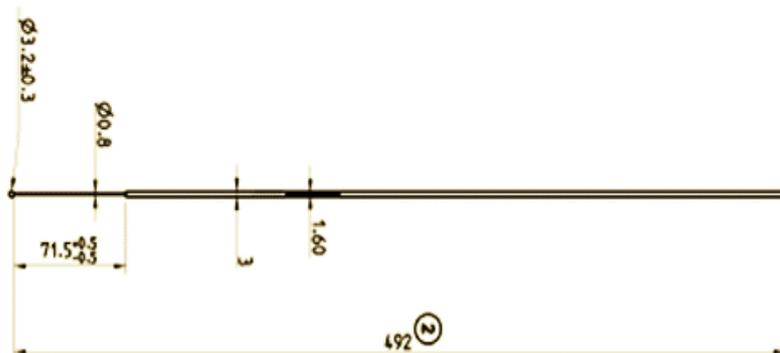
Esta certificação exige que o produto tenha as seguintes características:

- A força inicial, no ciclo 0, para acionamento do mecanismo não pode ser superior a 20 N;
- A força de acionamento ao fim de 200 000 ciclos de descarga, não pode ser superior a 25 N.

Além destas, entre outros aspetos importantes, a norma também define parâmetros para o volume de água das descargas, assim como a velocidade da descarga.

### 1.2.3 Análise do conjunto cabo-manga e problema em análise

O conjunto cabo-manga é atualmente constituído por um cabo interior em aço inox, com duas esferas de latão prensadas em ambas as extremidades e uma manga exterior em HDPE. Este conjunto é comprado à empresa Carl Stahl (Alemanha).



*Figura 4 - Desenho técnico do conjunto cabo-manga*



*Figura 5 – Pormenor do terminal do cabo*

Uma especificação do produto é o alongamento máximo que o cabo pode ter durante o seu funcionamento, onde não pode ultrapassar 0,5 mm, uma vez que isso impede o correto funcionamento do sistema de acionamento.

Por ser comprado externamente, este conjunto tem uma grande desvantagem para a empresa, que é o custo. Cada conjunto tem um custo individual de cerca de 0,5 € , e é este custo que dita o preço do sistema de acionamento por cabos.

A OLI já efetuou alguns ensaios para substituir o conjunto cabo-manga por alternativas economicamente mais viáveis. Por exemplo, analisou-se a substituição do cabo de aço por um monofilamento plástico em PET, mas, nesses ensaios verificou-se que o conjunto não correspondia às exigências da norma referida anteriormente.

### 1.3 **Objetivos gerais da dissertação**

Os monofilamentos poliméricos surgem como uma alternativa interessante em termos tecnológicos e de custo ao sistema *Atlas Cabos* com cabo metálico.

Com este projeto, são estudadas diferentes soluções que possam servir como alternativa à solução atual do conjunto cabo-manga, com o intuito imperativo de diminuição do custo do conjunto e em conformidade com a norma (CSTB 2013). Também, e de forma a garantir a conformidade com a norma referida, é realizado um estudo tribológico do comportamento dos monofilamentos poliméricos neste tipo de aplicação.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Aplicações do tipo cabo-manga

Os cabos de aço inoxidável multifilamentares são os mais utilizados neste tipo de conjunto cabo-manga, devido às suas propriedades de resistência mecânica e de flexibilidade, importantes na aplicação final. Contudo, o seu preço é normalmente bastante elevado, o que justifica a procura de uma alternativa. Os cabos monofilamentares poliméricos são uma alternativa aos cabos de aço, interessante para a empresa, que deverá ser validada com um estudo do comportamento tribológico do sistema.

Apesar da sua simplicidade, os mecanismos que utilizam o conjunto cabo-manga para a transmissão de força são bastante utilizados, quando se pretende que uma força aplicada numa extremidade do cabo chegue à outra extremidade, sem perda significativa dessa mesma força (Phee et al. 2010). Além disso, este tipo de solução permite simplificar os mecanismos, sem perda da sua eficácia. Este tipo de conjunto, por exemplo, é usado na abertura das portas pelo interior dos automóveis ou nos sistemas de travagem das bicicletas. Porém, a área que se destaca no estudo e aplicação deste tipo de solução é a da cirurgia assistida por *robots*.

É na cirurgia minimamente invasiva que se utilizam mais este tipo de conjuntos, uma vez que permite uma redução do trauma e do tempo de recuperação por parte do paciente, assim como melhora o aspeto estético do mesmo após a cirurgia (Do et al. 2013).



Figura 6 - Distinção entre cirurgia invasiva e cirurgia minimamente invasiva (Phee et al. 2010)

### 2.1.1 Prós e contras dos conjuntos cabo-manga

Com a técnica de cirurgia minimamente invasiva, o controlo é feito remotamente, seguindo o movimento e ação dos instrumentos no interior dos pacientes através de cateteres, em que a flexibilidade se deve à atuação dos conjuntos cabo-manga (Do et al. 2014). Vários autores definem como principais vantagens deste tipo de aplicação:

- Redução do tamanho e complexidade do sistema de transmissão da força, uma vez que não é necessário recorrer a sistemas de engrenagens (Do et al. 2013; Palli and Melchiorri 2006b);
- Forma simples e ágil de transmissão do movimento (Agrawal and Peine 2010; Yao et al. 2010);
- Baixo peso (Yao et al. 2010);
- Flexibilidade do conjunto cabo-manga em se adaptar a diferentes comprimentos e curvaturas, que vão desde o ponto de aplicação da força até à zona onde as ferramentas vão atuar (Agrawal and Peine 2010);
- Aumento da fiabilidade do sistema, uma vez que se garante a transmissão do movimento (Agrawal et al. 2010; Palli and Melchiorri 2006a);
- Redução do custo, devido à sua simplicidade (Palli and Melchiorri 2006a).

Não obstante, estes autores também mencionam desvantagens neste tipo de solução, que tendem a diminuir a eficácia do sistema. Esta perda pode ser descrita como um sistema em cadeia que vai desencadeando novos efeitos no conjunto:



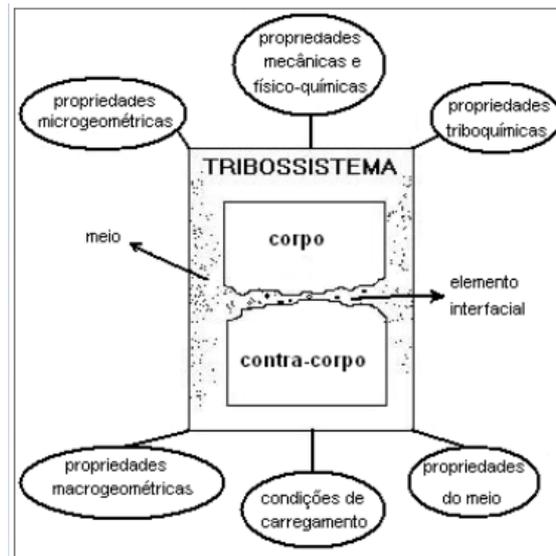
1. Movimento do cabo na manga;
2. Comportamento não linear do atrito;
3. Significante perda de tensão ao longo do cabo;
4. Perda de transmissão do movimento;
5. Redução da eficácia do sistema.

*Figura 7 - Cronologia de efeitos nos conjuntos cabo-manga*

Além destas desvantagens, nas aplicações de cirurgia assistida, a força de atrito depende diretamente da pré-tensão no cabo e dos diferentes raios de curvatura a que o conjunto fica sujeito (Agrawal 2011; Palli and Melchiorri 2006a). É necessário que exista uma pré-tensão no cabo, de forma a impedir que este fique solto no interior da manga, mas, se esta pré-tensão não for controlada, o coeficiente de atrito aumenta (Agrawal 2011). É expectável que o raio de curvatura do conjunto também deva ser tido em conta, uma vez que, quanto mais pequeno, maior será a área de contacto entre o cabo e a manga, o que poderá determinar um aumento do desgaste do conjunto e, simultaneamente, a perda de eficácia. Assim, torna-se essencial entender o comportamento tribológico do conjunto, para uma maior eficácia na resolução do problema proposto.

## 2.2 **Aspetos tribológicos**

A tribologia foi relatada pela primeira vez em 1966 por *Jost*, sendo uma palavra que deriva do grego, que significa fricção. Hoje a Tribologia considera-se como estudando o atrito, o desgaste e a ciência da lubrificação, sendo que a definição mais utilizada a define como a ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo (Radi 2007). Para explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos e a interação entre superfícies, que pode ser de caracterização extremamente complexa, exige-se o conhecimento de várias áreas científicas, entre as quais a física, química, ciência dos materiais, engenharia, mecânica computacional, entre outras (Bhushan 2011). Diferentes autores olham para a avaliação dos tribossistemas de diferentes formas (Group 2006; Silva 2003; Radi 2007), mas todos consideram que a interação nesses sistemas depende, não só das propriedades intrínsecas dos materiais, como também do meio envolvente (Silva 2003) (Figura8).



*Figura 8 - Componentes de um tribossistema (Silva 2003)*

Em qualquer projeto que envolva a caracterização e o estudo de movimentos mecânicos, conseguir numa primeira fase olhar para o sistema em questão, e detalhar todos os parâmetros do modelo como, por exemplo, o meio ambiente, as propriedades dos materiais e os próprios parâmetros de contacto e dinâmicos, permitem que, numa fase posterior, seja implementada uma ação sobre o problema, de forma a resolvê-lo mais rápida e eficazmente (Group 2006).

Os materiais plásticos são usados atualmente, e com sucesso, em aplicações que envolvem tribossistemas complexos (Zhang 1998). A força de atrito permanece constante para cargas normais entre 10-100 N, para materiais como PTFE, PMMA, PVC, PE e PA (Myshkin et al. 2005).

Além de serem materiais intrinsecamente auto-lubrificantes, ou seja, que dispensam a lubrificação, conseguindo manter a estabilidade dimensional durante o serviço, permitem ainda garantir uma excelente relação desempenho/custo.

### 2.2.1 Atrito seco

A força de atrito é a força tangencial da reação entre duas superfícies em contacto. Na ausência de lubrificantes, este atrito designa-se por atrito seco. Fisicamente esta força resulta de vários mecanismos que dependem de (Olsson et al. 1998):

- Geometria e topologia do contacto;
- Propriedades das superfícies dos corpos em contacto;

- Deslocamento;
- Velocidade relativa entre os corpos;
- Presença/ausência de lubrificantes.

A força de atrito surge em todos os sistemas mecânicos, quando um corpo sólido se move tangencialmente sobre outro. Vários autores definem-na como a resistência ao movimento durante o deslizamento linear ou em rotação.

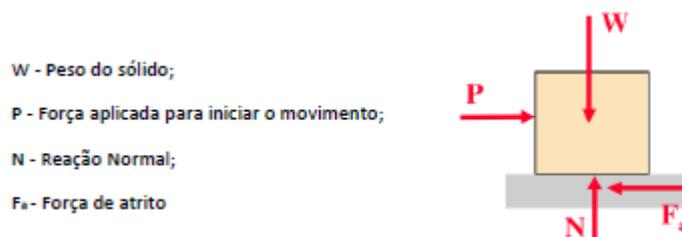


Figura 9 – Diagrama de forças de um corpo em repouso sobre uma superfície

Em algumas aplicações automóveis, como os travões ou a embraiagem, o atrito é maximizado, de forma a ter uma boa resposta por parte do sistema. Porém, noutros casos pretende-se minimizar, uma vez que o atrito pode ser responsável pela perda de energia e pelo desgaste das superfícies em contacto (Wang and Chai 2009).

Tipicamente distinguem-se dois tipos de atrito: o *atrito estático*, em que se considera a força a vencer para se iniciar o movimento do corpo, e o *atrito dinâmico*, que se define como a força necessária para se manter o movimento. Alguns autores estudaram a evolução das forças tangenciais e verificaram que variam com o tempo e o deslocamento, sendo o atrito estático sempre superior ao atrito dinâmico (Bhushan 2011).

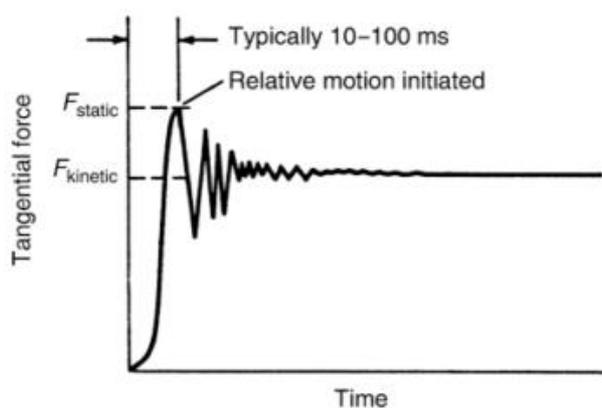


Figura 10 -Força tangencial em função do tempo;  $F_{static}$  - atrito estático;  $F_{kinetic}$  – atrito cinético (Bhushan 2011)

Uma vez que o atrito resulta da interação complexa entre regiões próximas da superfície dos materiais, assim como das substâncias que possam existir no ambiente circundante, para além de variar com o tempo (Wang and Chai 2009), o atrito tem um comportamento não-linear, e por isso torna-se complexa a sua caracterização. Assim, e dado que já foi verificado experimentalmente que o atrito depende da velocidade e da direção do movimento de forma não linear (Suraneni et al. 2005), não parece possível implementar uma fórmula matemática para modelar universalmente o comportamento do atrito (Johannes and Marie 1996).

A não linearidade do atrito deve-se a fatores que alteram o seu comportamento:

- Alteração do meio ambiente;
- Alteração da carga;
- Velocidade relativa entre os corpos;
- Temperatura;
- Humidade.

O efeito destes fatores também depende das características das superfícies em contacto. Independentemente disso, existem dois efeitos inevitáveis como a redução do número de ciclos do sistema e perda de eficácia do mesmo (Olsson et al. 1998).

A força de atrito não é uma propriedade do material, mas uma resposta do sistema (Bhushan 2011), originando outros efeitos como o desgaste que resulta da perda progressiva de material das superfícies em contacto. Esta consequência do movimento relativo entre os corpos poderá ser minimizada, mas é impossível que não ocorra quando existe movimento relativo entre dois corpos (Ramalho and Miranda 2006).

### 2.2.2 Desgaste

O desgaste é uma consequência da existência de forças de atrito entre superfícies. Este envolve uma complexa interdependência de vários processos incluindo interações químicas e mecânicas, havendo sempre influência de parâmetros físicos (Ramalho and Miranda 2006).

A definição de desgaste engloba quatro tipos de processos (Henrique and Paulo 2003) (Rymuza 2007):

- *Fadiga* – quando o desgaste resulta do elevado número de repetições do movimento;
- *Adesão* – quando existe uma ligação química entre superfícies, suficientemente forte para resistir ao deslizamento, sendo que o resultado é uma deformação plástica na zona de contacto;
- *Abrasão* – quando ocorre remoção do material da superfície, que depende da dureza dos materiais;
- *Corrosão* – que ocorre no contacto com meios líquidos ou gasosos que têm reações oxidativas com as superfícies.

No que toca especificamente ao desgaste dos polímeros, quando estes deslizam sobre outros materiais com módulo de elasticidade superior, o desgaste é determinado pelas propriedades do material polimérico, não sendo de excluir a influência das características da superfície (mecânicas, térmicas e físico-químicas) (Henrique and Paulo 2003). Neste tipo de contacto vão surgir como efeitos: a adesão e a deformação, efeitos estes provocados pelo contacto entre superfícies. Enquanto as ligações químicas são responsáveis pela adesão das superfícies, o mecanismo de deformação envolve dissipação de energia próximo da área de contacto, o que provoca deformações plásticas nesta zona aumentando o coeficiente de atrito entre superfícies (Zhang 1998). Este efeito está também relacionado com a dependência do coeficiente de atrito em relação à rugosidade, ver Figura 11, onde até ao valor ótimo de coeficiente de atrito se verifica adesão e acima deste, deformação (Pouzada *et al.* 2006).

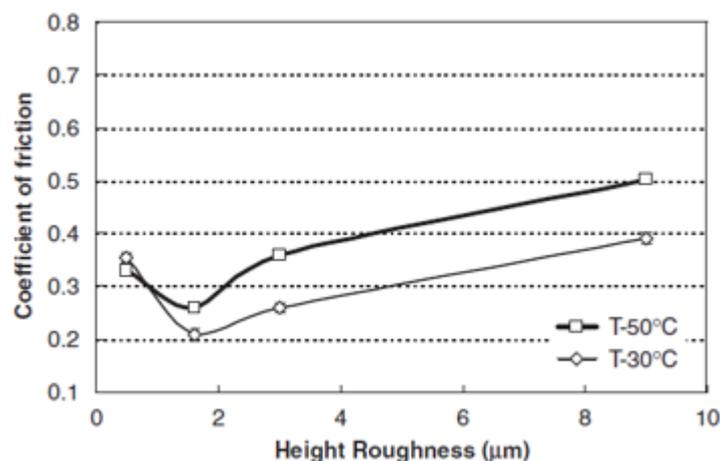


Figura 11 – Variação do coeficiente de atrito com a rugosidade no caso do HDPE (HE 7013 Borealis) (Pouzada *et al.* 2006)

Principalmente nos contactos polímero-polímero, a utilização do conceito de adesão, assume um papel predominante, no que diz respeito ao coeficiente de atrito e por consequência ao desgaste da superfície, devido à afinidade química entre eles. Contudo quando a rugosidade superficial começa a ter alguma importância, esta impõe-se perante a afinidade química e a deformação passa a dominar o desgaste do sistema (Pouzada *et al.* 2006). Exemplo disso foi verificado em estudos relativos ao comportamento da extração de peças dos moldes, em aço comum e em moldes obtidos por estereolitografia. Verificou-se que, nos moldes de aço, durante a extração, a força de atrito se devia essencialmente à rugosidade da superfície, enquanto nos moldes obtidos por estereolitografia, ou seja com contacto polímero-polímero, principalmente a altas temperaturas, é a adesão química que assume mais importância (Gonçalves *et al.* 2007).

A tendência para a substituição dos materiais comuns em aplicações com tribossistemas complexos, por materiais poliméricos continua a merecer atenção, sobretudo devido às suas características em atrito seco, uma vez que não necessitam de lubrificação (Myshkin *et al.* 2005). Fatores como a velocidade de deslizamento, carga normal e temperatura de contacto influenciam consideravelmente o desempenho dos polímeros nos tribossistemas. Ainda assim consoante o tipo de polímeros e o tipo de contacto que exista entre eles, a resposta em termos de atrito e desgaste serão diferentes, mas não existe uma relação consistente entre estas duas situações (Figura 12).

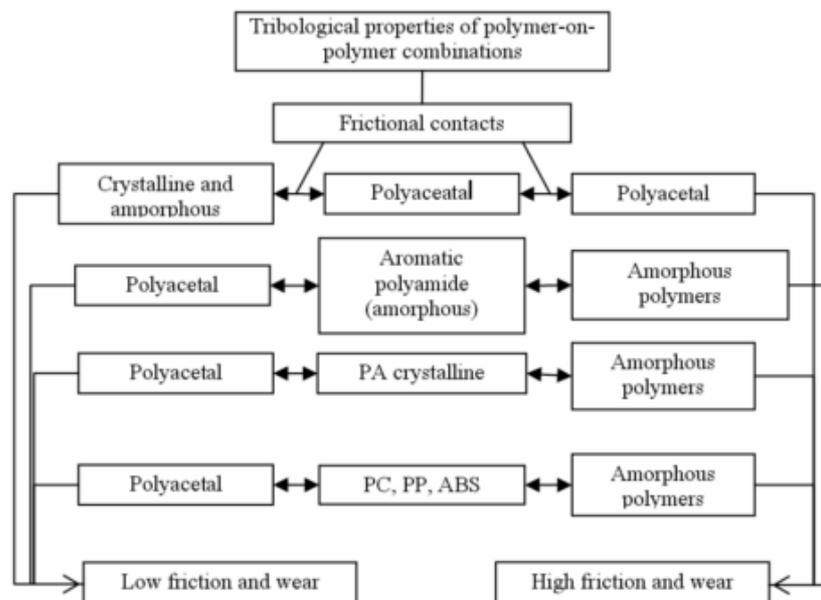


Figura 12 - Propriedades tribológicas de contacto polímero-polímero em micro rolamentos (Rymuza 2007)

### 2.3 Modelação do comportamento tribológico de conjuntos cabo-manga

Na área da cirurgia minimamente invasiva têm-se realizado estudos intensivos para prever o comportamento do conjunto cabo-manga, e desenvolver modelos matemáticos com o intuito da sua previsão.

Palli e Melchiorri fizeram a caracterização do comportamento de um conjunto cabo-manga em aplicações cirúrgicas, através de um modelo de estática simples (Palli and Melchiorri 2006a). No modelo desenvolvido estes autores utilizaram um modelo simples, que permite ter em consideração as não-linearidades do conjunto e a dependência do seu comportamento com a direção. Esse mesmo modelo permitiu-lhe considerar ainda perturbações do meio envolvente ao conjunto e considerar a distribuição de tensão no cabo. O modelo desenvolvido é ajustável, sendo que se consegue descrever a partir da Lei de Coulomb, no caso estático, já no caso de movimento do cabo a modelação considera o modelo de atrito dinâmico de Dahl, em que a força de atrito varia no intervalo de valores da força de atrito, segundo a Lei de Coulomb (Figura 13).

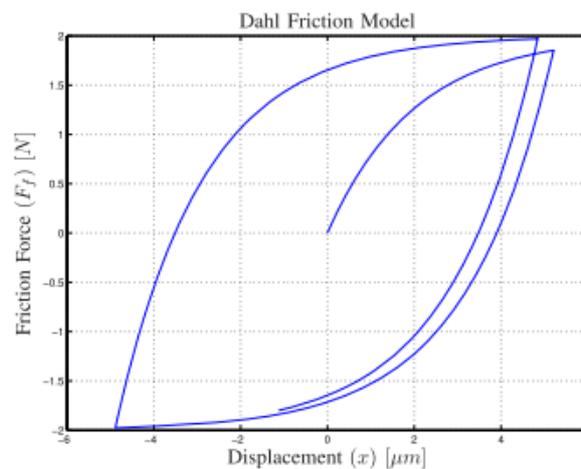


Figura 13 – Modelo de Dahl (Palli and Melchiorri 2006a)

Assim, através do seu modelo consegue-se prever a força na extremidade oposta aquela onde a força é aplicada, apesar das perturbações do meio envolvente e considerando que não há limite de ciclos, através do seguinte sistema de equações:

$$T(x) = \begin{cases} T_{in} e^{\left(-\frac{\mu}{R} x \operatorname{sing}(\epsilon)\right)} & \text{se } x < L_1 \\ T_0 & \text{se } x \geq L_1 \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

Por sua vez, Phee e os seus colaboradores apresentam um estudo analítico que em comparação com um projeto experimental, apresenta um erro de 7% (Phee *et al.* 2010). Neste modelo, os autores consideram o atrito dinâmico constante enquanto existe movimento do cabo na manga. Eles consideram ainda variações do raio de curvatura do conjunto ao longo do comprimento, ao contrário do que acontecia no modelo anterior (Figura 14).

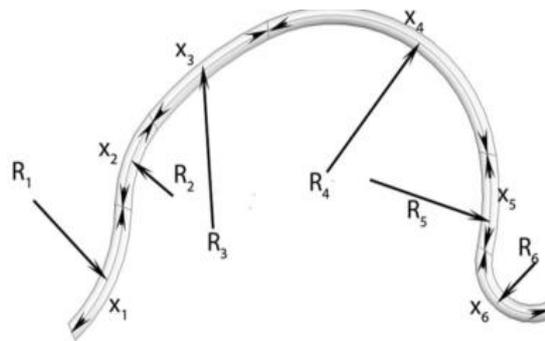


Figura 14 - Modelo considerando a variação do raio de curvatura

$$T(x) = T_{in} e^{-K} \quad (\text{Eq. 2})$$

sendo

$$K = \mu \left( \frac{x_1}{R_1} + \frac{x_2 - x_1}{R_2} + \dots + \frac{x_n - x_{n-1}}{R_n} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Neste caso,  $K$  representa o atrito efetivo entre o cabo e a manga. Uma particularidade deste modelo em relação ao anterior é que os autores desprezam uma pré-tensão no cabo e além disso assumem uma distribuição uniforme da força no interior da manga.

Para um raio de curvatura constante ao longo do seu comprimento, a Eq. 2 toma a forma

$$T(x) = T_{in} e^{-\frac{\mu}{R}x} \quad (\text{Eq. 4})$$

Já outros autores desenvolveram um modelo rigoroso de parâmetros que caracterizam o conjunto cabo-manga, para qualquer raio de curvatura e pré-tensão (Agrawal *et al.* 2010). Este modelo é constituído por um conjunto de equações diferenciais parciais, sendo que é capaz de discretizar o movimento do cabo e a transmissão da força. No seu modelo consideram, que o atrito entre o cabo e a manga depende da pré-tensão, que por sua vez depende do passado das forças a que o conjunto

esteve sujeito. Para estes, considerar o raio de curvatura do conjunto constante, é um erro, uma vez que limita muito o modelo.

Agrawal *et al.* adaptaram o modelo desenvolvido, tendo por base o mesmo sistema de equações que se adapta a três casos:

- todo o cabo se move (Eq. 5);
- todo o cabo está em estado estacionário;
- parte do cabo se move e o restante está estacionário.

$$T(x, t) = T(x_i, t) \exp \left[ \frac{\mu(x-x_i)}{R(x_i)} \sin(u(x_i, t)) \right] \quad (\text{Eq.5})$$

Na validação do modelo os autores concluíram que o atrito varia exponencialmente com o raio de curvatura, sendo que quanto menor for o raio, maior o ângulo de abraçamento do cabo na manga e, por isso, maior a força de atrito. Por sua vez o raio, de um ângulo de abraçamento de 360°, deixa de ter influência com a variação do mesmo.

## 2.4 Objetivos detalhados

Neste contexto, durante o projeto serão desenvolvidas atividades no sentido de atingir os seguintes objetivos:

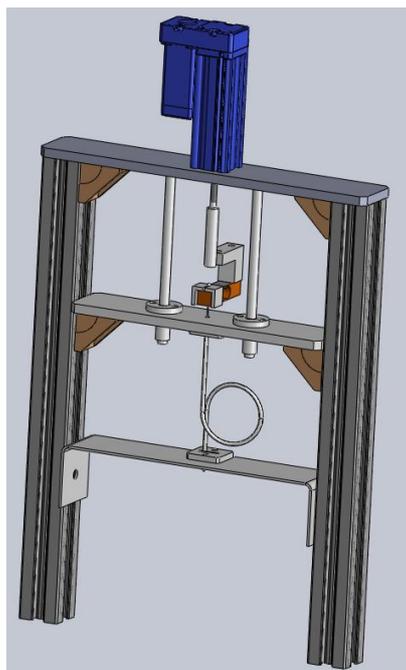
- Procurar um monofilamento termoplástico, que substitua o cabo de aço;
- Testar as diferentes alternativas na aplicação real;
- Projetar e desenvolver um dispositivo para o ensaio acelerado das possíveis soluções cabo-manga. Este desenvolvimento implica o desenho do dispositivo, especificação do sistema de aquisição de dados (força), e o acompanhamento da sua construção;
- Analisar o comportamento tribológico das soluções com manga em HDPE, estudando o efeito do material do cabo, raio de curvatura e folga entre o diâmetro do cabo e o diâmetro interno da manga;
- Desenvolvimento do equipamento protótipo de ensaio de conjuntos cabo-manga

## 2.5 Conceito do equipamento protótipo

Foi definido um conceito de equipamento, a seguir, designado por EP. Os principais passos no desenvolvimento do mesmo são apresentados em seguida na Tabela 1.

*Tabela 1 - Passos para o desenvolvimento do conceito*

<b>Passo para desenvolvimento do conceito</b>	<b>Descrição</b>
1. Identificação do EP	Equipamento de ensaio conjunto cabo-manga.
2. Identificação da função do EP	Avaliar a variação da força de atrito ao longo do tempo, para diferentes conjuntos de cabos e mangas.
3. Identificação dos principais elementos do EP e as suas funções	<p><u>Painel elétrico</u>: fornecer energia elétrica ao sistema;</p> <p><u>Atuador</u>: transformar a energia elétrica em energia mecânica;</p> <p><u>Estrutura</u>: suporte dos elementos;</p> <p><u>Travessa horizontal</u>: permitir a definição de diferentes ângulos de curvatura dos conjuntos;</p> <p><u>Batentes</u>: Impedir o movimento da manga;</p> <p><u>Carga</u>: peso imposto ao conjunto, que este terá de deslocar;</p> <p><u>Célula de carga</u>: Leitura dos dados de ensaio;</p> <p><u>Software</u>: registo dos dados do ensaio, e alteração de alguns parâmetros como a velocidade.</p>



*Figura 15 - Conceito do equipamento protótipo a desenvolver*

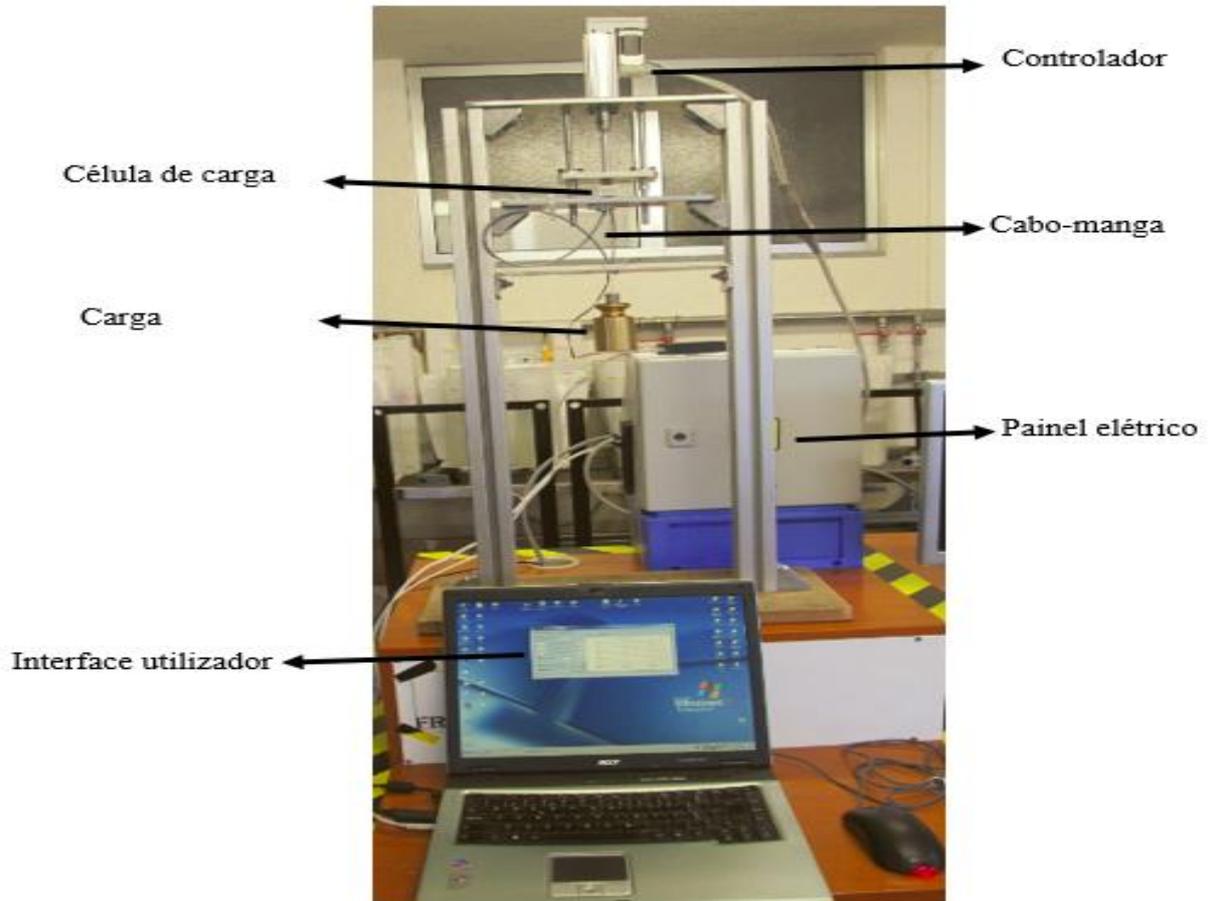
## 2.6 Especificações

Com o conceito do EP, apresentado anteriormente, pretende-se que este corresponda ao seguinte conjunto de especificações:

- Permitir o teste de diferentes materiais, tanto de cabos como de mangas, assim como de vários diâmetros dos componentes do conjunto;
- Possibilitar a variação do raio de curvatura do conjunto cabo-manga, entre 0 e 360°;
- Testar diferentes cargas, entre 10-30 N;
- Deslocar o cabo no interior da manga, garantindo que esta fica fixa;
- O deslocamento do cabo no interior da manga deverá ser no máximo 30 mm;
- Registrar a variação da carga em cada ciclo, pelo menos nas posições de repouso, ou seja na posição 0 e na posição máxima definida;
- Ajustável em termos de velocidade, entre 5 a 10 ciclos por minuto;
- Contar o número de ciclos.

## 2.7 Projeto mecânico

Com base nas especificações definidas e no conceito do equipamento, a empresa ATENA – Automação Industrial, apresentou o seguinte equipamento (Figura 16), sendo que o desenho técnico do equipamento se encontra no anexo A, assim como alguns pormenores do equipamento.



*Figura 16 - Solução final do equipamento de ensaio do conjunto cabo-manga*

### 3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Materiais

Durante o projeto foram contactadas várias empresas com o intuito de proceder à recolha de amostras de mono e multifilamentos poliméricos. Entre as principais características destes cabos para ensaio procura-se sobretudo:

- Mono e multifilamentos poliméricos, com um diâmetro nunca inferior a 0,5 mm e não superior a 1,5 mm;
- Excelente resistência à fadiga;
- Alguma flexibilidade de forma a poder adaptar-se aos vários ângulos de curvatura.

##### 3.1.1 Materiais para cabos

Os materiais recolhidos para ensaio encontram-se listados em seguida na tabela 2.

Tabela 2 – Características dos cabos monofilamentares e multifilamentares

Fornecedor	Características		
	Material	Diâmetro (mm)	Módulo de Young (GPa)
PerlonNextrusion	PPS	0,7	4,2
		0,8	4,2
	PET	1,1	2,5
Zeus Inc.	PEEK	0,7	3,8
Filkemp	PET	0,8	2,5
G. Krahmer GmbH	PVDF	0,5	2
Marlow Ropes	PBO*	1	-
	UHMWPE*	0,9	70-100
Dr. KarlWetekam	PA6	0,8	0,5
		1	
		1,2	
Zyex Inc.	PEEK	0,5	3,8
		0,8	3,8
		1	3,8
Lankhorst Euronete	TECHNORA*	0,5	73-80
	UHMWPE*	0,5	48-54

(\* - Cabos multifilamentares)

### 3.1.2 Materiais para mangas

Tal como aconteceu anteriormente, foi efetuada uma pesquisa para encontrar no mercado soluções uma manga alternativa à do conjunto atual. Dentro das principais características da manga procura-se que esta possua, algum tipo de lubrificante interno que permita diminuir a força de atrito. Os materiais recolhidos para ensaios encontram-se listados em seguida na Tabela 3.

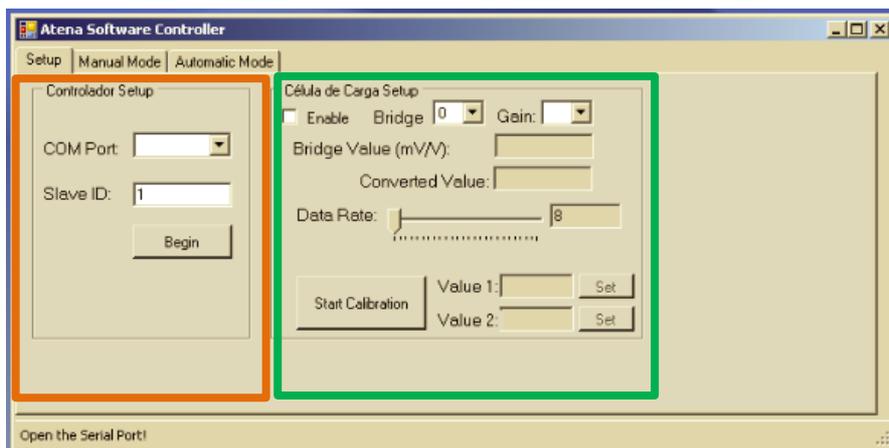
*Tabela 3 - Amostras de mangas recolhidas*

Amostras de mangas		
Fornecedor	Material	Diâmetro interno
Leirivedantes	HDPE	1,6
		2,3
	PPH	1,6
Zeus Inc.	PTFE	1,6

### 3.2 Ensaios no equipamento protótipo EP

Na realização do ensaio de um conjunto cabo-manga são efetuados os seguintes passos:

- Ligação do painel elétrico e abertura do *software*;



*Figura 17 - Interface do software*

- Ligação do controlador à porta correspondente do computador (caixa laranja, Figura 17);
- Calibração da célula de carga (na interface do software, caixa verde, calibra-se para um peso de 0 kg e um peso de 1 kg com um filamento perfeitamente esticado, sem manga);

- Colocar o conjunto cabo-manga na máquina;
- Ajustar o raio de curvatura da manga;
- Ajustar o cilindro elétrico à posição de origem;

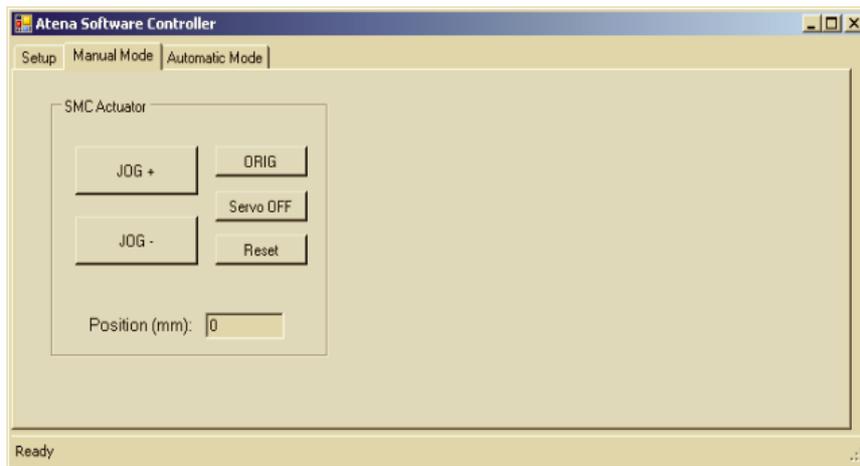


Figura 18 - Interface do software para ajustar o cilindro à posição

- Realizar uns ensaios iniciais à velocidade e à posição, evitando perturbações que afetem os resultados. Durante os ensaios a posição 30 será sempre a posição de início do ensaio, e mais baixa em termos de altura, enquanto a posição 0 será mais alta;
- Início do teste (Figura 19);
- Tratamento dos dados obtidos.

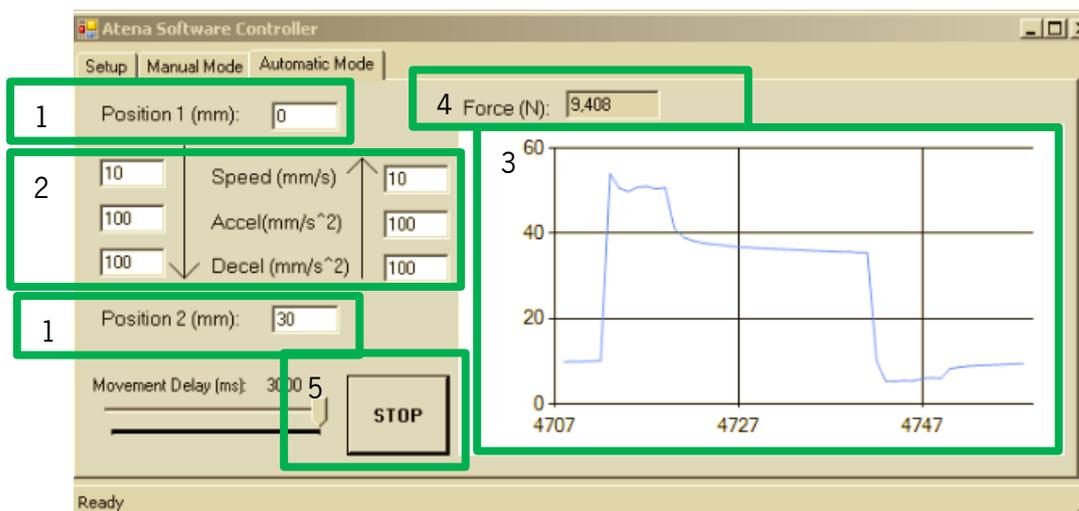


Figura 19 - Interface do software durante o ensaio (1-Ajuste da posição inicial e final; 2-Ajuste da velocidade do ensaio; 3-Interface gráfica com o utilizador a cada instante; 4-Valor da força lida pela célula de carga a cada instante; 5-Botão Start/Stop)

### 3.3 Procedimento experimental em testes de vida

O Laboratório de Testes de Vida consiste numa série de bancadas de ensaio, que permite testar todos os produtos-protótipos desenvolvidos pela empresa, de forma a perceber se estes estão preparados para cumprir com as exigentes normas. Estas bancadas permitem a atuação dos mecanismos e controlam a força necessária para ativar os mesmos ao longo de 200 000 ciclos, valor típico definido em norma, que corresponde ao número de descargas que uma família de 4 pessoas (duas crianças e dois adultos) realiza durante 10 anos. Além disso este laboratório permite o ensaio com diferentes tipos de água, entre as quais água do mar e água calcária (Figura 20).



*Figura 20 – Bancada de ensaio do laboratório*

No que toca aos ensaios de protótipos nem sempre estes correspondem à solução final. Por exemplo, na solução atual com o cabo de aço há duas esferas de latão que ajudam na ligação entre o sistema cabo-manga e o sistema de controlo e a alavanca. Contudo, esta solução é utilizada apenas para o produto final. Nos ensaios realizados durante o projeto utilizaram-se cerra-cabos para tornar mais fácil o encaixe nas peças. (Figura 21)



*Figura 21 - Encaixe no sistema de acionamento com cerra-cabos*

A utilização desta solução exigiu um procedimento experimental com as seguintes etapas:

- Furação de 5,4 mm da alavanca inferior e da roda dentada;
- Desbaste de 2 mm da caixa de suporte superior;
- Caso se utilize a manga em PTFE, a cobertura em HDPE exige um desbaste de 2 mm do afinador;
- Colocar o monofilamento no interior da manga e ajustar uma extremidade com um cerra-cabos;
- Na outra extremidade dar a cota de  $71,5 \pm 0,5$  mm e colocar o cerra-cabos;
- Fazer a montagem do conjunto, recorrendo aos procedimentos habituais e colocar em testes de vida.

Depois do conjunto ser colocado no tanque com uma coluna de água de 240 mm é necessário com o recurso a um dinamómetro, fazer medições regulares da força necessária para ativar o sistema de acionamento, para verificar se um dos parâmetros da norma (CSTB 2013) - a força no primeiro ciclo - não é superior a 20 N. A partir daqui, em intervalos não regulares devem ser feitas novas medições (no mínimo 3) e determinar o valor médio da força para ativar o sistema de acionamento.

De forma a otimizar o processo de registo de ensaios foi desenvolvida uma ficha de registo (Figura 22), onde todos os dados relativos aos ensaios nos testes de vida são registados.

**FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA**

**Características do protótipo:**

	Manga	Cabo
Matéria-prima	HDPE	PPS
Fornecedor	Leirivdantes	PerlonNextrusion
Diâmetro interno da manga (mm)	1,6	-
Diâmetro do cabo (mm)	-	0,7
Raio de curvatura do conjunto (mm)	300	

**Ambiente de ensaio:**

Temperatura da água (°)	28
Tipo de água	Salgada

**Resultados de ensaio:**

Força inicial (N)	15,5
Número de ciclos	5 000
Força final (N)	31,2

*Figura 22 - Ficha de registo de ensaio em testes de vida*

As fichas encontram-se divididas em três zonas fundamentais:

1. Características do protótipo – onde são registados os materiais que foram utilizados nesse protótipo, com o respetivo fornecedor e diâmetros característicos, assim como o raio de curvatura do conjunto;
2. Ambiente de ensaio – onde é registado a temperatura e o tipo de água, sendo que pode ser água canalizada, calcária ou do salgada;
3. Resultados de ensaio – são registados os valores mais importantes para o ensaio.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliação do desempenho do equipamento de ensaio conjunto cabo-manga

Conforme o conceito e as especificações definidas, a empresa ATENA-Automação Industrial, desenvolveu o equipamento cuja avaliação é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Avaliação do EP

Avaliação do EP	Descrição	
1. Descrição das características do EP	<p>Antes de se iniciar o ensaio é necessário proceder-se à calibração da célula de carga, sendo que basta a leitura de dois pesos.</p> <p>O ajuste da altura da travessa horizontal permite variar, o ângulo de curvatura do conjunto desde zero (conjunto na vertical), até um ângulo de 360°.</p> <p>O batente permite a colocação de mangas com diâmetros entre 1,6 e 2,9 mm sem ser necessário qualquer intervenção no equipamento.</p> <p>Através do software consegue-se ajustar o deslocamento do cabo no interior da manga, sendo que no mínimo terá de se deslocar 1 mm e no máximo 30 mm. O mesmo permite ainda a variação da velocidade do cabo no interior da manga permitindo variar entre 5 até 10 ciclos/minuto. Além disso o software lê e regista a carga nas posições máxima e mínima definidas, em cada ciclo.</p>	
2. Identificação da característica desejada a ser melhorada, ou da indesejada a ser reduzida ou eliminada	Identificação	Solução
	1. Altura da estrutura, não permite o deslocamento da carga; 2. Necessidade de calibração sempre que o sistema deixa de ter energia elétrica, ou por movimento dos fusíveis; 3. Não realiza a contagem do número de ciclos;	1. Aumentar a altura dos perfis verticais. 2. Imobilização do painel elétrico. 3. A contagem deve ser efetuada no tratamento de dados, com a contagem do número de leituras nas posições registadas.
3. Outras observações relevantes	Devido ao atraso na entrega do equipamento foi necessário adaptar o número de ciclos a ser avaliado em cada conjunto de forma a poder-se ter um número considerável e tempo suficiente para ensaiar os diversos conjuntos.	

## 4.2 Caracterização dos conjuntos cabo-manga

De forma a ter uma caracterização dos diferentes conjuntos possíveis e poder-se compará-los em termos de comportamento, foram definidos um conjunto de parâmetros relacionados com a máquina e o conjunto de forma a existir um termo de comparação entre as várias soluções. Em seguida, é apresentado um conjunto de parâmetros do EP, definidos para a realização dos ensaios:

*Tabela 5 - Parâmetros de ensaio*

<b>Parâmetros</b>	<b>Especificação</b>
Ângulo de curvatura	360°
Velocidade de ensaio	5 ciclos/min
Carga	1kg
Deslocamento do cabo no interior da manga	30 mm
Número de ciclos máximo	700

A carga de 1 kg, corresponde à força necessária para a válvula funcionar no ciclo inicial para uma coluna de água de 274 mm. Uma outra característica define, no caso dos conjuntos com cabo polimérico é que estes seriam testados com a manga em HDPE com um diâmetro interno de 1,6 mm da Leirivedantes, por se apresentar como a solução com menor custo. De entre os conjuntos que apresenta-se melhores resultados em termos de força de atrito, realizou-se um ensaio de *endurance*, para um número de ciclos 100 vezes superior.

### 4.2.1 Conjunto cabo-manga usado atualmente

No que diz respeito ao conjunto utilizado atualmente, com cabo de aço, verificou-se que assim que a manga é colocada, com um ângulo de curvatura de 360°, a carga lida pela célula de carga, diminui, cerca de 40%, em relação ao valor real, devido à força de atrito. Os resultados obtidos para este conjunto estão representados na Figura 23.

Os resultados permitem verificar que a diferença entre a carga real aplicada e a carga lida nas diferentes posições é maior quando a mesma se encontra na posição 0, definida como a posição mais alta. Além disso, estes permitem concluir que não existe variação da carga lida ao longo dos ciclos.

Assim, ao fim de 700 ciclos a carga lida permanece constante em ambas as posições, ou seja não há variação da força de atrito.

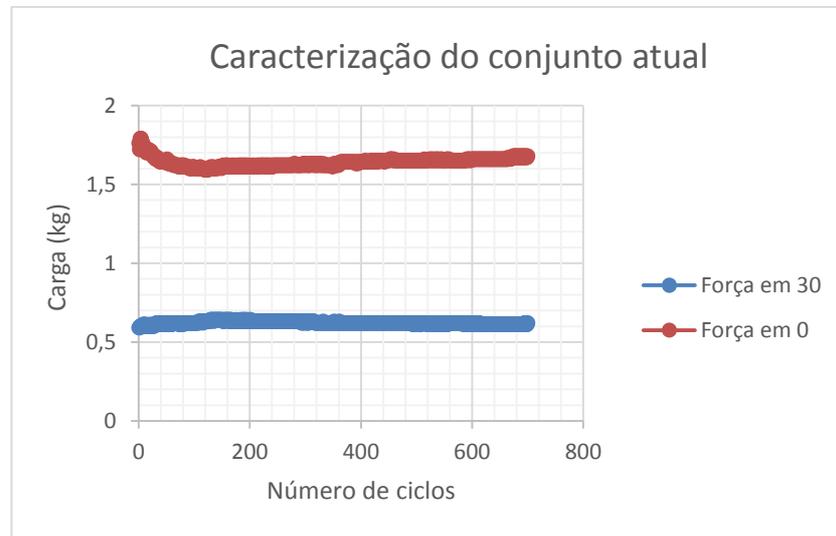


Figura 23 - Caracterização no EP do conjunto aço-HDPE usado atualmente

#### 4.2.2 Conjuntos cabo-manga, com cabo polimérico

Considerando os parâmetros referidos anteriormente, foram testados diversos cabos poliméricos. Tal como no caso anterior verificou-se que ao fim de 700 ciclos não se verifica variação da força de atrito nas duas posições com o aumento do número de ciclos, sendo que os gráficos obtidos para cada conjunto são apresentados no anexo B. Observando a força lida no final dos 700 ciclos de cada conjunto os resultados obtidos são apresentados em seguida na tabela 6.

Tabela 6 - Carga lida no final dos 700 ciclos nas posições definidas

Material Diâmetro (mm)	Carga na posição 30 (kg)	Carga na posição 0 (kg)
Aço 0,8	0,62	1,68
PA6 0,8	0,78	1,26
PA6 1	0,79	1,26
PA6 1,5	0,74	1,33
PEEK 0,5	0,81	1,23
PEEK 0,8	0,78	1,27
PEEK 1	0,81	1,26
PPS 0,7	0,79	1,27
PPS 0,8	0,62	1,55
UHMWPE 0,5	0,66	1,58

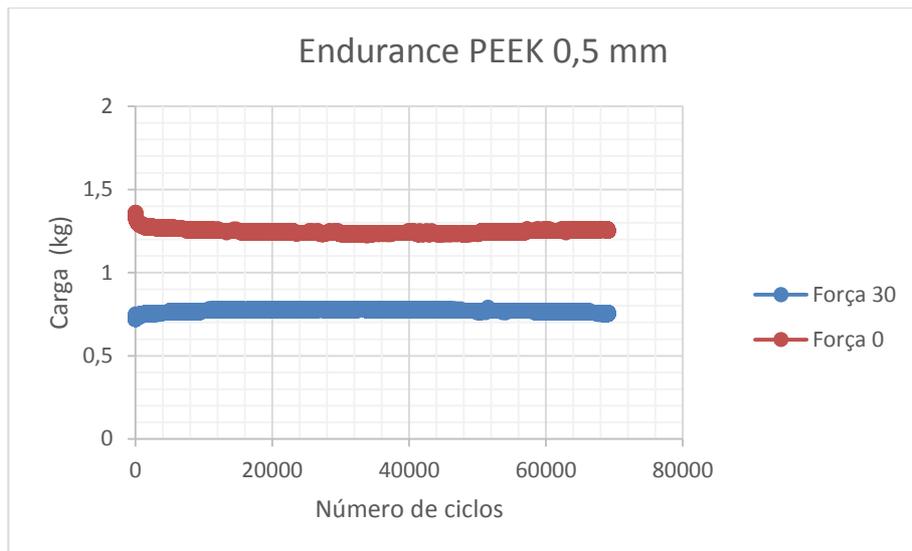
Através destes resultados pode-se verificar que é o próprio cabo de aço utilizado atualmente, que apresenta um maior valor de carga registada na posição 0, e um menor valor na posição 30, o que significa que é neste conjunto que se observa uma maior força de atrito entre o cabo e a manga. Poder-se-á dizer que tal acontece porque o conjunto não tem qualquer lubrificação (na aplicação real, a água poderá funcionar como lubrificante) e devido à rugosidade superficial do cabo. No caso dos monofilamentos poliméricos estes apresentam uma menor diferença entre a carga real e a carga lida, nas duas posições, pois ao contrário do que acontece com o cabo de aço, estes possuem um acabamento superficial liso, diminuindo a força de atrito entre o cabo e manga, por efeito da rugosidade.

Os resultados mostram ainda que quando aumenta o diâmetro dos monofilamentos, verifica-se um aumento da força de atrito, o que acontece em todos os materiais (PA6, PEEK e PPS), isto porque se diminui a folga entre o cabo e a manga e por isso, a força de atrito é maior.

Numa outra perspetiva poderá dizer-se que para um número de 700 ciclos é o monofilamento em PEEK com um diâmetro de 0,5 mm que apresenta os melhores resultados, pois é o conjunto que apresenta uma menor diferença entre a carga real e a carga lida em ambas as posições.

#### 4.2.3 *Endurance* do monofilamento em PEEK 0,5 mm

Visto que foi o conjunto com monofilamento em PEEK que apresentou os melhores resultados para 700 ciclos de carga, optou-se por fazer um ensaio para um número de ciclos 100 vezes superior, e analisar a variação da carga lida. Os resultados deste ensaio estão apresentados na Figura 24.

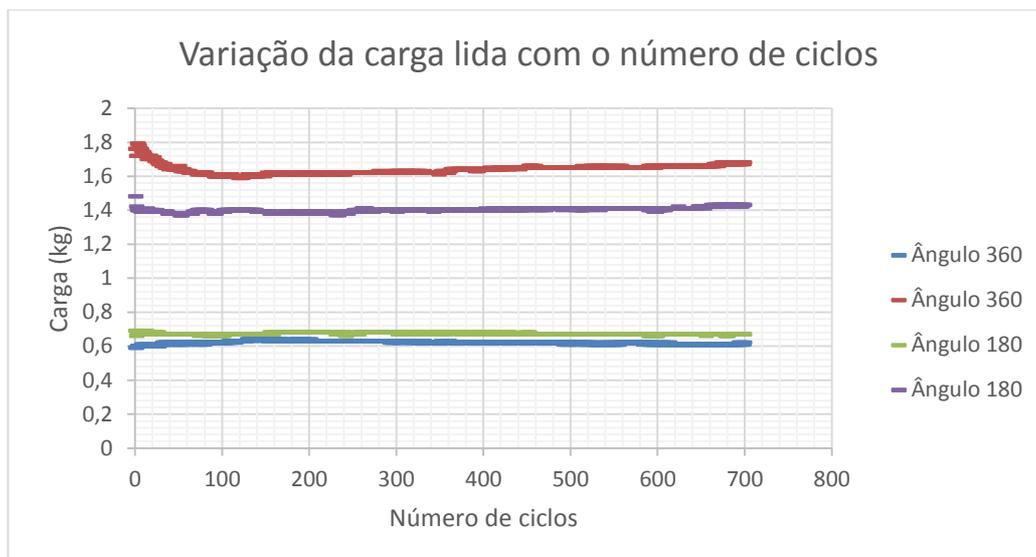


*Figura 24 - Ensaio de endurance ao monofilamento em PEEK 0,5 mm*

Os resultados mostram que ao final de 70 000 ciclos de ensaio a carga lida nas posições definidas permanece constante, sendo que se pode dizer que não há influência de outros aspetos tribológicos como por exemplo o desgaste.

#### 4.2.4 Influência do ângulo de curvatura

De forma a perceber a influência do ângulo de curvatura, foram realizados ensaios ao conjunto cabo-manga usado atualmente, com diferentes raios de curvatura, mantendo os restantes parâmetros de ensaio. Os resultados obtidos apresentam-se em seguida na figura 25.



*Figura 25 - Variação da carga lida em função do número de ciclos e para diferentes ângulos de curvatura*

Os resultados permitem verificar que, a carga lida para um ângulo de 360° é maior do que quando esse ângulo é reduzido para metade, sendo que a diferença é maior no caso da posição 30, considerada como posição inicial. Estes resultados permitem concluir que para além de não se verificar a variação dos valores da carga ao longo do número de ciclos, como já havido sido observado anteriormente, mostram que o ângulo de contacto tem influência direta nos valores uma vez que quando maior o ângulo de contacto, maior o valor da carga lida e, por isso, maior a força de atrito.

#### 4.2.5 Estudo do efeito do corte da manga

Com o objetivo de perceber o efeito da extensão do comprimento de contacto entre o cabo e a manga, executaram-se cortes transversais na manga com um espaçamento de 20 mm. Tendo em conta que foi o monofilamento polimérico em PEEK com diâmetro 0,5 mm que apresentou melhores resultados em termos de atrito, optou-se por testar este mesmo monofilamento. Os resultados ao fim de 700 ciclos estão apresentados na Figura 26.

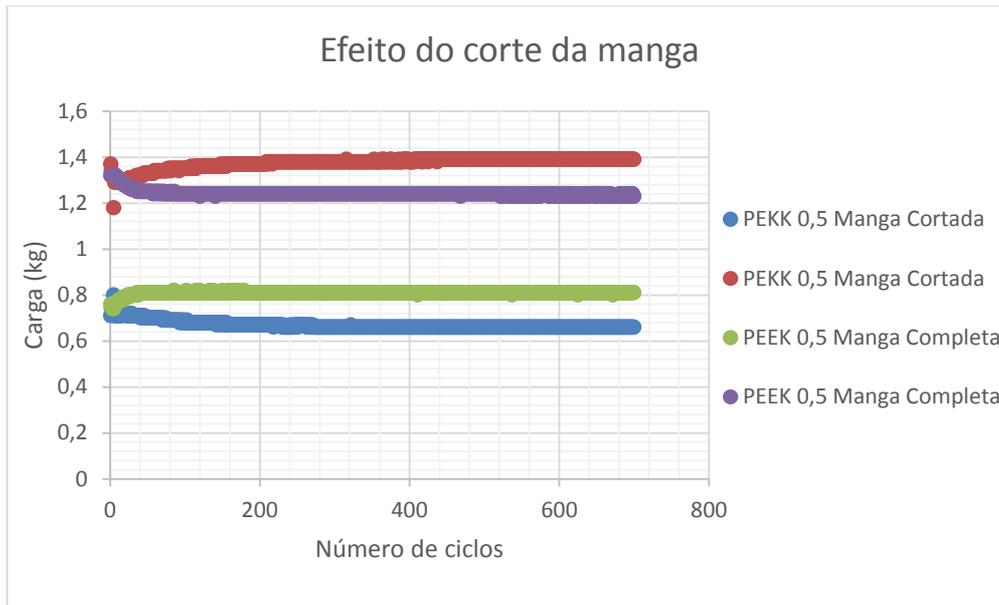


Figura 26 - Estudo do efeito do corte da manga

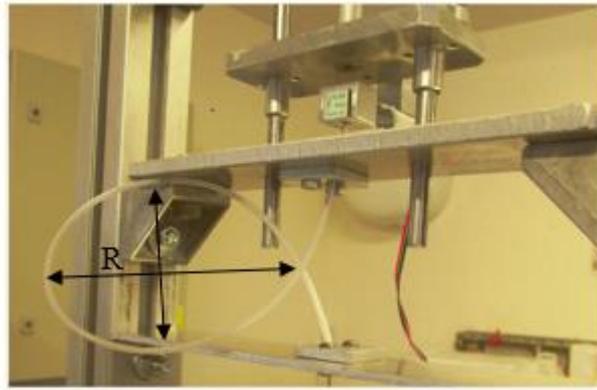
Pode-se concluir que é o conjunto com manga completa que apresenta maior diferença na carga lida em relação ao peso real. Tal fato permite perceber que os pontos de contacto com a manga segmentada são menos quando comparado com a manga completa, pelo que o efeito da força de atrito é menor. Além disso esta solução implementada na manga permite que o conjunto tenha uma maior flexibilidade em termos de adaptação às diferentes restrições impostas ao conjunto.

#### 4.2.6 Aproximação dos resultados a partir do modelo de Phee

Apesar de no seu estudo apresentado, os autores terem considerado que o raio de curvatura deveria variar ao longo do comprimento da manga, no caso dos conjuntos testados no EP, este permanece constante. Por isso optou-se por prever o coeficiente de atrito entre os diversos conjuntos tendo em conta o modelo de Phee para um raio de curvatura constante ao longo do seu comprimento, já apresentado na Eq. 4

$$T(x) = T_{in} e^{-\frac{\mu}{R}x} \quad (\text{Eq. 4})$$

Tendo em conta os valores obtidos para a carga lida nas duas posições ao fim de 700 ciclos de ensaio (Tabela 6), usando a Equação 4, calculou-se o coeficiente de atrito, considerando como força inicial, o valor correspondente à posição 30 e a força final o valor correspondente à posição 0.



*Figura 27 – Raio de curvatura considerado (75mm)*

Considerando o raio de curvatura (Figura 27) e o comprimento total da manga, como o comprimento do contacto entre cabo e manga. Além disso considerou-se a carga na posição 0, como a força final e a carga na posição 30 como a força final. Os resultados, para os diferentes materiais testados na manga em HDPE apresentam-se em seguida:

*Tabela 7 - Valor médio do coeficiente de atrito de diferentes materiais*

	Valor médio do coeficiente de atrito
Aço 0,8	0,15
PA6 0,8	0,04
PA6 1	0,04
PA6 1,5	0,05
PEEK 0,5	0,03
PEEK 0,8	0,04
PEEK 1	0,03
PPS 0,7	0,04
PPS 0,8	0,07
DYNEEMA 0,5	0,06

Os valores obtidos mostram, devido à perda da carga no ensaio, era expectável que os valores de coeficiente de atrito fossem em todos os casos mais elevados, uma vez que no caso dos monofilamentos plásticos, segundo os resultados da carga lida, não é fisicamente possível que o coeficiente de atrito seja tão próximo de zero. Contudo, verifica-se que o cabo de aço é o que apresenta maior coeficiente de atrito, o que se comprava pela maior diferença entre a carga lida e a carga real.

#### 4.2.7 Conjuntos com monofilamentos poliméricos

Depois de seguido o procedimento experimental referido anteriormente no ponto 4.3, todos os conjuntos foram ensaiados no Laboratório de Ensaio de Testes de Vida. Foram efetuados os registos das principais características, na ficha de ensaio desenvolvida, para cada conjunto, apresentadas no anexo C.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos, para os conjuntos ensaiados em mangas de HDPE com um diâmetro interno de 1,6 mm.

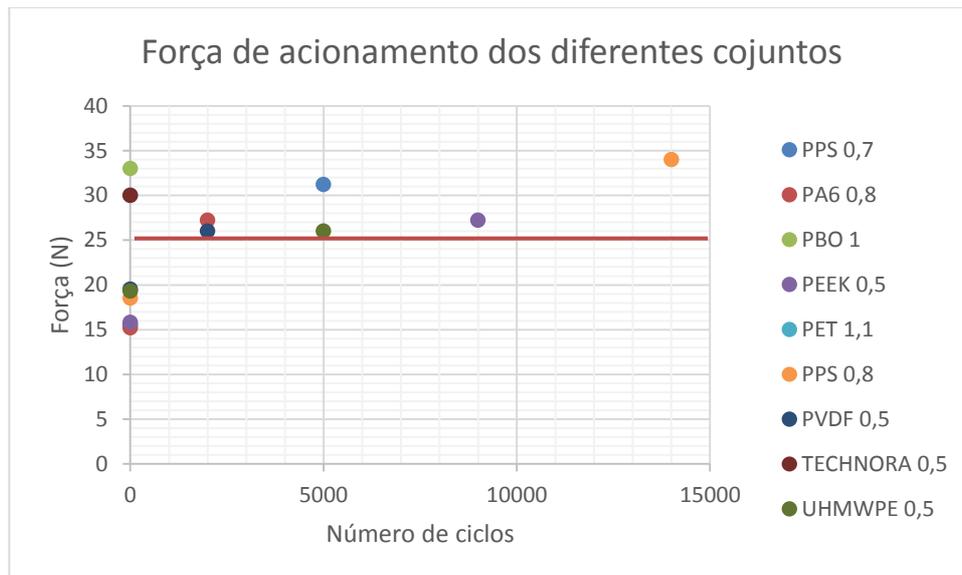


Figura 28 - Força de acionamento dos diferentes conjuntos

Os resultados permitem observar que o conjunto que se comportou melhor é constituído pelo monofilamento em PPS com um diâmetro 0,8 mm, que cumpriu os requisitos da norma até aos 14 000 ciclos. Ainda assim, em termos de número de ciclos este valor é muito baixo, uma vez que a norma CSTB 2013 exige que a força de acionamento se mantenha abaixo de 25 N, durante 200 000 ciclos.

Estes resultados mostram também que nenhum dos cabos multifilamentares testados se comportou satisfatoriamente, a maior parte destes (PBO, TECNHNORA) não cumprindo a norma CSTB 2013, logo no ciclo inicial. O multifilamento em UHMWPE foi o que apresentou melhores resultados, mas mesmo assim cumpriu apenas 5000 ciclos, com a força de acionamento abaixo da norma.

#### 4.2.8 Monofilamentos poliméricos com manga segmentada

Devido aos resultados obtidos nos ensaios realizados no equipamento EP, optou-se por testar no Laboratório de Testes de Vida, o conjunto com melhores resultados, ou seja a manga segmentada com monofilamento de PEEK com 0,5 mm. Recorde-se que com a manga completa o conjunto com este monofilamento, não conseguiu atingir os 10 000 ciclos.

De forma a perceber-se o efeito do corte da manga, optou-se por segmentar uma manga com um espaçamento de 20 mm entre cada corte, e outra com um espaçamento de 50 mm. Os resultados obtidos são apresentados em seguida:

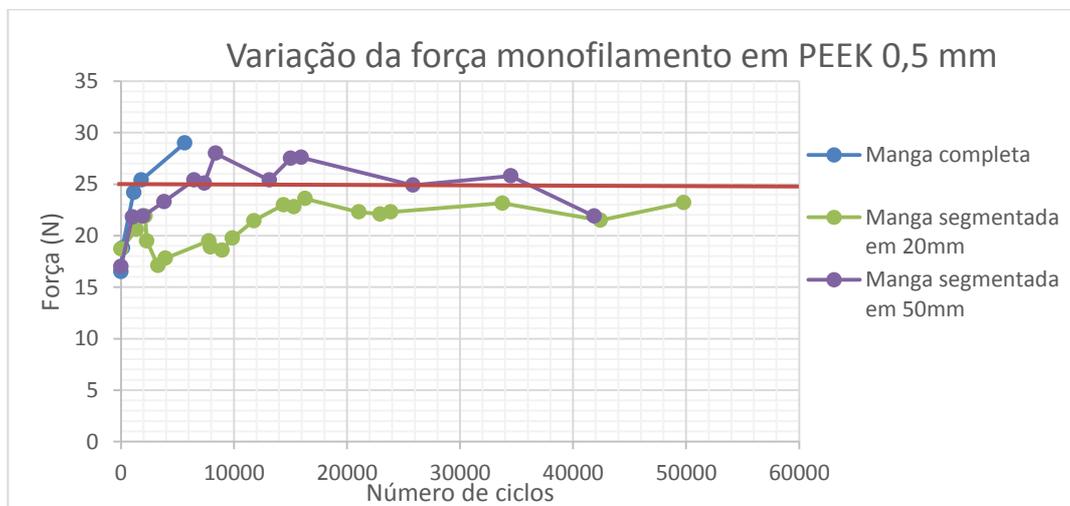


Figura 29 - Variação da força de atrito dos conjuntos com monofilamento em PEEK 0,5 mm

Conforme se pode observar na Figura 29, o sectionamento da manga permite que a força de acionamento fique abaixo do valor-limite da norma, sendo que esta se mantém abaixo deste durante um número maior de ciclos. Ainda assim a manga segmentada com um espaçamento de 20 mm apresenta melhores resultados quando comparada com a manga segmentada em 50 mm, isto porque a manga com segmentos mais pequenos, proporciona ao conjunto uma maior flexibilidade. Por isso, o sectionamento de 20 mm é capaz de se adaptar mais facilmente às diferentes posições a que o acionamento do mecanismo obriga. Esta solução também diminui os pontos de contacto entre o cabo e a manga, uma vez que o cabo passa a estar em contacto com a maior parte dos segmentos, apenas no início e no final destes, apoiado nestes dois pontos.

## CONCLUSÕES

As soluções em que se utilizam conjuntos cabo-manga continuam a ser uma excelente solução quando se pretende um sistema com alguma flexibilidade em termos de se poder adaptar a diferentes situações, com uma eficácia considerável. Além disso, no caso dos autoclismos, é este conjunto que dita o preço do produto.

Neste estudo para a substituição do cabo de aço por um mono ou multifilamento polimérico, dentro daqueles que se encontram disponíveis no mercado, a primeira verificação foi de o seu comportamento tribológico ser diferente, não permitindo um desempenho dentro do desejável.

Neste estudo, as principais conclusões são:

- Dos mono e multifilamentos encontrados no mercado, nenhum deles pode substituir diretamente o cabo de aço na aplicação do conjunto, e ter o mesmo desempenho deste;
- De todas as soluções testadas na aplicação real com monofilamentos termoplásticos, a que apresentou melhores resultados foi o conjunto com cabo em PPS, diâmetro 0,8 mm e manga em HDPE da Leirivedantes com 1,6 mm de diâmetro interno. Ainda assim, em termos de número de ciclos ficou muito abaixo do desejável;
- Foi projetado e construído um equipamento protótipo para monitorização das forças de atrito em conjuntos cabo-manga. Este equipamento permitiu testar expeditamente diversas soluções.
- Verificou-se que o comportamento dos conjuntos cabo-manga, no equipamento protótipo e em seco, é bastante diferente do que se verifica na aplicação real nos testes de vida;
- Em seco, o conjunto com cabo de aço apresenta piores resultados quando comparado com os diferentes monofilamentos poliméricos;
- O conjunto com a manga em HDPE da Leirivedantes com 1,6 mm de diâmetro interno, segmentada ao longo de toda a manga com uma distância de 20 mm, juntamente com o monofilamento em PEEK da Zeus Inc. com 0,5 mm de diâmetro, até ao momento da conclusão desta dissertação, apresenta-se como a melhor solução, sendo que os ensaios em testes de vida deverão continuar a ser acompanhados até ao final dos testes de vida.

## RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em conta os resultados obtidos neste estudo e considerando os objetivos propostos inicialmente sugerem-se para trabalhos futuros:

- Continuar e concluir os testes de vida (até 200 000 ciclos), aos conjuntos com a manga segmentada e o monofilamento em PEEK com 0,5 mm de diâmetro;
- Procurar uma alternativa à manga segmentada, uma vez que a solução, apesar de funcionar em termos práticos, esteticamente prejudica a qualidade do produto, e pode levar o cliente a duvidar da sua eficácia; o corte em espiral destas mangas deverá ser testado;
- Fazer algumas alterações ao equipamento protótipo, de forma a aproximá-lo à utilização em serviço final, para que o processo de testes na aplicação real seja mais acelerado;
- Realizar um estudo económico da solução final, e garantir que se consegue uma diminuição do custo do conjunto em 60%, em relação ao custo atua

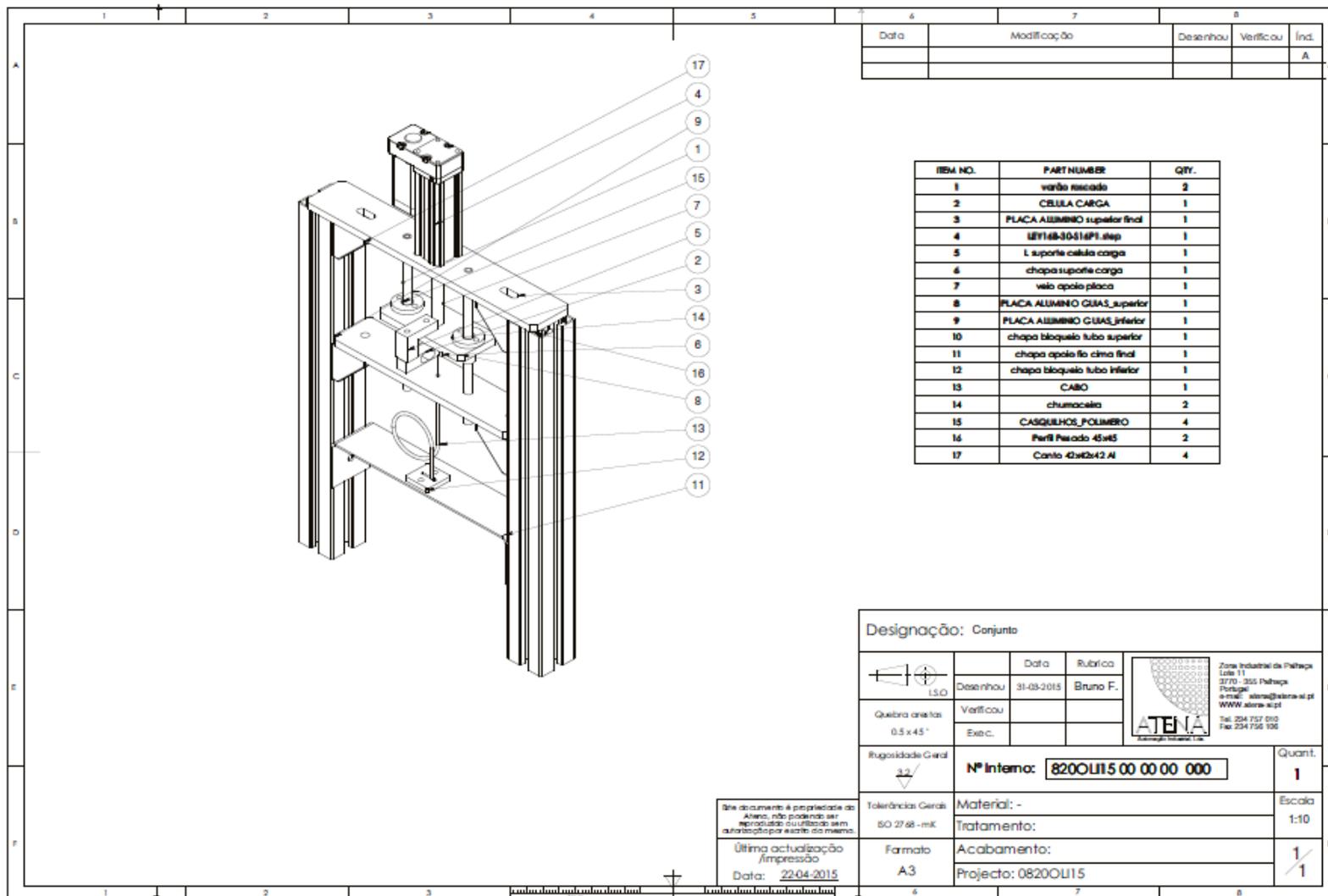
## BIBLIOGRAFIA

- Agrawal, Varun et al. 2010. "Modeling of Transmission Characteristics Across a Cable-Conduit System." 26(5): 914–24.
- Agrawal, Varun 2011. "Modeling and Control of Cable Actuated Surgical Robotic Systems." Purdue University.
- Agrawal, Varun, and William J. Peine. 2010. "Control of Cable Actuated Devices Using Smooth Backlash Inverse." *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*: 1074–79. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5509533>.
- Bhushan, Bharat. 2011. *Introduction to Tribology*. Second.
- CSTB. 2013. *NF Sanitary Components (NF076 - rev.9)*.
- "Diário de Notícias" 2015. <http://www.dnoticias.pt/node/502553> (May 4, 2015).
- Do, T N, T. Tjahjowidodo, M W S Lau, and S. J. Phee. 2013. "Nonlinear Modeling and Parameter Identification of Dynamic Friction Model in Tendon Sheath for Flexible Endoscopic Systems." : 5–10.
- Do, T N, T. Tjahjowidodo, M W S Lau, and S. J. Phee. 2014. "Dynamic Friction-Based Force Feedback for Tendon- Sheath Mechanism in NOTES System." *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 6(3): 252–58. <http://www.ijcee.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=58&id=930> (January 30, 2015).
- Gonçalves, M. W., G. V. Salmoria, C. H. Ahrens, and a. S. Pouzada. 2007. "Study of Tribological Properties of Moulds Obtained by Stereolithography." *Virtual and Physical Prototyping* 2(1): 29–36. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452750701295765> (February 10, 2015).
- Group, Francis. 2006. *Handbook of Lubrication and Tribology*.
- H.Olsson, K.J.Astrom, C.Canudas de Wit, M.Gafvert, P. Lischinky. 1998. "Friction Models and Friction Compensation.pdf." *European Journal of Control* 4: 176–95.
- da Silva, C. H.. 2003. "Degradação de UHMWPE E de POM Devido à Ação Tribológica Contra Axo Inoxidável E Alumínio." Tese de doutoramento, Univ. S. Paulo.
- Johannes, Roland, and Joseph Marie. 1996. "FRICTION IN DEEP DRAWING." In ed. Sniekers. , 77–86.
- Myshkin, N.K., M.I. Petrokovets, and A.V. Kovalev. 2005. "Tribology of Polymers: Adhesion, Friction, Wear, and Mass-Transfer." *Tribology International* 38(11-12): 910–21. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X05001891> (January 29, 2015).

- Palli, G., and C Melchiorri. 2006a. "Model and Control of Tendon-Sheath Transmission Systems." *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.* (May): 988–93. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1641838>.
- Palli, G., and C Melchiorri. 2006b. "Optimal Control of Tendon-Sheath Transmission Systems."
- Phee, S. J., S. C. Low, P. Dario, and A. Menciassi. 2010. "Tendon Sheath Analysis for Estimation of Distal End Force and Elongation for Sensorless Distal End." *Robotica* 28(07): 1073–82. [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S026357470999083X](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S026357470999083X) (May 5, 2015).
- Pouzada, A.S., E.C. Ferreira, and A.J. Pontes. 2006. "Friction Properties of Moulding Thermoplastics." *Polymer Testing* 25(8): 1017–23. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941806001322> (June 26, 2015).
- Radi, P.A. 2007. "TRIBOLOGIA , CONCEITOS E APLICAÇÕES." 1991: 1–13.
- Ramalho, A., and J.C. Miranda. 2006. "The Relationship between Wear and Dissipated Energy in Sliding Systems." *Wear* 260(4-5): 361–67. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164805002541> (January 29, 2015).
- Rymuza, Z. 2007. "Tribology of Polymers." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 7(4): 177–84. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1644966512602350> (February 2, 2015).
- Suraneni, S., I.N. Kar, O.V. R. Murthy, and R.K.P. Bhatt. 2005. "Adaptive Stick–slip Friction and Backlash Compensation Using Dynamic Fuzzy Logic System." *Applied Soft Computing* 6(1): 26–37. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1568494604001085> (January 29, 2015).
- Vieira, Hélder. 2013. "Mecanismo Com Tubo Ladrão Lateral Para Autoclismo." : 29–35.
- Wang, Y.F., D.H. Wang, and T.Y. Chai. 2009. "Modeling and Control Compensation of Nonlinear Friction Using Adaptive Fuzzy Systems." *Mechanical Systems and Signal Processing* 23(8): 2445–57. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327009001472> (January 29, 2015).
- Yao, Bin et al. 2010. "Friction and Visco-Elasticity Effects in Tendon-Based Transmission Systems." : 3890–95.
- Zhang, S.W. 1998. "State-of-the-Art of Polymer Tribology." *Tribology International* 31(1-3): 49–60. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X98000073>.

## **ANEXOS**

# ANEXO A – DESENHO TÉCNICO DO EQUIPAMENTO - PROTÓTIPO



Data	Modificação	Desenhou	Verificou	Ind.
				A

Designação: Conjunto

 Quebra arestas: 0.5 x 45°	Data 31-03-2015	Rubrica Bruno F.	Zona Industrial de Póvoa Lote 11 3770 - 355 Póvoa Portugal e-mail: atema@atema.pt WWW.atema.pt Tel. 254 757 950 Fax. 254 756 106
	Verificou Exec.		
Rugosidade Geral 	Nº Interno: 8200LI15 00 00 00 000		Quant. 1
Tolerâncias Gerais ISO 2768 - mK	Material: - Tratamento:		Escala 1:10
Última actualização / impressão Data: 22-04-2015	Formato A3	Acabamento: Projecto: 08200LI15	1/1

Este documento é propriedade da Atema, não podendo ser reproduzido ou utilizado sem autorização por escrito da mesma.



*Figura 30 – Suporte da estrutura*



*Figura 31 – Conjunto cabo-manga em ensaio*

## ANEXO B – GRÁFICO DOS ENSAIOS AOS DIFERENTES CONJUNTOS CABO-MANGA

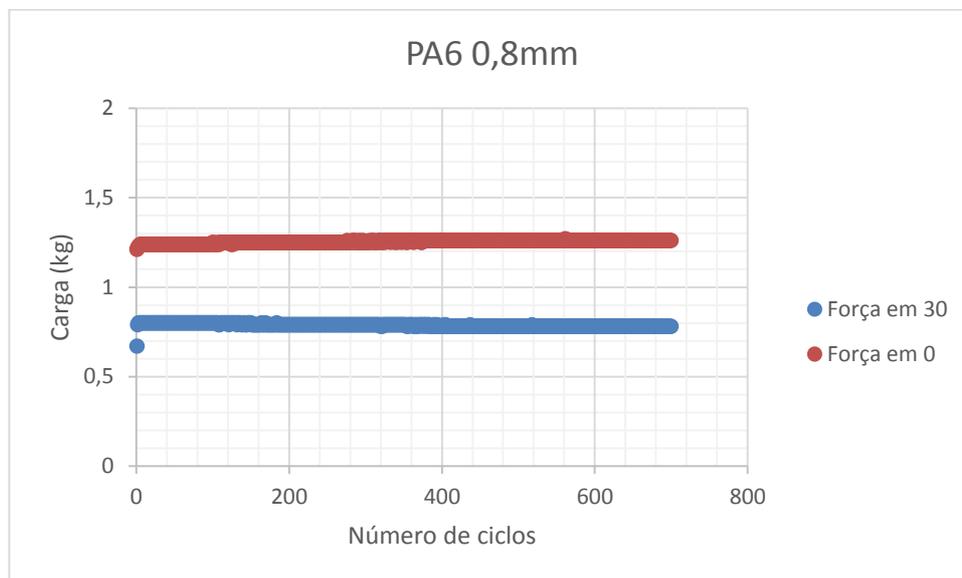


Figura 32 – Ensaio no EP do cabo PA6 com diâmetro 0,8mm

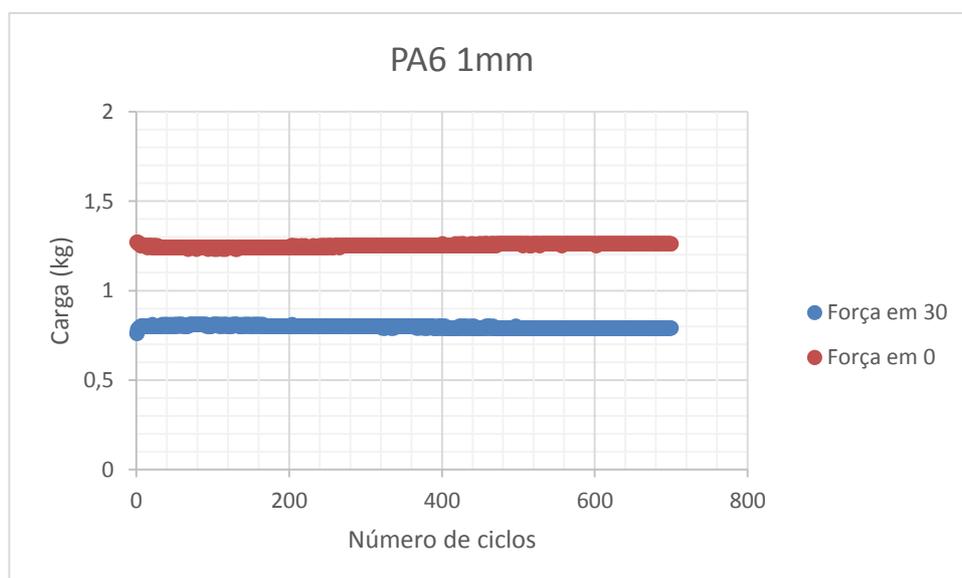


Figura 33 - Ensaio no EP do cabo PA6 com diâmetro 1mm

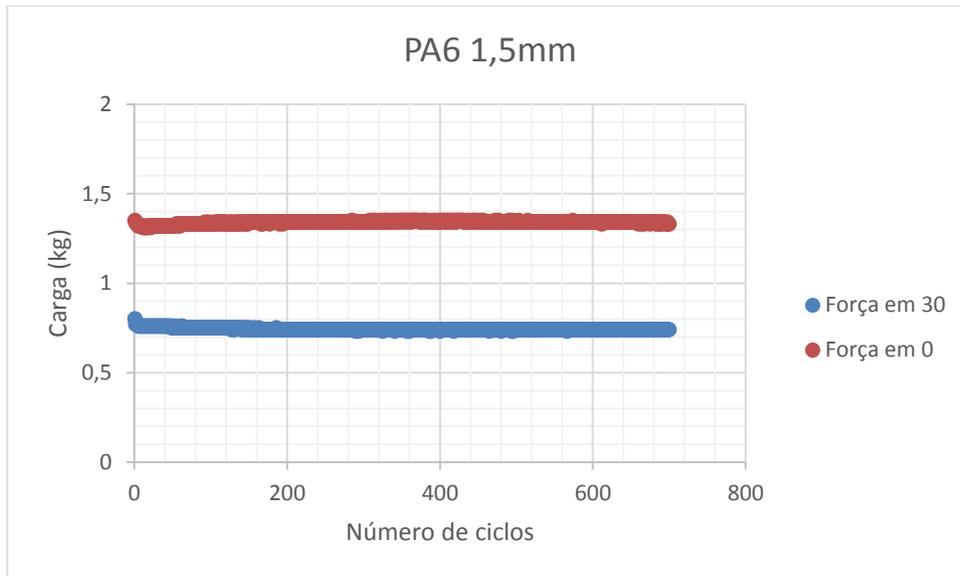


Figura 34 - Ensaio no EP do cabo PA6 com diâmetro 1,5mm

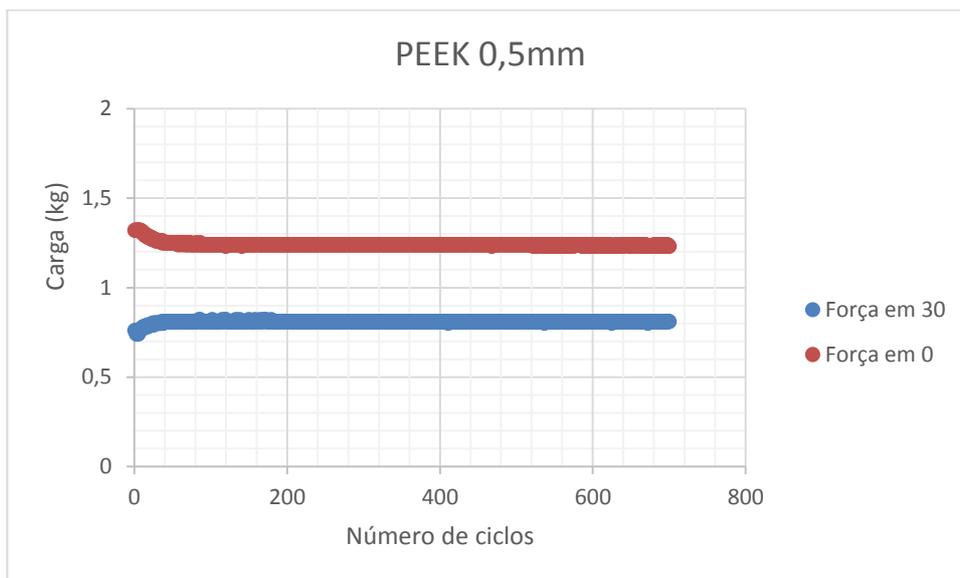


Figura 35 - Ensaio no EP do cabo PEEK com diâmetro 0,5mm

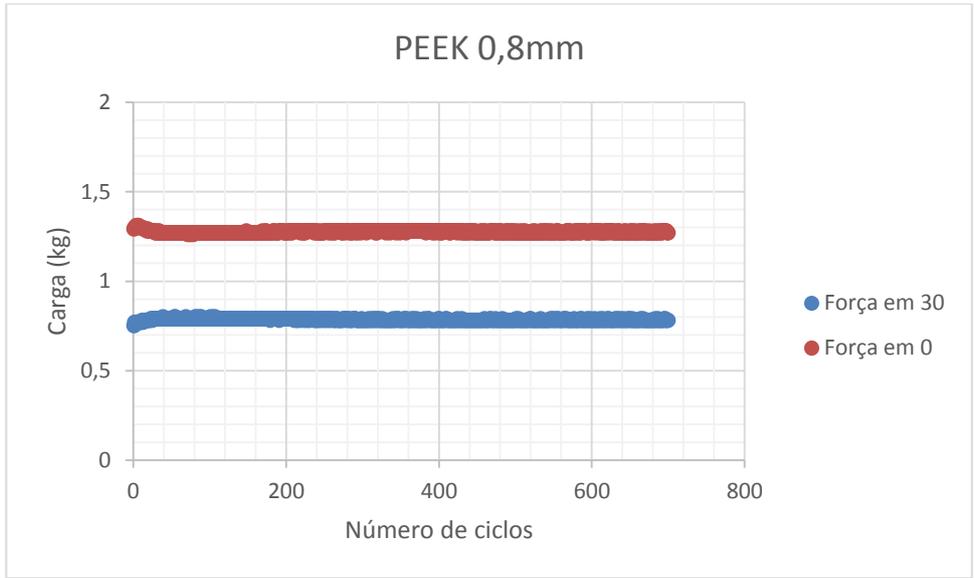


Figura 36 - Ensaio no EP do cabo PEEK com diâmetro 0,8mm

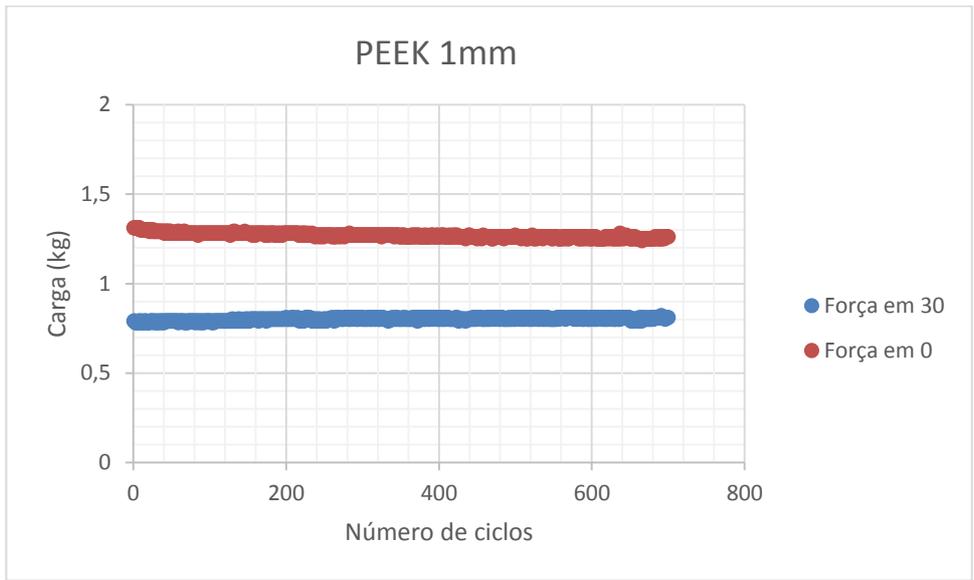


Figura 37 - Ensaio no EP do cabo PEEK com diâmetro 1mm

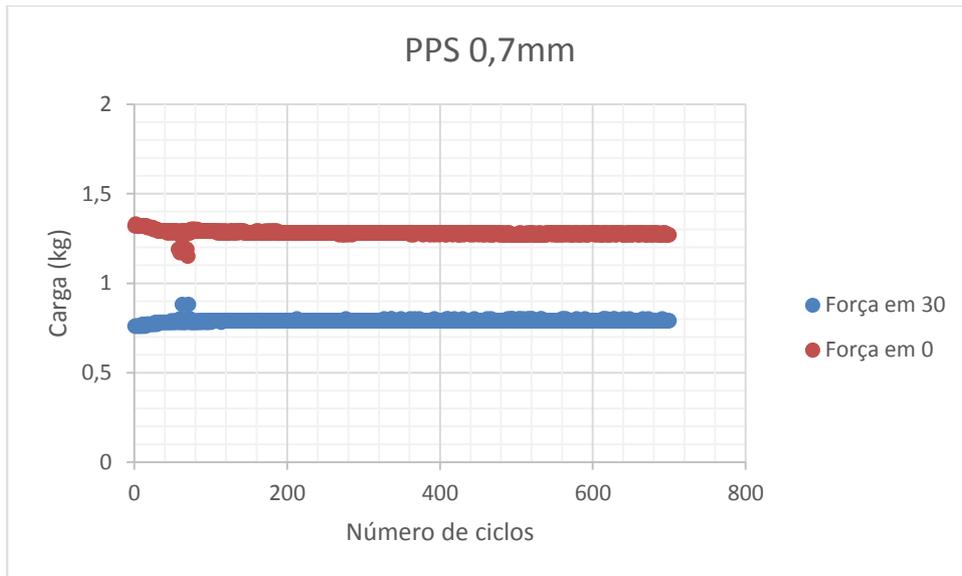


Figura 38 - Ensaio no EP do cabo PPS com diâmetro 0,7mm

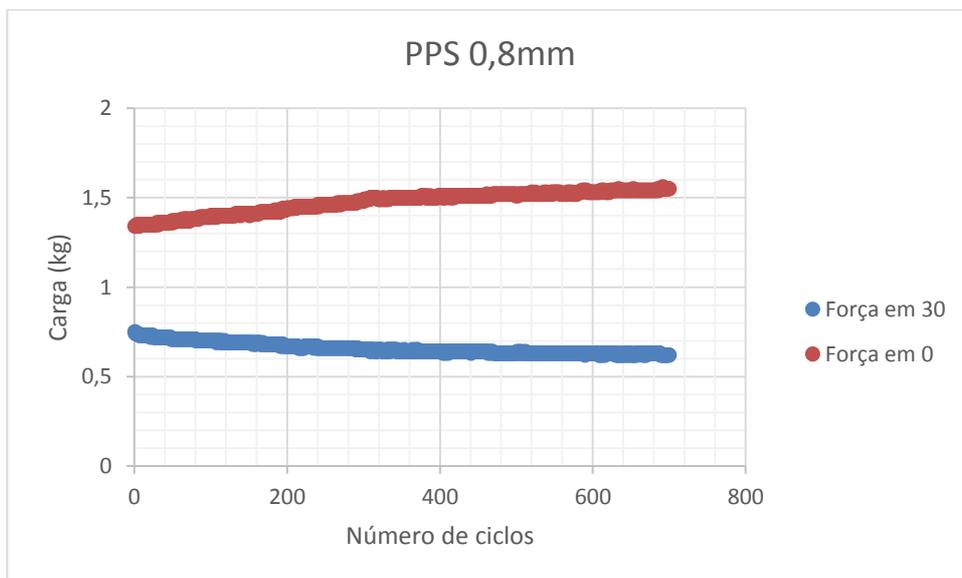
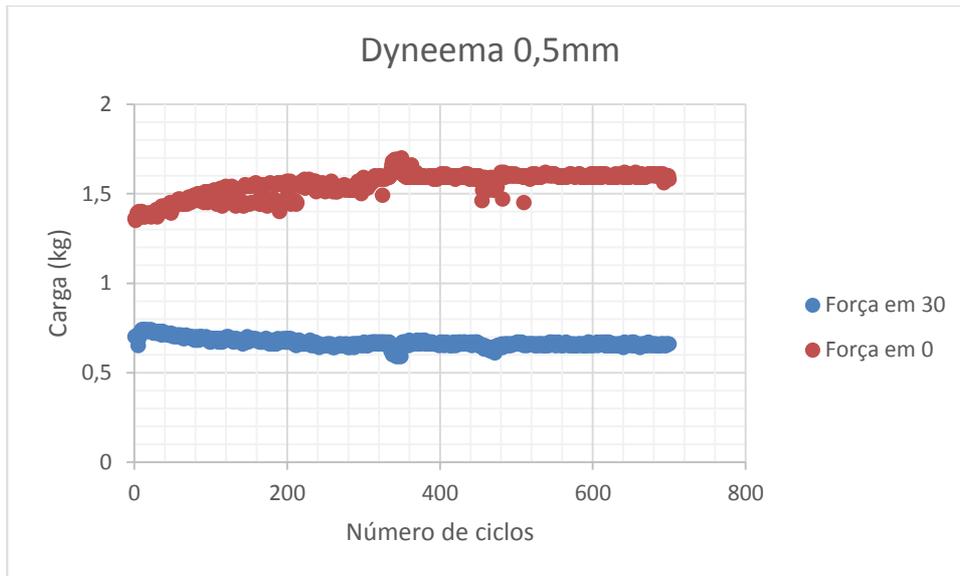


Figura 39 - Ensaio no EP do cabo PPS com diâmetro 0,8mm



*Figura 40 - Ensaio no EP do cabo Dyneema com diâmetro 0,5mm*

## ANEXO C – FICHAS DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

### FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

#### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	Manga	Cabo
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	PA
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	Dr. KarlWetekam
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	0,8
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

#### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	27
<b>Tipo de água</b>	Salgada

#### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	15,2
<b>Número de ciclos</b>	2000
<b>Força final (N)</b>	27,7

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	Manga	Cabo
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	PBO Kiteline
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	Marlow Ropes
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	1
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	27
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	33
<b>Número de ciclos</b>	0
<b>Força final (N)</b>	-

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	<b>Manga</b>	<b>Cabo</b>
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	PEEK
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	Zyex
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	0,5
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	29
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	15,8
<b>Número de ciclos</b>	9000
<b>Força final (N)</b>	27,2

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	Manga	Cabo
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	PET
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	PerlonNextrusion
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	1,1
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	28
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	33
<b>Número de ciclos</b>	0
<b>Força final (N)</b>	-

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	Manga	Cabo
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	PPS
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	PerlonNextrusion
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	0,7
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	28
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	15,5
<b>Número de ciclos</b>	5 000
<b>Força final (N)</b>	31,2

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	<b>Manga</b>	<b>Cabo</b>
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	PPS
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	PerlonNextrusion
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	0,8
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	27
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	18,5
<b>Número de ciclos</b>	14000
<b>Força final (N)</b>	34

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	<b>Manga</b>	<b>Cabo</b>
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	PVDF
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	G. Krahmer GmbH
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	0,5
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	29
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	19,5
<b>Número de ciclos</b>	2000
<b>Força final (N)</b>	26

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	Manga	Cabo
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	Technora (fibra aramida)
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	Lankhorst Euronete
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	0,5
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	30
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	30
<b>Número de ciclos</b>	0
<b>Força final (N)</b>	

## FICHA DE ENSAIO EM TESTES DE VIDA

---

### CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO:

	<b>Manga</b>	<b>Cabo</b>
<b>Matéria-prima</b>	HDPE	UHMWPE
<b>Fornecedor</b>	Leirivedantes	Lankhorst Euronete
<b>Diâmetro interno da manga (mm)</b>	1,6	-
<b>Diâmetro do cabo (mm)</b>	-	0,5
<b>Raio de curvatura do conjunto (mm)</b>		180

### AMBIENTE DE ENSAIO:

<b>Temperatura da água (°)</b>	30
<b>Tipo de água</b>	Salgada

### RESULTADOS DE ENSAIO:

<b>Força inicial (N)</b>	19,3
<b>Número de ciclos</b>	5 000
<b>Força final (N)</b>	26