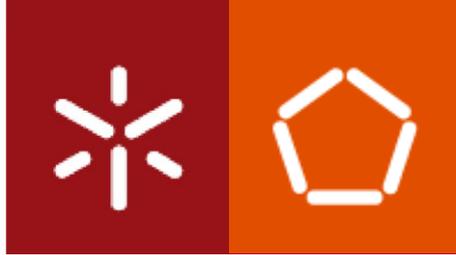


Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Mecânica

Renato Carvalho Viana

INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE SISTEMAS
DE TUBAGENS DESENVOLVIMENTO DE
DISPOSITIVOS ACESSÍVEIS

dezembro 2014



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Mecânica

Renato Carvalho Viana

INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE SISTEMAS
DE TUBAGENS DESENVOLVIMENTO DE
DISPOSITIVOS ACESSÍVEIS

Tese de Mestrado
Engenharia Mecânica – Manufactura

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Doutor António Caetano Monteiro

dezembro 2014

DECLARAÇÃO

Nome _____

Endereço electrónico: _____ Telefone: _____

Número do Bilhete de Identidade: _____

Título dissertação /tese

Orientador(es): _____

_____ Ano de conclusão: _____

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respectiva, deve constar uma das seguintes declarações:

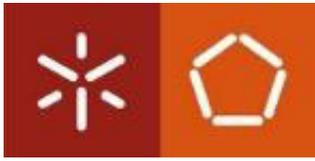
1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

2. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA TESE/TRABALHO (indicar, caso tal seja necessário, nº máximo de páginas, ilustrações, gráficos, etc.), APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, , MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

3. DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____



Agradecimentos

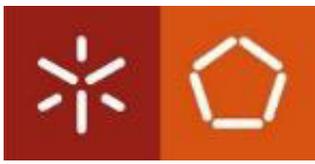
Agradeço, antes de mais, ao Professor Doutor António Caetano Monteiro, pela orientação, suporte, total disponibilidade durante este projecto mas, acima de tudo, pelas reuniões de tutoria que se tornavam aulas de engenharia.

Aos meus amigos Diogo e Hugo, pelas questões colocadas e pelo apoio técnico que lá estive sempre que precisei.

Aos meus pais, irmão e namorada, de quem o afastamento era somente físico.

À minha avó, Amélia, por não acreditar no falhanço dos netos.

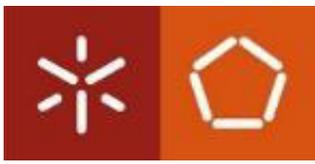
Ao meu avô, Rolando, por tudo o resto.



Resumo

Os sistemas de tubagens têm um papel fundamental na manutenção da qualidade de vida das populações, que se abrange desde as redes de distribuição de água até ao abastecimento de água potável. As condutas podem ser encontradas em qualquer ambiente humano, desde encastradas em paredes ou localizados no subsolo. Tendo em conta as suas frequentes e diversificadas funções, os tubos encontram-se expostos a defeitos de variadíssima ordem, tais como a corrosão, as tensões e o envelhecimento, levando os dutos a casos extremos de vazamento, ranhuras ou mesmo fendas penetrantes. A acrescentar a este problema, verifica-se ainda que muitas das condutas de transporte são subterrâneas, urgindo a existência dum dispositivo que lhes seja acessível através do seu interior, tendo a capacidade dum manutenção contínua e periódica, capaz de aferir a existência de danos e reparando-os, se possível. Estes dispositivos têm o nome de robôs de inspecção tubular interna e têm vindo a ser alvo de estudo em vários países.

O principal objectivo deste trabalho centra-se na construção de um dispositivo acessível do ponto de vista financeiro, capaz de se deslocar facilmente dentro dum tubagem, ainda com a valência de reparar, as suas mais do que prováveis, imperfeições ou danos.



Abstract

Piping systems have a key role in maintaining the quality of life of the people, which stretches from the water distribution system to the drinking water supply. Ducts can be found in any human environment, from recessed in walls or located underground. Having regard to their common and diverse functions, the tubes are exposed to very varied order defects, such as corrosion, stress and aging, the ducts leading to extreme cases of leakage grooves or slots penetrating. Adding to this problem, there is still a lot of transmission lines underground, urging the existence of a device that is accessible to them through the inside, and capacity of a continuous and periodic maintenance, able to assess for damage and repairing - the if possible.

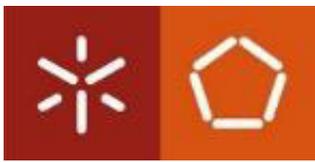
These devices are called In-Line Inspection Robots and have been the subject of study in various countries.

The main objective of this work focuses on the construction of an affordable device from a financial point of view, able to move easily within a pipe, even with the valence of repair of its, more than likely, imperfections or damage.

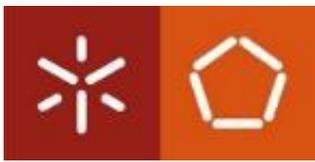


Índice

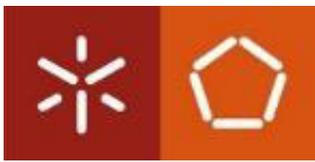
| | |
|---|-----|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | ii |
| Abstract | iii |
| 1.Introdução | 13 |
| Capítulo I | 15 |
| O Transporte tubular | 15 |
| Contextualização | 16 |
| 2.Transporte tubular | 16 |
| 2.1 Nota histórica..... | 16 |
| 2.2 Transporte tubular terrestre..... | 22 |
| 2.4 Transporte tubular subaquático | 22 |
| 2.3 Transporte tubular aéreo..... | 23 |
| 2.5 Componentes do transporte tubular | 24 |
| 2.6 Tipos de transporte tubular de acordo com a substância transportada | 25 |
| 2.7 Tipos de transporte tubular de acordo com a sua finalidade | 33 |
| 2.8 Movimentação dos produtos aquando do transporte tubular..... | 34 |
| 2.9 Construção | 34 |
| 2.9.5 Preparação do local | 37 |
| 2.10 Acidentes relacionados com tubagens | 42 |
| 3. A relevância do material na concepção de condutas..... | 43 |
| 3.1 Aço maciço (com e sem costura) | 43 |
| 3.2 Ferro fundido | 44 |
| 3.3 Betão armado | 45 |
| 3.4 Fibrocimento..... | 46 |
| 3.5 Cloreto de polivinilo (PVC) | 46 |
| 3.6 Polietileno (PEB e PEA) | 47 |
| 3.7 Poliéster | 48 |
| Capítulo II | 49 |
| Danos em condutas: Sistemas de detecção e Reparação | 49 |
| 4. Danos em condutas..... | 50 |
| 4.1 Levantamento estatístico..... | 51 |
| 4.2 Danos mecânicos | 53 |
| 4.2.1 Defeitos estruturais e seus tipos | 54 |
| 4.3 Características dos defeitos estruturais | 58 |
| 4.3.1 Mudanças na forma da conduta | 58 |
| 4.3.2 Alterações na espessura da parede | 58 |



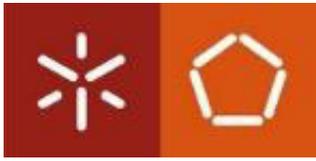
| | |
|--|-----|
| 4.3.3 Alterações em tensões e deformações localizadas | 59 |
| 4.3.4 Alterações das propriedades dos materiais..... | 59 |
| 4.3.5 Outras anomalias ou defeitos | 60 |
| 4.4 Fenómenos de mola de retorno e Re-Arredondamento | 61 |
| 4.5 Campos Tensão/Deformação [Hopkins e Leis (2003)] | 61 |
| 4.6 Redução da tenacidade e ductilidade devido à tensão..... | 62 |
| 4.7 Geometria e Caracterização de Danos..... | 62 |
| 4.8 Condições de reparação e modos de falha | 67 |
| 4.8.1 Condições de reparação imediata | 68 |
| 4.8.2 Condições de reparação agendada (ANSI / ASME B31.8S, 2004) | 69 |
| 4.8.3 Crescimento de fissuras por defeitos mecânicos | 69 |
| 4.8.4 Vazamento versus ruptura | 70 |
| 4.8.5 Estatísticas referentes às falhas no transporte..... | 71 |
| 5. Detecção de fugas em condutas..... | 75 |
| 5.1 Estatística | 77 |
| 5.2 Monitorização de fluxo | 78 |
| 5.3 O teste de tintura..... | 79 |
| 5.4 Circuito fechado de televisão | 80 |
| 5.5 Sonar | 81 |
| 5.6 Radar de penetração de solo | 82 |
| 5.7 Termografia de infravermelhos | 83 |
| 5.8 Testes de pressão de ar | 83 |
| 5.9 Teste de água..... | 84 |
| 5.10 Vigilância manual..... | 84 |
| 5.11 Localização de fugas por eléctrodo enfocado (FELL-41)..... | 85 |
| 5.12 Características acústicas de sinais de fugas em tubos plásticos de distribuição de água | 87 |
| 5.13 Rastreador Miniatura Helicoidal de tubos (dsm - Mission Critical Motion Control)..... | 88 |
| 5.14 Instrumentos de escuta | 89 |
| 5.15 Rastreador de interior de tubos adaptável ao diâmetro interior do tubo (Moghadam, Arbabtafti, & Hadi) | 90 |
| 6. Métodos de reparação | 92 |
| 6.1 Revestimento com argamassa de cimento | 94 |
| 6.3.1 Vantagens e inconvenientes..... | 97 |
| 6.4 Revestimento com resinas epoxy | 97 |
| | 98 |
| 6.4.1 Processo..... | 99 |
| 6.4.2 Vantagens e inconvenientes..... | 100 |
| 6.5 Reparação de tubagens por moldação de resina (RTM) | 101 |
| 6.5.1 Processo..... | 101 |

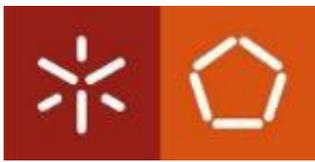


| | |
|---|-----|
| 6.5.3 Selecção da resina | 105 |
| 6.6 STOP IT® - Pipe repair system | 105 |
| 6.6.1 Resistência química | 106 |
| 6.6.2 Propriedades físicas | 106 |
| 6.7 Re-entubamento simples | 107 |
| 6.7.1 Processo | 108 |
| 6.8 Re-entubamento por destruição da tubagem existente | 110 |
| 6.8.1 Processo | 111 |
| 6.8.2 Vantagens e inconvenientes | 112 |
| 6.9 Re-entubamento com tubo com diminuição diametral temporária | 114 |
| 6.9.1 Processo | 115 |
| 6.9.2 Vantagens e inconvenientes | 115 |
| Vantagens do Re-entubamento com tubo com diminuição diametral temporária: | 115 |
| 6.9.3 Desvantagens do Re-entubamento com tubo com diminuição diametral temporária: | 116 |
| 6.10 Re-entubamento com tubo de parede dobrada | 116 |
| 6.10.1 Vantagens e inconvenientes | 117 |
| Vantagens do re-entubamento com tubo de parede dobrada: | 117 |
| 6.11 Revestimento por tira em espiral | 119 |
| 6.12 Metodologias de apoio à decisão de reabilitação de sistemas de abastecimento de água | 120 |
| Capítulo III – Robôs de Inspeção Tubular Interna: | 121 |
| Desenvolvimento de um Dispositivo Acessível | 121 |
| 7. Tipos de Robôs de Inspeção Tubular Interna | 122 |
| 7.1 Contextualização | 122 |
| 7.2 Aplicações de Robots de Inspeção tubular interna | 123 |
| 7.3 Tendência actual de aplicações de inspeção interna | 123 |
| 7.4 Construção e funcionamento | 124 |
| 7.4.1 Mecanismo de paralelogramo adaptável | 125 |
| 7.4.2 Robôs com utilização de rolamento de peso | 126 |
| 7.4.3 MRINSPECT | 127 |
| 7.4.4 Robôs de inspeção do tipo pressão pneumática e vácuo | 129 |
| Para entendimento e consulta mais detalhadas deste dispositivo, consultar o Anexo I da presente dissertação. | 129 |
| 7.5 Softwares utilizados no projecto | 130 |
| 7.6 Controlo do Robô de Inspeção Intratubular e Transmissão da Informação | 130 |
| 7.6.1 Por cabos híbridos fotoeléctricos | 130 |
| 7.6.2 Sistemas sem fios | 130 |
| 7.7 Técnicas em utilização e futuras de detecção interna de danos ' | 131 |
| 7.7.1 Circuito Fechado de Televisão | 131 |
| 7.7.2 SSET | 132 |



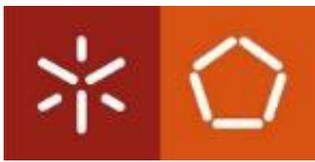
| | |
|---|-----|
| 7.7.3 Charge-coupled device | 132 |
| 8. Desenvolvimento do protótipo | 135 |
| 8.1 Contextualização do Problema | 135 |
| 8.2 Procedimento experimental | 136 |
| 8.2.1 Selecção do Mecanismo de tracção..... | 136 |
| | 138 |
| 8.2.2 Sistema de transmissão de potência | 138 |
| 8.2.3 Sistema de suspensão..... | 142 |
| | 145 |
| 8.2.4 Construção do sistema de lagartas..... | 145 |
| 8.2.5 Lista de Materiais..... | 146 |
| 8.2.6 Vista explodida do conjunto | 148 |
| 8.2.7 Protótipo Final | 149 |
| Resultados – Teste diametral..... | 150 |
| Conclusões..... | 152 |
| Bibliografia..... | 154 |
| Anexos | 156 |
| Anexo 1 – Desenhos Técnicos dos componentes do Dispositivo..... | 157 |
| Apoio do Veio da Suspensão | 158 |
| Segundo apoio – Encaixe de Distribuição angular | 159 |
| Chapa de suporte das lagartas..... | 160 |
| Peça central sem topo | 161 |
| Topo da Peça Central..... | 162 |
| Braço de suspensão | 163 |
| Eixo da suspensão..... | 164 |
| Pino de Ligação | 165 |
| Extremidade do Braço de Suspensão | 166 |
| Corpo Central Final | 167 |
| Dispositivo Final..... | 168 |
| Anexo 2 | 169 |
| Grampos de reparação | 169 |



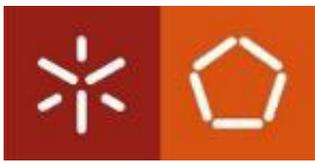


Índice de Figuras

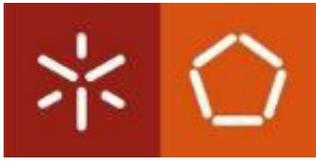
| | |
|---|----|
| Figura 1 - Exemplo de transporte tubular | 21 |
| Figura 2 - Exemplo de transporte tubular terrestre | 22 |
| Figura 3- Exemplo Transporte tubular subaquático..... | 22 |
| Figura 4 - Exemplo de transporte tubular aéreo no Alaska | 23 |
| Figura 5 - Exemplo de transporte tubular subterrâneo | 24 |
| Figura 6 - Transporte Tubular: Componentes..... | 24 |
| Figura 7 - Transporte tubular para produtos petrolíferos (American Society of Civil Engineers, 1996) | 26 |
| Figura 8 – Transporte tubular para gás natural..... | 28 |
| Figura 9 - Maior conduta do mundo de transporte de amoníaco..... | 29 |
| Figura 10 – Seguindo da esquerda para a direita e para baixo: Desbaste do local; Vala para instalação do sistema; Revestimento da tubagem; Tubulações | 35 |
| Figura 11 - Instalação de conduta para transporte tubular | 38 |
| Figura 12 - Incidentes sérios em condutas - Todos os sistemas de condutas (no mar e em terra) (Michael Baker Jr., Inc., 2010) | 51 |
| Figura 13 - Incidentes sérios em condutas fruto de escavações - Todos os sistemas de condutas (na terra ou no mar) (Michael Baker Jr., Inc., 2010)..... | 52 |
| Figura 14-Da esquerda para a direita e para baixo- Entalhe; ranhura; entalhe com ranhura (Winkelman, 2008) | 55 |
| Figura 15 – Ranhura (Michael Baker Jr., Inc., 2010)..... | 57 |
| Figura 16 – Raio de curvatura..... | 63 |
| Figura 17 – Medida da profundidade do entalhe (Hopkins e Leis, 2003)..... | 64 |
| Figura 18 - Medida da profundidade de dentes re-entrantes e não re-entrantes (Michael Baker Jr., Inc., 2010) | 64 |
| Figura 19 - Medida da profundidade de ranhuras/sulcos (OPS T1010, 2004) | 65 |
| Figura 20 - Medição da profundidade de dano da combinação Entalhe/Sulco | 66 |
| Figura 21 - Causas de Incidentes significativos no transporte de fluxo de líquidos perigosos a partir de 1988-2008..... | 72 |
| Figura 22 - Causas de incidentes significativos em <i>pipelines</i> de distribuição de gás | 73 |
| Figura 23 - Causas de acidentes significativos. <i>Pipelines</i> de distribuição de gás (PHMSA, 2009)..... | 74 |
| Figura 24 - Defeitos estruturais que incluem fissuras e fracturas | 75 |
| Figura 25 – Infiltração Figura 26 – Deslocamento de juntas..... | 76 |
| Figura 27 – Da esquerda para a direita: entupimento por raízes; intrusão de raízes entupimento por gordura..... | 76 |
| Figura 28 - Instrumento para monitorização de fluxo; Medidor de caudal; Eléctrodo de monitorização de fluxo contínuo | 78 |
| Figura 29 - Teste de fumo em sistemas de saneamento | 79 |
| Figura 30 - Teste de pintura..... | 79 |

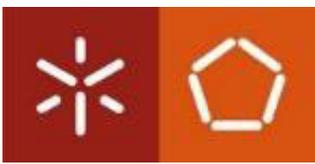


| | |
|--|-----|
| Figura 31 – Sistemas de Circuito Fechado de Televisão (CCTV) | 80 |
| Figura 32 - Sistemas de circuito fechado de televisão - inspecção da linha principal..... | 80 |
| Figura 33- Equipamento de sonar | 81 |
| Figura 34 - <i>GPR</i> com multi-sensor utilizado na localização de tubos subterrâneos..... | 82 |
| Figura 35 – Imagem de uma termografia de infravermelhos | 83 |
| Figura 36 - Instrumentos/aparelhos de teste de ar e de água. | 84 |
| Figura 37 – Aplicação do teste FELL | 85 |
| Figura 38 - Representação gráfica do sistema FELL-41 | 86 |
| Figura 39 - Fuga de água em tubagem plástica | 87 |
| Figura 40 – Detecção Vareta electrónica de escuta | 88 |
| Figura 41 - Vareta electrónica de escuta | 88 |
| Figura 42 - Rastreador miniatura..... | 89 |
| Figura 43 - Exemplo de degradação do betão armado..... | 92 |
| Figura 44 - Esquema do sistema de revestimento com argamassa de cimento..... | 95 |
| Figura 45 – Da esquerda para a direita: Mecanismo de revestimento com argamassa; Aplicador de argamassa; Raspador de aço..... | 96 |
| Figura 46 - Pormenor da ponta dispersora para revestimento com resinas epoxy | 98 |
| Figura 47 - Aplicação da resina em conduta de grandes dimensões | 98 |
| Figura 48 - Tubo revestido com resinas epoxy | 99 |
| Figura 49 - Esquema do sistema de revestimento com resinas epoxy | 99 |
| Figura 50 – Processo RTM | 102 |
| Figura 51 - Preparação do reforço compósito | 103 |
| Figura 52 - Esquema de componentes e de montagem | 104 |
| Figura 53 - Re-entubamento simples | 108 |
| Figura 54 - Re-entubamento simples | 109 |
| Figura 55 - Destruição da conduta antiga. | 111 |
| Figura 56 - Re-entubamento por destruição - pormenor de funcionamento | 112 |
| Figura 57 - Zona de ataque para execução do processo | 113 |
| Figura 58- Compressão diametral do tubo | 114 |
| Figura 59 - Inserção de conduta nova | 115 |
| Figura 60 - Re-entubamento por parede dobrada: a) pormenor de fábrica; b) inserção do tubo (método "Sublime"); c) Método "Subcoil". | 117 |
| Figura 61 - Re-entubamento por parede dobrada " <i>in situ</i> " | 118 |
| Figura 62 - Revestimento por tira em espiral | 119 |
| Figura 63 - Aplicação do processo..... | 119 |



| | |
|--|-----|
| Figura 64 - Fornecimento anual global de robôs industriais. Fonte: IFR ANALITICAL Department | 122 |
| Figura 65 - A partir da esquerda, tipos: pressão na parede realizada por lagartas, por rodas e por parafuso. Fonte: Gargade, Modelling and Analysis of Pipe Inspection Robot (2013) | 124 |
| Figura 66 - (a) mecanismo de paralelogramo adaptável ao diâmetro interno da tubulação (b) distribuição das forças de apoio. Fonte: (Zhang, 2007) | 126 |
| Figura 67 - Diagrama de corpo livre de acção sobre a roda, (b) Projecção de um aro de roda vazia, (c) protótipo concluído de aro da roda com disco magnético de fenda. Fonte: (Zin, 2012)..... | 126 |
| Figura 68 - MRINSPECT I e seu mecanismo correspondente. Fonte: (Tătar, 2007) | 127 |
| Figura 69 - MRINSPECT II e seu mecanismo correspondente. Fonte: (Tătar, 2007) | 128 |
| Figura 70 - MRINSPECT IV e seu mecanismo correspondente. Fonte: (Tătar, 2007) | 128 |
| Figura 71 - Sequência cronológica de funcionamento do dispositivo de pressão pneumática. Fonte: (Ono, 2001)..... | 129 |
| Figura 72 - (a) Robô de Inspeção (Mogurinko) e (b) Movimento de sonda rotativa | 131 |
| Figura 73 - Da esquerda para a direita: (a) Teste de aquisição de imagem tubular e (b) Sistema CCD de câmara e lentes .. | 133 |
| .Figura 74 - Sistema de Inspeção Visual para Inspeção de tubos soldados | 133 |
| Figura 75 - Mapa do nível de Projecção da soldadura..... | 134 |
| Figura 76 - Motor hidráulico de engrenagens externas..... | 136 |
| Figura 77 - Motor eléctrico <i>DirectIndustry</i> seleccionado | 137 |
| Figura 78 - Descrição das características do motor eléctrico seleccionado | 137 |
| Figura 79 - Dimensões e desenho técnico do motor seleccionado | 138 |
| Figura 80 - Sistema de transmissão de potência: Parafuso sem-fim mais polias dentadas | 138 |
| Figura 81 - Disposição das polias em torno do parafuso sem-fim | 139 |
| Figura 82 – Vista explodida do sistema de tracção..... | 140 |
| Figura 83 - Acoplamento radial do sistema de transmissão de potência | 140 |
| Figura 84 - Abordagem Inicial em relação ao corpo central..... | 141 |
| Figura 85 - Corpo central final do dispositivo | 141 |
| Figura 86 - Vistas traseira, lateral e de frente da suspensão com mola helicoidal seleccionada | 143 |
| Figura 87 - Modelação CAD da suspensão | 144 |
| Figura 88 - Inserção de componentes intermédios de apoio das lagartas | 145 |
| Figura 89 - Desenho do sistema de lagartas..... | 145 |
| Figura 90 – Vista explodida do conjunto..... | 148 |
| Figura 91 – Protótipo final | 149 |
| Figura 92 - Teste diametral: Traçado de circunferência com 110 mm de diâmetro | 150 |





1. Introdução

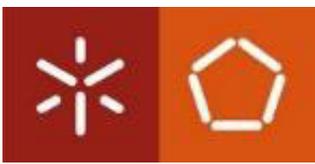
As tubulações estão desenhadas e construídas com o propósito de acarretar o movimento e a transferência de líquidos e gases de um local para outro, como é o caso da água, do petróleo, do saneamento ou do gás natural.

Tendo em conta as suas frequentes e diversificadas funções, os tubos encontram-se expostos a defeitos de variadíssima ordem, tais como a corrosão, as tensões e o envelhecimento levando os dutos a casos extremos de vazamento, ranhuras ou mesmo fendas penetrantes. Alguns destes defeitos são causados por substâncias químicas presentes no fluxo de transporte ou até chegam a ser consequência, em muitos dos casos, de danos mecânicos oriundos de escavações. Um outro problema enfrentado baseia-se na acumulação de sedimentos e corrosão no interior de tubagens, problemática essa que acaba por reflectir-se, muitas vezes, num aumento efectivo do tempo de volume total transportado, trazendo grandes prejuízos e impactos económicos algumas vezes brutais em indústrias como a do gás e a do petróleo (Zin, 2012) (Zhang, 2007).

Por outro lado, as condutas e tubulações no geral são também o principal componente dos sistemas de abastecimento público de água. Tendo em conta que a água é, quase sem margem para dúvidas, a substância mais valiosa e fundamental para a sustentabilidade da vida do Homem, levanta-se o problema da manutenção das estruturas que tratam da sua distribuição de uma forma segura, estável e livre de contaminações provenientes da interface líquido-tubo. O envelhecimento das condutas de transporte é inevitável e à medida que estas atingem o seu curso final de vida útil, o número de acidentes com eles relacionados, como fugas, rupturas e interrupções de abastecimento vão tornando-se mais frequentes (Sousa, 2001). A acrescentar a este problema, verifica-se ainda que muitas das condutas de transporte são subterrâneas, urgindo a existência dum dispositivo que lhes seja acessível através do seu interior, tendo a capacidade duma manutenção contínua e periódica, capaz de aferir a existência de danos e reparando-os, se possível.

Como resposta a esta necessidade, estão já disponíveis no mercado dispositivos capazes de se deslocar ao longo de tubagens, fazendo-se valer de sensores de natureza variada, adaptados ao tipo de inspecção, de reparação e de forma geométrica de tubo que o problema incluía.

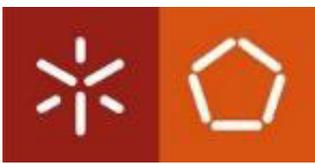
Estes dispositivos têm o nome de robôs de inspecção tubular interna e têm vindo a ser alvo de estudo em vários países. Podem trazer consigo sistemas de inspecção tubular como câmaras CCTV (Circuito Fechado de Televisão), entre outras, capazes de transmitir, a partir do tubo e para o exterior, informações relativas ao estado interno do tubo, reparando-o de seguida.



Os aspectos cruciais à concepção do robô são a forma e o diâmetro do tubo, que afectam acima de tudo o movimento do dispositivo. Características tubulares como diferentes diâmetros de tubos, cotovelos e comprimento de inspecção incluem-se também nos critérios de adaptação do robô ao tubo a abordar.

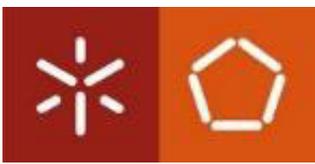
Actualmente as soluções disponíveis baseiam-se em dispositivos de alto custo, o que inviabiliza na maior parte das vezes a contratação para uso regional (Raposo,2008).

Desta forma, urge a necessidade do desenvolvimento dum dispositivo capaz de suprir as necessidades já referidas, com a vantagem de este ser acessível em termos financeiros, e, se possível, utilizando na sua concepção mecanismos e componentes passíveis de serem encontrados no mercado, no sentido de permitir a sua utilização a qualquer pessoa. É nesse sentido que se enquadra este trabalho.



Capítulo I

O Transporte tubular



Contextualização

Os sistemas de transporte urbanos e de distribuição de água são concebidos para assegurar a repartição de água pelas pessoas em quantidade suficiente e com qualidade adequada. Desta forma, os sistemas de distribuição de água são concebidos para transmitir o fluxo exigido. Por sua vez o material utilizado nos componentes do sistema deve ser compatível com as exigências de qualidade para a água distribuída para consumo humano. (Aerial Pipeline System, 1972)

Tendo em conta que os componentes principais de um sistema de distribuição de água são as condutas, o projectista deve prestar atenção ao tipo de tubos em utilização e, em particular, aos materiais usados para a produção dos mesmos (American Society of Civil Engineers, 1996).

2. Transporte tubular

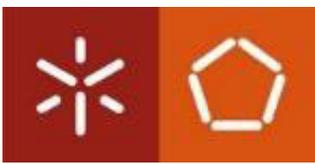
2.1 Nota histórica

As primeiras condutas da qual se tem conhecimento terão sido construídas na China por volta do ano 500 aC. A sua utilidade está ligada ao transporte de gás natural, vindo dos poços de gás, para permitir o aquecimento de água com o objectivo de lhe retirar o sal (CEPA, 2007). São de notar os diversos desenvolvimentos associados ao transporte tubular (Pipeline, 2007):

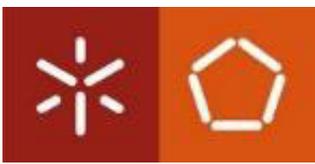
- 1859 – Ocorre a perfuração do primeiro poço de petróleo, que levou a que se começasse a usar este tipo de transporte para a deslocação de produtos petrolíferos. Em duas décadas, a produção de petróleo cresceu de tal maneira que mais de 80% do consumo mundial de petróleo era fornecido pela Pensilvânia, lugar onde teve início esta perfuração por Edwin Drake, em Titusville;

- 1863 – A primeira forma de transporte de petróleo foi a partir de barris de *whisky*, actualmente os barris de petróleo. Estes barris eram inicialmente transportados em carroças deslocadas por cavalos. Os primeiros sistemas de tubagens eram mínimos e primitivos, já que apenas eram úteis se as posições de petróleo se localizassem perto de tanques ou refinarias. Com o rápido crescimento da procura deste produto (querosene), apareceram mais poços e amplificou-se a necessidade de transportar os produtos para o mercado. Este factor leva à urgência em desenvolver e melhorar a qualidade dos sistemas de condutas;

- 1865 - Foi fabricada, a primeira conduta de madeira, com aproximadamente 14,5 km;

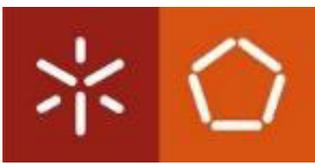


- 1879 – Vários comerciantes de petróleo, por forma fazerem face à concorrência, nos sistemas de transporte, construíram a primeira linha principal de fornecimento de petróleo chamada *Tidewater*;
- 1880 a 1905 – Nos Estados Unidos da América, os geólogos descobriram petróleo em Ohio, Oklahoma, Kansas e em Spindletop, com o primeiro verdadeiro poço de petróleo que o liberta espontaneamente. Começaram a surgir refinarias perto de campos de petróleo e novos mercados (sendo o de Rockefeller o maior deles). Até à mudança de século, o petróleo foi sendo descoberto cada vez mais para ocidente, nomeadamente Califórnia;
- 1905 – Passagem do negócio petrolífero da querosene para a gasolina. As lâmpadas de petróleo foram substituídas por lâmpadas eléctricas, reduzindo significativamente o mercado de querosene. Ao mesmo tempo, Henry Ford, com a produção em massa de automóveis, veio alterar a paisagem. Nesta fase, os sistemas de transporte tubular que levavam o crude dos grandes campos de petróleo no Texas, Oklahoma e Kansas até às refinarias existentes no oriente, começavam a atravessar o país;
- 1917 – Até à Primeira Guerra Mundial as condutas petrolíferas já percorriam a maior parte da nação;
- 1920 – Durante esta década, incitado pelo crescimento da indústria automóvel, verifica-se um crescimento da quilometragem de condutas petrolíferas, nos Estados Unidos, para mais de 185.069 km;



- 1945 – Durante a Segunda Guerra Mundial, os sistemas de produção cresceram rapidamente ao longo da costa oriental. Isto porque foram vários os petroleiros afundados nas fases iniciais da guerra, revelando alguma vulnerabilidade por parte dos Estados Unidos para tal ataque. Isto levou a que se desenvolvesse uma larga expansão do diâmetro das condutas petrolíferas terrestres que transportavam o crude e os produtos petrolíferos desde áreas, por exemplo, o Texas e Oklahoma até aos consumidores da costa oriental;
- 1950 a 1960 – O equilíbrio entre a oferta e procura modificou-se velozmente. Os Estados Unidos começaram a ser importadores de petróleo, já que tornaram-se em grandes exploradoras deste bem. As principais descobertas foram feitas em locais como Egipto, Argentina, Venezuela, Médio Oriente, Mar Cáspio, Mar da China, Mar do Norte, Oeste do Canadá e África Ocidental;
- 1970 a 1977 – No seguimento da descoberta de um campo petrolífero no Alasca, em 1968, os criadores dos sistemas de transporte tubulares encararam um desafio de construir uma conduta capaz de transportar 1,6 milhões de barris de petróleo por dia ao longo de cerca de 800 km de montanhas cobertas de neve. Em 1977 foi concluído, o transporte tubular denominado *Trans Alaska*, que chegou a transportar mais de 2 milhões de barris por dia em 1988, continuando ainda hoje a fornecer cerca de 1 milhão;
- 1970 a 1990 – As condutas foram-se tornando cada vez mais versáteis à medida que as exigências associadas às mesmas iam aumentando. Estas começaram a ser utilizadas para recolher petróleo e gás a 1 km de profundidade no oceano, transportar químicos especiais entre fábricas químicas e refinarias, transportar líquidos de gases naturais destinados ao desenvolvimento do aquecimento regional e para indústrias de olefina.

O transporte tubular permanece a desempenhar um papel fundamental na indústria do petróleo, garantindo segurança, fiabilidade e rentabilidade. Esta importância do transporte tubular surge da necessidade de continuar a fazer chegar energia, principalmente quando as populações tendem a instalar-se longe dos centros de abastecimento. Ao longo dos tempos, as condutas e os barris de madeira, tem vindo a desenvolver-se, através da implementação das últimas tecnologias nas suas operações e na sua manutenção (Aerial Pipeline System, 1972).



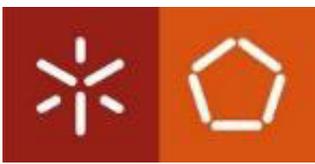
Actualmente a tecnologia continua a produzir melhores condutas com aços e modos de instalação aperfeiçoados. Para além disso, é também efectuado um controlo posterior à instalação dessas condutas, no solo e uma análise contínua à condição depois de estarem implementadas no solo. Ao mesmo tempo, as suas regulações de segurança tornaram-se mais completas, principalmente porque ao longo dos anos, a compreensão dos materiais disponíveis aumentou, assim como o aperfeiçoamento das técnicas de operação e de manutenção das condutas tubulares.



Tabela 1- Listagem de países de acordo com o comprimento total de transporte tubular nele existente¹

| Posição | País | Comprimento total do transporte tubular (km) | Percentagem de transporte tubular no mundo | Estrutura | Data de Informação |
|---------|----------------|--|--|---|--------------------|
| 1 | Estados Unidos | 793 285 | 40,48% | Produtos petrolíferos 244 620 km; Gás natural 548 665 km | 2006 |
| 2 | Rússia | 244 826 | 12,49% | Aquecimento (água quente) 122 km; Gás 158 699 km; Petróleo 72 347 km; Produtos refinados 13 658 km | 2007 |
| 3 | Canadá | 98 544 | 5,03% | Petróleo bruto e refinado 23 564 km; Gás de petróleo liquefeito 74 980 km | 2006 |
| 16 | Brasil | 22 289 | 1,14% | Aquecimento (água quente) 244 km; Gás 12 070 km; Petróleo 351 km; oil 5 214 km; Produtos refinados 4 410 km | 2007 |
| 74 | Portugal | 1 297 | 0,07% | Gás 1 098 km; Petróleo 11 km; Produtos refinados 188 km | 2007 |
| 77 | Angola | 1 220 | 0,06% | Gás 234 km; Gás de petróleo 85 km; Petróleo 896 km; Petróleo/Gás/Água 5 km | 2007 |
| | Outros países | 798 040 | 40,73% | | |
| | TOTAL | 1 959 501 | 100% | | |

¹ (Pipeline 101, 2007)



O transporte tubular abrange todas as partes que compõe a instalação física, a partir da qual os líquidos (derivados de petróleo) ou gases (dióxido de carbono, gás natural) são transportados, como as tubagens e todos os equipamentos relacionados, tais como válvulas. Fazem também parte desta instalação estações de bombagem, unidades de compressão, estações de regulação, estações de distribuição e afins (Pipeline 101, 2007),

O transporte tubular é de todos os tipos de transporte o mais eficiente e seguro no que respeita ao transporte de petróleo bruto e a gás natural, desde os campos de produção até às refinarias e fábricas de transformação. É, além disso, o mais apropriado para fazer chegar os derivados do petróleo e gás natural até aos utilizadores (CEPA, 2007).

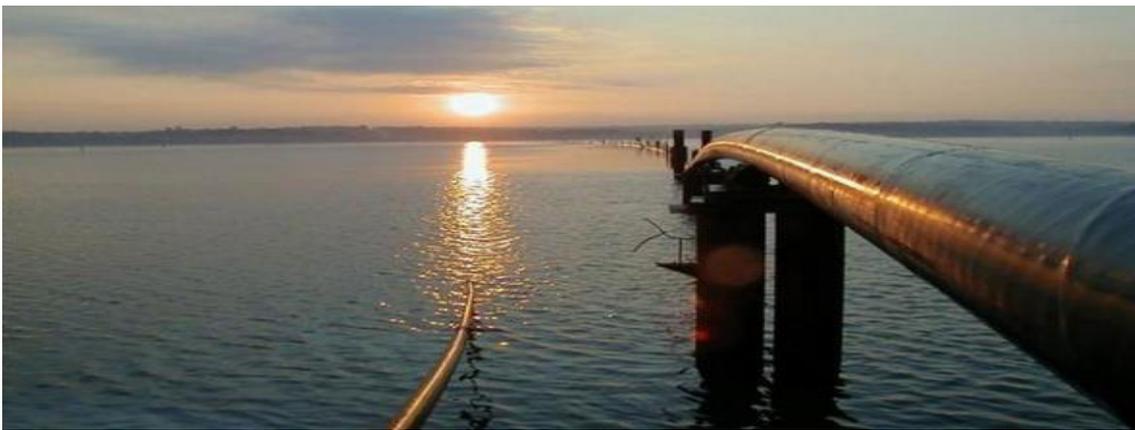
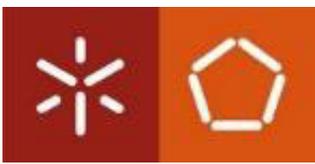


Figura 1 - Exemplo de transporte tubular

O transporte tubular representar um papel vital no quotidiano. Desde a cozinha, limpezas, trajectos do dia-a-dia, transporte aéreo e no aquecimento das nossas residências. Estes “simples” factos do quotidiano são possíveis graças às redes de distribuição de combustíveis através de tubulações, sendo a única forma exequível de transportar enormes volumes dos líquidos e gases. A utilização deste tipo de transporte permite evitar congestionamentos nas vias marítima e rodoviária, assim como acidentes que possam vir a ocorrer (PHMSA, 2009). O transporte tubular pode ser instalado em qualquer meio, terreno ou ambiente.

Existem três tipos de transporte tubular que se podem instalar: terrestre, subaquático e aéreo (Martinson, 2004).



2.2 Transporte tubular terrestre

O transporte tubular terrestre é um tipo de transporte onde o veículo utilizado constitui a própria infra-estrutura construída, que irá permitir a distribuição de, principalmente, produtos petrolíferos a longas distâncias. Isto torna-o no meio mais seguro e económico de deslocação deste tipo de produtos, ligando regiões produtoras, plataformas, refinarias, terminais marítimos e os centros consumidores. É responsável pela redução do tráfego nas rodovias e nas ferrovias, incrementando a segurança e diminuindo a poluição causada pelo tráfego (Dias, 2007).



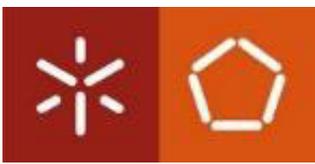
Figura 2 - Exemplo de transporte tubular terrestre

2.4 Transporte tubular subaquático

O transporte tubular subaquático é indispensável para o transporte do crude e de gases, desde os poços de petróleo e de gás no alto mar até ao transporte tubular terrestre que posteriormente transporta os produtos para as refinarias ou outras instalações (Figura 3).



Figura 3- Exemplo Transporte tubular subaquático



A sua construção é mais cara e de trabalhosa quando comparada com os transportes tubulares terrestres, na medida em que a sua construção precisa de uma embarcação onde os tubos sejam soldados uns aos outros e ligados às tubagens. À medida que as secções vão sendo soldadas até à extremidade das tubagens, a embarcação move-se em direcção ao poço de petróleo, e as partes do tubo já terminadas são continuamente rebaixadas atrás da embarcação para o mar. No mar alto, são utilizados navios em detrimento das embarcações devido às enormes ondas (Liu, 2009).

2.3 Transporte tubular aéreo

O transporte tubular aéreo é construído para suspender tubagens de largo diâmetro entre um determinado número de torres, espaçadas entre si, entre todos os tipos de terreno e em quaisquer climas (Figura 4).



Figura 4 - Exemplo de transporte tubular aéreo no Alaska

Cada uma das torres possui uma armação sob a forma de um 'A', com um cabo suspenso entre cada uma delas, por entre a abertura do meio das pernas da torre. Este cabo tem como finalidade o transporte das condutas tubulares e de outros materiais durante a construção, assim como o de transportar equipas de inspecção e de manutenção, numa fase posterior à construção. As tubagens serão então suspensas a partir das torres e estendidas através da abertura das suas pernas (Aerial Pipeline System, 1972).

Este meio de transporte não deve ser confundido com o *underground tubular transport* (UTT). Este é um meio de transporte totalmente novo, inspirado na tecnologia espacial (Figura 5) (Winkelman, 2008).

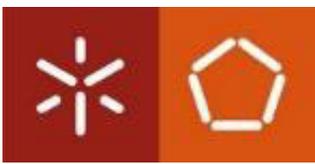


Figura 5 - Exemplo de transporte tubular subterrâneo

2.5 Componentes do transporte tubular

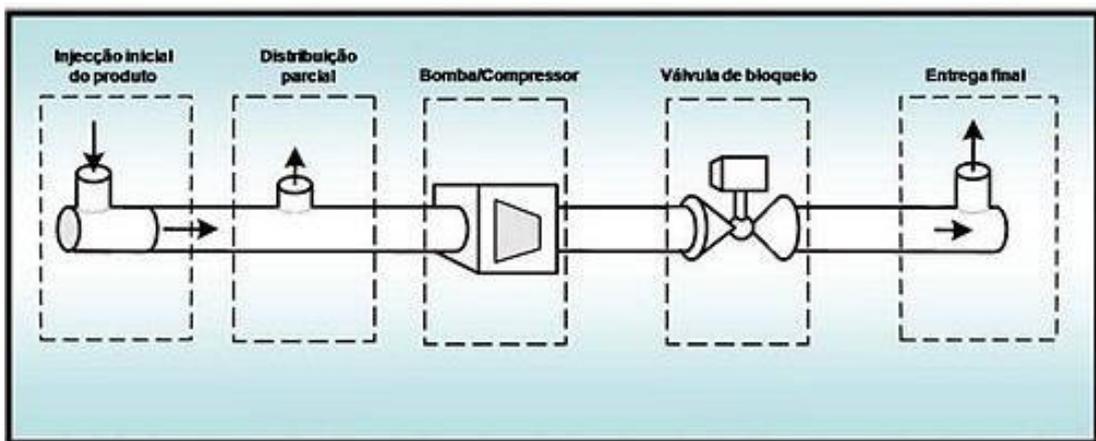


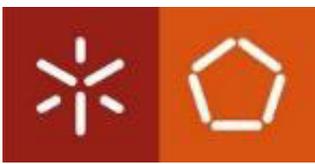
Figura 6 - Transporte Tubular: Componentes

2.5.1 Injeção inicial do produto

São estações onde é feita a introdução do produto na linha de transporte.

2.5.2 Distribuição parcial

Estações onde é feita parte da distribuição do produto.



2.5.3 Bomba/compressor

Estas estações abrigam as bombas e os compressores usados para mover o produto ao longo das tubagens (PHMSA, 2009).

2.5.4 Válvula de bloqueio

É uma válvula usada para parar o fluxo do produto através das tubagens, e isolar um segmento da rede de tubos ou um componente do sistema (PHMSA, 2009).

2.5.5 Entrega final

O trajecto do produto termina e é entregue ao consumidor.

2.6 Tipos de transporte tubular de acordo com a substância transportada

2.6.1 Petróleo – Oleoduto

Existem dois tipos de transporte tubular de petróleo: os transportes tubulares para o petróleo bruto e para produtos petrolíferos.

O primeiro é responsável por conduzir o petróleo bruto para as refinarias. O último transporta produtos refinados, como gasolina, querosene, combustível de avião e petróleo para aquecimento, desde as refinarias até ao mercado.

Diferentes tipos de petróleo bruto e produtos petrolíferos são usualmente transportados através do mesmo sistema de transporte tubular em diferentes lotes. A mistura entre os lotes é reduzida e pode ser controlada. Todo este processo é efectuado através de grandes lotes (longas colunas do mesmo tipo de produto), ou através da colocação de uma esfera de borracha cheia de ar entre os lotes de forma a separá-los (American Society of Civil Engineers, 1996).

O petróleo bruto e alguns produtos petrolíferos levados através das tubagens possuem uma pequena quantidade de aditivos com o objectivo de diminuir a corrosão interna do tubo e minimizar as perdas de energia. Os aditivos mais frequentemente usados para reduzir a corrosão são os polímeros, como óxidos de polietileno. Os oleodutos utilizam quase unicamente tubos de aço sem revestimento externo, mas com uma camada catódica exterior para minorar a corrosão externa (Liu, 2009). Tendo por base a figura 7 é mencionada a legenda por forma a compreender o funcionamento transporte tubular de produtos petrolíferos (American Society of Civil Engineers, 1996).

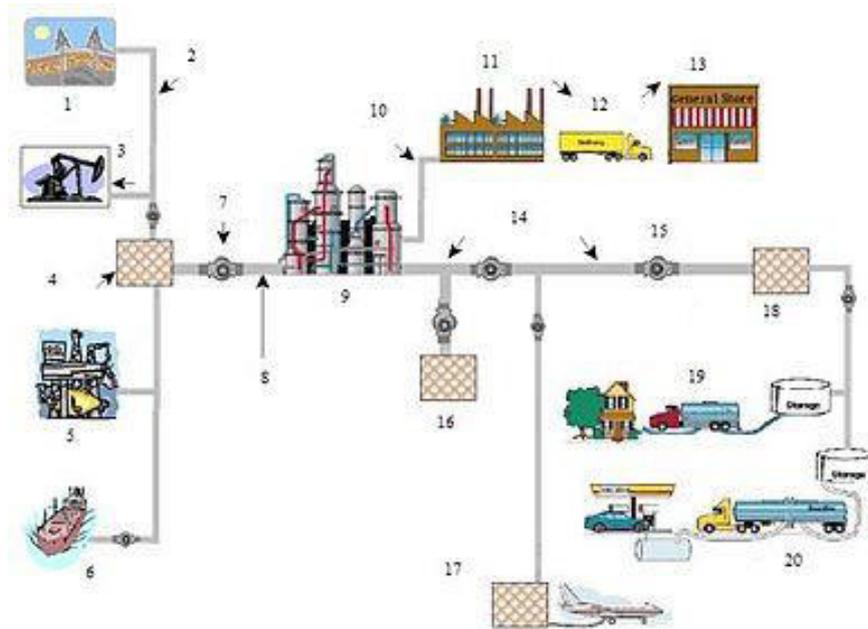


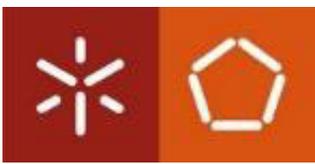
Figura 7 - Transporte tubular para produtos petrolíferos (American Society of Civil Engineers, 1996) ²

2.6.2 O crescimento do mercado do petróleo

A dimensão do mercado para a construção de petróleo e de gás canalizado registaram um crescimento exponencial antes da crise económica em 2008. A indústria cresceu de US \$ 23 bilhões em 2006 para 39.000 milhões dólares em 2008. Depois da redução drástica em 2009, a procura pela expansão de gasodutos aumentou, já que a produção de energia cresceu. Em 2012 foram aproximadamente 51.200 km de ductos projectados, ou já em construção, na América do Norte (PHMSA, 2009).

² Legenda da Figura:

1- Crude proveniente de poços existentes nos solos; 2 – Sistemas tubulares; 3-Bomba “alavanca”; 4-Instalações de armazenamento e tratamento de crude; 5-Crude proveniente de plataformas marítimas; 6-Crude transportado por navios tanque (petroleiros); 7- Estação de bombagem; 8-Tubulações de transmissão de crude; 9- Fábricas químicas e refinarias; 10- Químicos e matérias-primas; 11-Fábricas; 12-Entregas de produtos; 13-Vendas e grosso e a retalho; 14- Tubagens de distribuição de produtos refinados; 15- Estações de bombagem; 16-Armazenamento do produto a granel; 17-Instalações de armazenamento para utilização directa, tas como aeroportos; 18- Instalações de armazenamento do produto a granel: terminal de distribuição; 19-Distribuição de produtos petrolíferos para aquecimento de zonas habitacionais; 20-Distribuição local de gasolina.



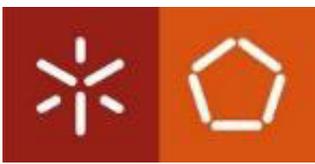
2.6.3 Construção e operação

Os oleodutos são compostos por aço ou tubos de plástico com diâmetro interno tipicamente entre 4-48 polegadas (100 a 1.220 milímetros). A maioria dos ductos são normalmente enterrados a uma profundidade de cerca de 0,91 a 1,83m. Uma diversidade de métodos podem ser aplicados para a protecção dos tubos de impacto, abrasão, corrosão, entre outros. Estes podem incluir deposição de ripas de madeira, revestimento em betão, *rockshield*, polietileno de alta densidade, estofamento de areia e máquinas de enchimento (Winkelman, 2008).

O óleo é mantido em movimento através de estações de bombagem ao longo da tubagem, fluindo, normalmente, a uma velocidade de 1-6 metros por segundo.

As condutas de multiprodutos são usados para a deslocação de dois ou mais produtos diferentes em sequência no mesmo *pipeline*. Normalmente em *pipelines* multiprodutos, não há divisão física entre os diferentes produtos. É frequente, ocorrer uma mistura de produtos adjacentes, originando uma interface, conhecida na indústria por *transmix*. Nas instalações de recepção desse interface, é usualmente absorvido um dos produtos com base em taxas de absorção pré-calculadas. De forma alternativa, os *transmix* podem ser desviados e enviados para instalações de separação dos produtos misturados (Winkelman, 2008).

O petróleo bruto tem quantidades variáveis de cera de parafina, podendo levar a quem, em climas mais frios possa ocorrer acumulação de cera no interior de um gasoduto. Frequentemente, essas condutas são inspeccionadas e limpas através de raspagem, utilizando-se, para tal, dispositivos conhecidos como *PIG* 's que executam um conjunto de operações de manutenção no oleoduto. Estes dispositivos são também conhecidos como *scrapers* ou *Go-devils* e são utilizados para detectar irregularidades no tubo como deformações, perda de metal causada pela corrosão, ranhuras ou outros danos físicos. Estes aparelhos são lançados através *PIG launcher* 's e viajam através do gasoduto até serem recebidos numa outra estação a jusante de forma a, provavelmente, limpar depósitos de cera e materiais que se possam ter acumulado dentro da linha, ou inspeccionar e registar a condição da linha. Adiante aprofundar-se-á este tópico.



2.6.4 Gases – Gasoduto

A maioria dos transportes terrestres de gás natural são produzidos através de gasodutos, pois o transporte realizado de outras formas, tais como camião ou comboio, seria bem mais perigoso e dispendioso. Embora os gasodutos de recolha e transmissão sejam feitos em aço, a maioria dos gasodutos de distribuição (ou seja, pequenos gasodutos que interligam as principais redes de gasodutos e os consumidores) fabricados nos Estados Unidos desde 1980, são compostos por plástico flexível, fáceis de estabelecer e não corrosivos (Liu, 2009). A figura 8 representa todo o percurso que é feito pelos gases até chegarem aos consumidores.

A legenda da figura 8 descreve a sequência do transporte tubular no caso do gás natural:

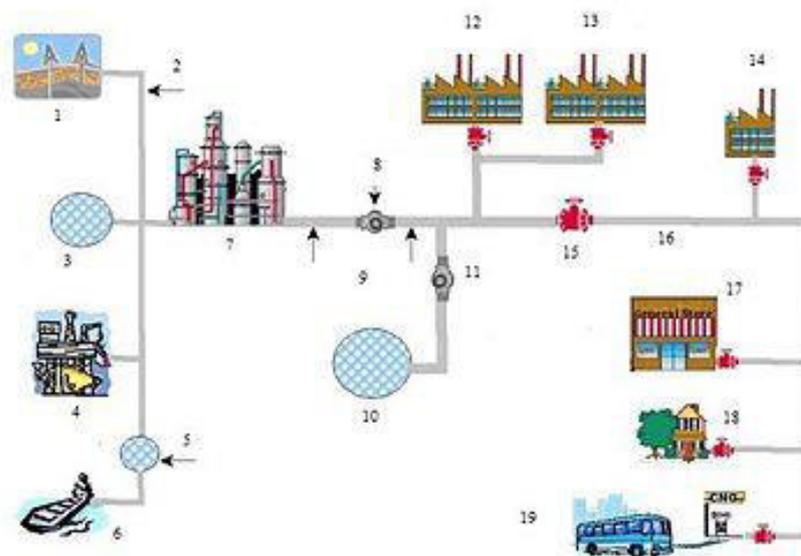
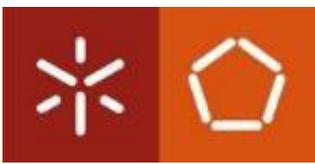


Figura 8 – Transporte tubular para gás natural³

³ Legenda da Figura:

1-Gás natural proveniente dos poços existentes no solo; 2-Sistemas tubulares; 3-Instalações de armazenamento de gás; 4-Gás natural proveniente de plataformas marítimas; 5-Instalações de armazenamento e de tratamento de gás natural liquefeito; 6-Gás natural liquefeito transportado por navios tanque; 7-Fábricas de processamento e de tratamento do gás; 8-Estações de compressão; 9-Tubulações de transmissão do gás natural; 10-Instalações de armazenamento de gás; 11-Estações de compressão; 12-Instalações de produção de energia eléctrica; 13-Clientes com grande poder industrial; 14-Pequenas fábricas; 15-"Portões" da cidade; 16-Distribuição local de gás natural; 17-Clientes comerciais; 18-Consumidores em zonas habitacionais; 19-Abastecimento a veículos movidos a gás



2.6.5 Construção e operação

No que toca ao gás natural, os oleodutos são fabricados em aço ao carbono e variam em termos de tamanho entre os 51 a 1,524 milímetros de diâmetro, variando de acordo com o tipo de tubagem. O gás é pressurizado por estações de compressão e é inodoro, excepto se for combinado com um odorante, se exigido por um órgão regulador (Civil, 2007).

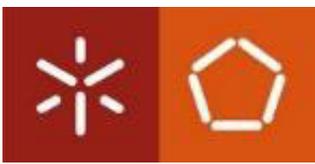
2.6.6 Amoníaco

O amoníaco é altamente tóxico, sendo, teoricamente, a substância mais perigosa de ser transportada através condutas longas. Contudo, não são frequentes incidentes no que respeita este tipo linhas de transporte. O mesmo já não se verifica nos equipamentos industriais de processamento associados.

Um dos maiores e principais oleodutos de transporte de amoníaco é a linha ucraniana *Transammiak*, que faz a ligação entre a estação de *TogliattiAzot* na Rússia para o porto de exportação do Mar Negra em Odessa (Figura 9) (American Society of Civil Engineers, 1996).



Figura 9 - Maior conduta do mundo de transporte de amoníaco



2.6.7 Combustíveis alcoólicos

Os pipelines têm sido utilizados para o transporte de etanol na América do Sul e existem vários projectos de ductos de etanol no Brasil e nos Estados Unidos (Civil, 2007).

As principais questões relacionadas com o transporte de etanol por ductos são a sua natureza corrosiva e a propensão em absorver água e impurezas em ductos, problemas que não acontecem no caso do petróleo e o gás natural. Outras limitações na construção de ductos de etanol são os volumes escassos e as relações custo-efectividade (Subterra - Effective solutions, Total capability., 2003).

2.6.8 Carvão e minério

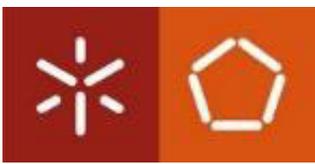
Minero-ductos são vulgarmente utilizados para a deslocação do carvão ou minério das minas. O material a ser transportado é combinado com água antes de ser introduzido no oleoduto. Na outra extremidade o material deve ser seco. Um exemplo é o minero-ductos de 525 km que está previsto para o transporte de minério de ferro da mina de Minas-Rio (produzindo 26,5 milhões de toneladas por ano) (Raposo M. J., 2008).

2.6.9 Água

O transporte de água por sistemas tubulares têm sido uma solução a ponderar pelas comunidades e países, que estão a ser solicitados para investigar alternativas de recursos hídricos, principalmente porque cada vez é maior o decréscimo de fontes de água e o rápido crescimento da população humana.

As tubulações bombeiam a água desde uma fonte e transferem-na ao longo de grandes distâncias para as áreas pretendidas. O objectivo é o de transportar águas superficiais ou subterrâneas, sem provocar erosão, minimizando as possibilidades de evaporação. Estas secções tubulares possuem um largo diâmetro e podem fornecer água para populações e indústrias a curtas e longas distâncias. Além disso, podem ser instaladas no subsolo ou à superfície e utilizadas para o transporte de água doce e escoamento de águas residuais. A água é transportada ao longo das tubagens com a ajuda de bombas e da força da gravidade (Suppes, 2004).

Na engenharia moderna da água, enquanto as tubagens de cobre são usadas para a canalização interior, as de grande diâmetro, e sujeitas a elevadas pressões de água, podem utilizar



aço, ferro fundido ou betão. Quando são utilizados tubos metálicos para transportar água potável, o interior do tubo tem na maioria das vezes, um revestimento de plástico ou de cimento por forma a evitar a ferrugem. Contudo, este facto pode levar a uma deterioração da qualidade da água. O exterior dos tubos metálicos é revestido com um produto de asfalto e são isolados de modo a reduzir a corrosão, associada ao contacto com certos solos (Liu, 2009).

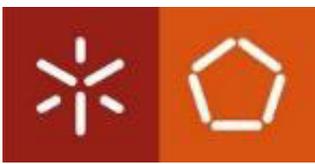
2.6.10 Hidrogénio

Para ser possível o ser transporte na terra, na forma gasosa, devido a motivos económicas, o hidrogénio terá que ser compactado. O seu transporte pode ser realizado através de um gasoduto que une as instalações generativas com as estações de recepção do hidrogénio.

Actualmente existem nos Estados Unidos da América, aproximadamente 1.000 km de gasodutos utilizados para o transporte de hidrogénio. Existem algumas preocupações técnicas com o hidrogénio que não existem com o gás natural ou com o petróleo, nomeadamente o potencial do hidrogénio para deformar o aço e as soldaduras utilizadas para fabricar as tubagens. Outros potenciais obstáculos referem-se à importância em melhorar a tecnologia e as técnicas de controlar as fugas e as infiltrações que possam surgir. O baixo peso molecular do hidrogénio faz com que as fugas no equipamento sejam de difícil controlo. Ainda mais se pode acrescentar, na medida em que o hidrogénio também leva a preocupações de segurança especiais.

A baixa energia de activação do hidrogénio, e a vasta gama de concentrações de hidrogénio no ar, podem levar a que surjam explosões se os equipamentos possibilitarem algum tipo de fuga. Apesar de todas estas inquietações serem semelhantes na terra e no mar, o perigo de explosão é significativo somente em espaços reduzidos. Mesmo sabendo que estes problemas não são insuperáveis, continuam a levar a aumentos no custo de produção, armazenagem, entrega e utilização do hidrogénio.

Actualmente estão a ser realizadas investigações para encontrar soluções mais baratas e flexíveis para o manuseio do hidrogénio.

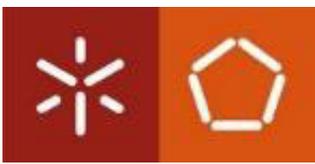


2.6.11 Etanol

O volume de etanol utilizado nos dias actuais, no que se refere ao transporte, é relativamente reduzido quando comparado com a gasolina utilizada no mercado. A solução menos dispendiosa para a distribuição do etanol é o transporte tubular. No entanto, existem alguns assuntos que delimitam a utilização frequente deste tipo de transporte. Por exemplo, a água tem afinidade com o etanol, e por consequência, terá que se ter cuidado em preservar a água fora das tubagens. Outro aspecto a considerar é o facto do etanol ser um melhor solvente do que a gasolina. Para além disto, o etanol possui um elevado grau de corrosão, o que poderá encurtar a vida de um sistema de transporte tubular (Ethanol, 2009).

2.6.12 Cerveja

Os bares no Veltins-Arena, um grande estádio de futebol em Gelsenkirchen, Alemanha, estão ligados por 5 km de tubagens transportadoras de cerveja. É o método preferido para distribuição de cerveja em estádios tão grandes, uma vez que os bares têm que superar grandes discrepâncias na procura durante as várias fases de um jogo; isto possibilita um fornecimento através de reservatório central (Machado, 2005).



2.7 Tipos de transporte tubular de acordo com a sua finalidade

No geral, os sistemas de transporte tubular podem ser classificados em três categorias, de acordo com a sua finalidade (Aerial Pipeline System, 1972).

2.7.1 Amontoado de tubulações (gathering pipelines)

Define-se como um grupo de pequenas tubulações interligadas compondo redes complexas, com o intuito de transportar o crude e o gás natural das proximidades de diferentes poços, para as instalações de tratamento. Neste grupo, as tubulações são na maioria das situações curtas e com pequenos diâmetros. Também as condutas de recolha de produto provenientes das plataformas em águas profundas são descritas como um amontoado de tubulações (Aerial Pipeline System, 1972).

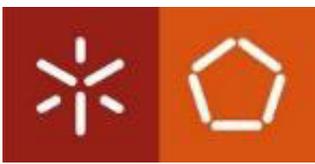
2.7.2 Tubulações de transporte

Particularmente longas e com diâmetros consideráveis, que transportam produtos (petróleo, gás, produtos petrolíferos) entre cidades, países e até mesmo continentes. Estas redes de transporte abrangem estações de compressão nas linhas de transporte de gás, ou estações de bombeamento no caso do petróleo ou produtos petrolíferos (Aerial Pipeline System, 1972).

2.7.3 Tubulações de distribuição

Estas são formadas por diversas tubulações interligadas com pequenos diâmetros, usadas para levar o produto ao consumidor final, sendo, por isso linhas de distribuição do produto para residências e empresas.

As condutas em terminais de distribuição de produtos para os reservatórios e instalações de armazenagem estão também incluídas neste grupo (Aerial Pipeline System, 1972).



2.8 Movimentação dos produtos aquando do transporte tubular

Independentemente do caudal, os líquidos nas tubagens movem-se em lotes diferenciados. Isto porque todos os lotes movem-se à mesma velocidade (de quatro a oito quilómetros por hora para líquidos) e por isso não se misturam, excepto quando entram mesmo em contacto, mas nestas situações, estes pequenos volumes podem ser reprocessados (Machado, 2005).

Raramente existem lotes fisicamente separados por metais ou plásticos. Os volumes de gás natural não se deparam separados por lotes. Estes movem-se pelo interior das tubagens sensivelmente a quarenta quilómetros por hora. Ao longo do sistema de transporte tubular são, estrategicamente, aplicadas bombas ou compressores para deslocar os líquidos ou o gás natural, respectivamente. Estas instalações são fundamentais por causa das perdas de energia por parte da fricção (CEPA, 2007).

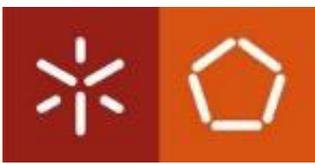
2.9 Construção

As companhias de transporte tubular estão atentas ao crescimento e às necessidades de energia, para desta forma poderem projectar onde e quando, surgirão oportunidades para transportar produtos energéticos (PHMSA, 2009).

Um ponto importante é a discussão dos passos envolvidos na colocação de novos sistemas de transporte tubular, para que estes possam acompanhar os crescimentos populacionais, assim como as necessidades comerciais e industriais. O planeamento da capacidade de transporte das tubagens deve começar, antes de qualquer deslocação de petróleo ou de qualquer outro produto petrolífero, ou até mesmo a mínima quantidade de gás (Raposo M. J., 2008).

As companhias de transporte tubular devem definir as possíveis rotas para as novas tubagens, adquirir os direitos de passagem para ser passível de construção, operar e manter os sistemas de transporte, transformar as actuais plantas de sistemas tubulares e instalar as tubagens.

Todo o processo está sujeito a regulamentações, normas e aprovações, e a construção apenas poderá começar após a selecção da rota receber aprovação regulamentar, assim como após os direitos de passagem terem sido obtidos e a planificação do sistema estar completa. Independentemente do comprimento da rede de tubagens, o processo de construção deve ser cuidadosamente planeado, de modo a assegurar a segurança e integridade das novas tubulações. De certa forma, a instalação de uma conduta pode ser vista como um processo de uma linha de



montagem, com as secções das tubagens a serem concluídas em sequências de passos repetitivos (PHMSA, 2009).

2.9.1 Etapas de construção

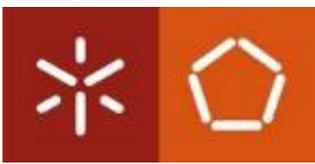


Figura 10 – Seguindo da esquerda para a direita e para baixo: Desbaste do local; Vala para instalação do sistema; Revestimento da tubagem; Tubulações

2.9.2 Selecção da rota

A construção de um sistema de transporte tubular requer um planeamento cuidadoso, seguido de consulta e preparação. As empresas devem definir a procura e assegurar suporte aos clientes antes de investirem num projecto.

Após se tomar a decisão de avançar com o projecto, a entidade deverá avaliar rotas alternativas para o sistema de transporte tubular, seleccionando no fim, uma proposta de rota. Assuntos como, quais as populações que precisam deste serviço, qual o tamanho das tubagens que será necessário, quais os recursos naturais que poderão ser afectados, que áreas ambientais e habitacionais poderão a vir a ser intersectadas e que outros sistemas se encontram ao longo da rota escolhida, são alguns dos aspectos que estão incluídos no processo. A população e as diligências governamentais são consultadas, ao longo da rota proposta, através de avisos e reuniões públicas. São realizadas avaliações ao ambiente e ao solo, que podem resultar em ajustamentos à rota do



sistema de transporte tubular inicialmente proposto. Terminada a selecção da rota, o terreno é adquirido por compra ou licença, em conjunto com o direito de passagem. Por fim, uma série de processos regulamentares devem ser concluídos (Dias, 2004).

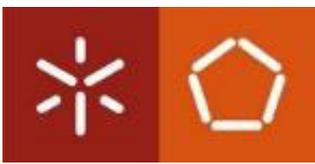
2.9.3 Regulamentação do processo

Uma vez analisada a rota proposta pela empresa de distribuição, são analisadas uma série de rotas alternativas, que possam reduzir os estragos ao meio ambiente. O impacto nos edifícios, culturas, abastecimento de água, solo, vegetação, fauna, qualidade do ar, ruído, segurança, entre outros, são considerados. A partir do instante em que se termina o projecto, se este não tiver nenhum impacto significativo no ambiente, o projecto, avança rapidamente. No entanto, se a informação obtida for de que o projecto trará um impacto ambiental significativo, então é necessário elaborar um estudo mais profundo desse impacto ambiental, até que todos os esforços sejam revistos e aprovados antes de se poder avançar (Winkelman, 2008).

2.9.4 Concepção

Existem muitas diferenças significativas entre os sistemas de transporte tubular para líquidos perigosos e para os de gás natural. Estas diferenças englobam a concepção dos sistemas, os materiais e componentes utilizados, segurança e factores ambientais, e uma série de outros tópicos. Além disso, todo um sistema de transporte tubular pode ser curto – como por exemplo, a ligação de uma área de produção com uma refinaria ou com uma instalação de tratamento – ou pode ser muito longa, compreendida entre a costa do Texas e uma cidade do nordeste (Winkelman, 2008).

As secções das condutas tubulares são fabricadas em laminadores de aço e inspeccionadas de modo a garantir que estas cumpram as normas de segurança públicas e industriais. Possuem geralmente entre 12 e 24 metros de comprimento, e são projectados especificamente para a sua localização no gasoduto/oleoduto. Uma variedade de condições do solo, condições geográficas e de características da população existente no percurso irá determinar diferentes requisitos para o tamanho das secções tubulares, espessura das paredes e materiais de revestimento (Winkelman, 2008).



2.9.5 Preparação do local

Para começar a construção do percurso seleccionado, a rota do sistema de transporte tubular precisa ser “limpa”. O trabalho de construção e a passagem do equipamento requer que, temporariamente, o espaço de trabalho utilizado vá para além do espaço pré-definido para a construção do transporte tubular. A utilização temporária deste espaço adicional é negociada com o proprietário do terreno. Uma equipa de inspecção examina e limita cuidadosamente os acordos da construção para assegurar que apenas o espaço de construção é “limpo”. De seguida, de modo a garantir uma adequada área de trabalho, uma equipa de limpeza e de nivelamento do solo, prepara o corredor para que os equipamentos de instalação das condutas possam trabalhar em segurança, como foi demonstrado anteriormente na figura 10. Esta equipa remove árvores, rochas, arbustos e outros impedimentos que possam obstruir a construção. Instala também vedações de sedimentos ao longo das bordas de fluxos de água e zonas húmidas, de maneira a prevenir a erosão em solos perturbados. As árvores que estão no interior da passagem das condutas são cortadas, e a madeira é removida ou então empilhada ao longo da passagem (PHMSA, 2009) (Winkelman, 2008).

2.9.6 Disposição em série das tubagens

Depois das zonas de passagem das condutas terem sido suficientemente limpas, de modo a permitir o acesso ao equipamento de construção, as secções das tubagens são dispostas ao longo das valas. Estas secções são fabricadas em laminadores de aço e posteriormente inspeccionadas de modo a garantir que estes cumpram as normas de segurança da indústria. São frequentemente fabricadas em tubos de 12 metros a 24 metros de comprimento. A sua concepção e fabrico são especificamente seleccionados para a sua localização no gasoduto/oleoduto. Isto deve-se à grande variedade de requisitos que o sistema pode possuir, sendo eles: o tamanho das tubagens, a espessura da canalização, o material de revestimento, devido a diferentes condições do solo, características geográficas ou à proximidade de zonas populacionais.

Os tubos podem ser transportados a partir da fábrica ou estaleiros mais próximos do local onde será instalado o gasoduto/oleoduto, ou directamente para as zonas de passagem das condutas. Após a entrega das secções tubulares, uma equipa de trabalhadores distribui cuidadosamente as várias secções de acordo com o plano de instalação, como demonstrado pela figura 11.

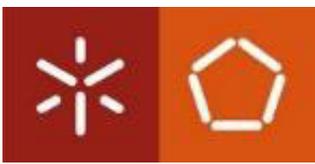


Figura 11 - Instalação de conduta para transporte tubular

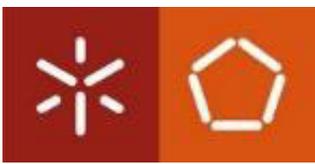
2.9.7 Abertura das valas

Em seguida, é cavada uma vala ao longo da zona de passagem das condutas (Figura 11). Geralmente são utilizados equipamentos mecânicos para abrir as valas. Ocasionalmente poderão vir a ser usadas perfurações ou até mesmo explosivos, de forma controlada, para quebrar rochas.

À medida que o material vai sendo retirado durante a escavação, vai sendo temporariamente armazenado sobre um dos lados da vala. Este material será utilizado novamente no enchimento da vala. As valas são escavadas a uma profundidade suficiente para permitir um montante adequado de cobertura quando as tubagens estiverem enterradas (American Society of Civil Engineers, 1996).

Os regulamentos exigem que as tubulações estejam enterradas pelo menos 30 centímetros abaixo da superfície em zonas rurais, e mais profundas ainda em áreas populacionais. Além disso, o sistema tubular deve ser enterrado mais fundo em alguns locais, como em cruzamentos de rodovias e cruzamentos de massas de água, como também pode ser menor noutros locais, tal como quando é instalado em rocha consolidada.

A profundidade de enterro do sistema tubular deve estar de acordo com os regulamentos de segurança (American Society of Civil Engineers, 1996).



2.9.8 Curvatura

Uma máquina de dobragem é utilizada no terreno para fazer ligeiras curvas em cada uma das secções da tubagem, de modo a garantir a conformidade quando surgem alterações na rota do gasoduto/oleoduto. A máquina de dobragem utiliza uma série de fixadores e a pressão hidráulica para fazer curvaturas lisas e suaves nas tubagens.

Todo o processo de curvatura é realizado em perfeita conformidade com as normas prescritas de modo a assegurar a integridade da curva. Muitas vezes, estas configurações devem ser anteriormente determinadas. São pré-fabricadas em locais específicos e depois trazidas para o local onde serão instaladas.

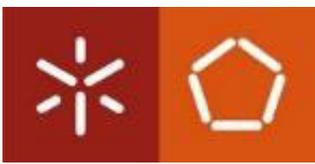
2.9.9 Soldadura (junção das secções tubulares)

Para realizar o processo de soldadura, as secções tubulares estão temporariamente apoiadas e alinhadas ao longo das bordas da vala. As várias secções são então soldadas umas às outras, formando um sistema tubular contínuo, usando procedimentos de soldadura manuais, semiautomáticos ou automáticos, como nos mostra a figura 11.

Todos os procedimentos de soldadura são qualificados e controlados de acordo com especificações restritas, incluindo os procedimentos semiautomáticos e automáticos. Cada vez mais, em projectos de grande dimensão, a soldadura automática é usada em detrimento da soldadura manual. Como parte do processo de garantia de qualidade, cada soldador terá que passar por testes de qualificação para poder trabalhar numa determinada tarefa do sistema tubular, e cada procedimento de soldadura tem que estar aprovado, para o uso naquela tarefa, em concordância com as normas de soldadura adoptadas

Cada soldador terá que completar várias soldaduras usando o mesmo tipo de tubagens que irão ser usadas no projecto. As soldaduras são depois avaliadas, colocando as secções soldadas numa máquina que medirá a força necessária para puxar a parte soldada.

Um aspecto interessante de notar é que a solda é realmente mais forte do que a própria tubagem. Um segundo nível de garantia de qualidade diz respeito à qualidade do percurso de operação de soldadura. Para isto, técnicos qualificados recorrem ao raio-X das soldas das tubagens para garantir que estas cumprem as normas de qualidade prescritas. Se quaisquer falhas forem detectadas, a solda é reparada e é feita uma nova solda. Outra forma de inspecção da qualidade de soldadura emprega a tecnologia ultra-sónica.



2.9.10 Revestimento

Após a análise, geralmente através de raio-X, um revestimento é aplicado sobre as áreas soldadas nas extremidades das tubagens de modo a prevenir a corrosão. Este revestimento é aplicado ao tubo durante o seu fabrico, porém, este processo normalmente deixa as extremidades do tubo não revestidas de modo a permitir as soldaduras. Antes da aplicação do revestimento, o tubo “despido” é completamente limpo para remover qualquer sujeira ou detritos. Depois da sua aplicação, as tubagens são deixadas a secar e antes mesmo de serem rebaixadas até à vala, todo o revestimento dos tubos é inspeccionado para garantir que está livre de defeitos.

2.9.11 Rebaixamento

Uma vez soldado e revestido, o gasoduto/oleoduto é rebaixado até à vala (Figura 11). O rebaixamento é feito com vários equipamentos de construção especializados. Estes equipamentos funcionam conjuntamente para levantar e baixar os segmentos já montados do gasoduto/oleoduto até à vala, de uma forma calma e uniforme para evitar o dano das tubagens. Uma vez rebaixado o gasoduto/oleoduto para a vala, esta é calmamente soterrada, para garantir que as tubagens e os seus revestimentos não sejam danificados. Para isso é geralmente utilizada uma máquina retro escavadora, dependendo da composição do solo.

Em áreas onde o solo é rochoso, o material de cobertura das tubagens é rastreado para remover as rochas ou então as tubagens são cobertas com um material, de modo a protegê-las de rochas afiadas e do atrito. Alternativamente, uma cobertura limpa pode ser usada para cobrir as tubagens. Uma vez que as tubagens estejam suficientemente cobertas, o solo e as rochas grosseiras podem vir a ser usadas para completar a cobertura.



2.9.12 Testes

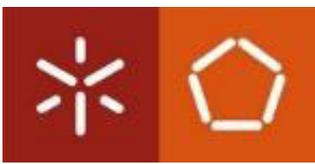
Geralmente, mas com algumas excepções, todos os sistemas de transporte tubular de gás natural e de líquidos perigosos devem ser hidrostaticamente testados antes de serem colocados em serviço. O objectivo deste teste de pressão hidrostática, passa por eliminar qualquer defeito que possa ameaçar a capacidade do gasoduto/oleoduto em sustentar a sua pressão máxima de funcionamento, ou para determinar que não existem defeitos. As tubagens são projectadas para uma dosagem especificada de pressão.

Os testes sobre a pressão hidrostática consistem em encher as tubagens com água e aumentar a pressão interna para um nível superior ao nível previamente projectado. As tubagens que não possam suportar a pressão irão falhar. Após a detecção de tais falhas, os defeitos são reparados, ou a secção do gasoduto/oleoduto afectada é substituída e o teste reiniciado até que não sejam encontradas quaisquer falhas. Existem outros testes para além do da hidrostática, este não é o único meio para detecção de defeitos no tubo. Também o teste da corrosão é muitas vezes utilizado. Contudo, o teste hidrostático é um método aceitável para demonstrar a adequação de um sistema de transporte tubular para um determinado serviço.

2.9.13 Restauração do local

Finalmente, todo o local de construção é restaurado tão próximo quanto possível das suas condições iniciais.

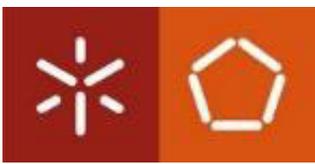
Dependendo da localização e das circunstâncias, isto poderá levar a um nivelamento da área de construção, reparação de sistemas de rega, aplicação de fertilizantes ou outras acções que possam vir a ser necessárias. Os locais de passagem do transporte tubular são cuidadosamente regularizados e, em áreas montanhosas, são instaladas medidas de prevenção contra a erosão. Materiais de pedra



e de madeira são também, algumas vezes, instalados ao longo de terras húmidas para estabilizar os solos e conservar os habitats para construções seguintes.

2.10 Acidentes relacionados com tubagens

- 9 de Abril, 2009 – um gasoduto explodiu no Turquemenistão interrompendo as exportações de gás para a Rússia. Funcionários vieram confirmar que o acidente não teria impacto sobre os clientes na Europa (Shanghai, 2009);
- 5 de Março, 2008 – cerca da 1:39, uma explosão de gás natural destruiu uma residência em 171 Mardi Gras Drive em Plum Borough, na Pensilvânia, matando um homem e ferindo gravemente uma menina de 4 anos de idade. Duas outras casas foram destruídas e 11 ficaram danificadas;
- 27 de Outubro, 2004 – cerca das 11:15 uma tubagem com cerca de 20 centímetros de diâmetro, rompeu perto de Kingman, Kansas, e foram libertados cerca de 772 140 litros de amoníaco de anidro. Ninguém foi morto ou ferido devido ao derramamento. O amoníaco de anidro derramado num riacho matou mais de 25 000 peixes, incluindo algumas espécies em via de extinção;
- 13 de Dezembro, 2005 – por volta das 9:26, um edifício de apartamentos em Bergenfield, New Jersey, explodiu depois do gás natural ter entrado no edifício por tubagens danificadas. Três habitantes do edifício foram mortos e quatro ficaram feridos sendo depois levados para os hospitais;
- 21 de Agosto, 2004 – cerca das 8:54, uma explosão de gás natural destruiu uma residência na 48 Woodland Lane em Dubois, Pensilvânia. Os dois residentes foram mortos neste acidente;
- 4 de Julho, 2002 – às 2:12, ocorreu uma ruptura numa tubagem de aço com 83 centímetros de diâmetro rompeu a oeste de Cohasset, Minnesota. Cerca de 953 820 litros de petróleo bruto foram derramados como resultado dessa ruptura. Não ocorreram mortes nem ferimentos como resultado deste acidente;
- 10 de Junho, 1999 – por volta das 15:28, ocorreu uma ruptura numa tubagem de aço de 40 centímetros de diâmetro, libertando cerca de 897 045 litros de gasolina num riacho que atravessa



Whatcom Falls Park em Bellingham, Washington. Dois rapazes de 10 e outro de 18 anos de idade morreram em resultado do acidente. Oito outras lesões foram documentadas (PHMSA, 2009).

3. A relevância do material na concepção de condutas

A selecção dos materiais na concepção de condutas visa adequar respostas a constrangimentos de carácter económico e técnico. Estas respostas observam os diversos contextos de aplicação que por sua vez influenciam:

- A mobilidade;
- A instalação (manuseamento e acessibilidade);
- As características físicas (peso, diâmetro, comprimento, revestimento, rugosidade interna);
- A resistência às pressões (interna e externa);
- A perda de carga;
- Os encargos financeiros.

O fabrico de condutas explora essencialmente três materiais:

- Metálicos (aço macio com e sem costura; ferro fundido cinzento/dúctil);
- Cimento (betão armado e fibrocimento);
- Plásticos (Polietileno de alta densidade – PEA; polietileno de baixa densidade - PEB; cloreto de polivinilo – PVC; poliuretano reticulado – PEX).

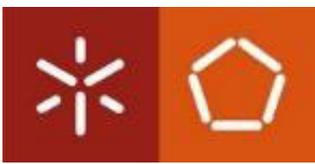
3.1 Aço maciço (com e sem costura)

Diâmetros nominais comercializados:

- 15, 20, 25, 32, 40, 50, 65, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 800, 1200 e 1600 [mm].

O encargo financeiro significativo condiciona a execução de adutoras com tubos de aço maciço, sendo determinante, a tipologia de instalação (diâmetros, pressões, transporte/contenção) e o contexto da implementação.

Importa na instalação do tubo em aço com costura recta, observar as tolerâncias dimensionais específicas face aos constrangimentos associados ao alinhamento, circunferência, cilindridade e ao tratamento da extremidade final (Aerial Pipeline System, 1972). A



perpendicularidade das extremidades finais dos tubos em relação ao eixo longitudinal é obrigatória para existir uma transferência homogênea das forças, quer durante ou mesmo até após a montagem. Existe ainda a possibilidade dos segmentos de tubo em aço poderem ser unidos através de soldadura localizada. (Argent, Pecknold, and HajAli, 1995)

A corrosão constitui outro aspecto a observar, sendo minimizada com os revestimentos que, reduzem ainda, os malefícios da fricção na superfície do material. Os revestimentos (internos ou externos) aplicados no processo de fabrico ou durante a instalação apresentam diversa tipologia (cimento com polímero, epoxy ligada por fusão, epoxy líquida, entre outros produtos que visam garantir uma superfície dura e lisa). O risco de danos nos revestimentos aplicados nos cordões de soldadura implica a definição de procedimentos específicos a contemplar na montagem.

Consideram-se vantagens do revestimento: a flexibilidade, longa duração, a elevada resistência a pressões internas e, acima de tudo, grande resistência mecânica. As desvantagens assentam sobretudo no encargo financeiro, além do facto de necessitar de protecção catódica e de revestimentos internos (plásticos, cimento) e/ou externos (betuminosos, asfálticos, etc.) dada a fraca resistência às corrosões internas provocadas pela agressividade da água (Raposo M. J., 2008).

3.2 Ferro fundido

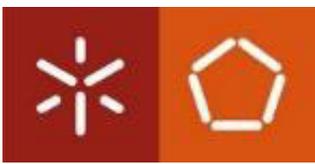
Diâmetros nominais:

- 60, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1400, 1500, 1600 e 1800 [mm].

Amplamente utilizado em sistemas de abastecimento de água face à grande resistência à corrosão.

Os tubos de ferro fundido são utilizados maioritariamente em aplicações sujeitas a altas pressões (Carpenter and Croxton, 1995):

- Águas residuais, sistemas de água potável, águas das tempestades, entre outros. Os tubos são conectados através de ligações de encaixe;
- Foram desenvolvidas normas pela ASTM e AWWA. As extremidades finais dos tubos devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal de modo a haver uma transferência uniforme das forças utilizadas na montagem (PHMSA, 2009).



Usualmente a gama de fabrico é para a pressão nominal de 10 daN/cm² podendo abranger outras pressões de serviço reforçando a espessura do tubo com prejuízo do seu diâmetro interno.

Destacam-se como vantagens neste material: a grande durabilidade, a elevada resistência a pressões internas e, acima de tudo, grande resistência aos choques e roturas, especialmente do estilo dúctil. Como desvantagem salienta-se o elevado custo e muito alto peso por metro, com consequências na facilidade de montagem (PHMSA , 2009).

3.3 Betão armado

Diâmetros nominais comercializados:

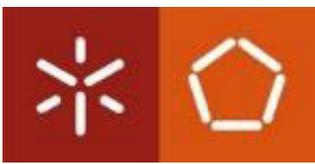
- 300, 400, 500, 600, 750, 800, 1000, 1250, 1500, 1600, 1700, 1800, 2200 e 3000 [mm].

O betão armado é actualmente, o material mais em uso na montagem de sistemas de saneamento e micro tubulação. A inexistência de normas relativas ao fabrico de tubagens inclui-se nos problemas com tubos em cimento reforçado. Segundo (Raposo M. J., 2008), existem normas criadas pela ASTM, C-76, C-361, e C-655 para este material, mas são apenas aplicadas em sistemas soterrados. Só recentemente começaram a estar disponíveis normas com atenções voltadas para a montagem (Zehavi, 1995). Ganha crescente relevância o fabricante que produza tubos de acordo com as tolerâncias dimensionais respeitantes à cilindridade, alinhamento recto, diâmetro interno e tratamento de final de tubo.

(Raposo M. J., 2008) (p. 11) salienta ainda ser:

“...também importante especificar o cimento de acordo com a resistência à compressão, especificar espessura de parede suficiente para evitar rachas ou fissuras, e identificar os locais críticos para reforço de modo a que o tubo tenha a ductilidade desejada. As extremidades finais dos tubos devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal de modo a haver uma transferência uniforme das forças utilizadas na montagem”.

Contam-se como vantagens deste material, a pequena condutibilidade térmica, baixo custo em diâmetros elevados e grande resistência a cargas exteriores e pressões internas. As desvantagens assentam na baixa resistência à corrosão (tanto interior como exterior), no elevado peso por metro e na necessidade de protecção catódica das armaduras.



3.4 Fibrocimento

Diâmetros nominais comercializados:

- 50, 60, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700 e 800 [mm].

Esta conduta tem semelhanças muito grandes em relação ao betão armado, diferenciando-se do mesmo apenas pelo facto de o cimento ser reforçado com fibras de polímero em vez de aço (Raposo M. J., 2008).

Material cujo cimento integra fibras de polímero permite a mais-valia de proporcionar condutas muito leves relativamente ao betão armado, mantendo, no entanto, a mesma resistência à compressão. Acrescem ainda, os benefícios relativos às propriedades de resistência à corrosão.

Estas condutas são de grandes aplicações em redes de distribuição. Como vantagens assinalam-se a baixa rugosidade, o custo reduzido, o peso reduzido, a resistência à corrosão electroquímica e o baixo grau de condutibilidade (PHMSA, 2009). São consideradas desvantagens deste material, a reduzida resistência mecânica, a fraca resistência às pressões internas e reduzida resistência à corrosão, quer interior (águas agressivas), quer exterior (terrenos ricos em sulfatos).

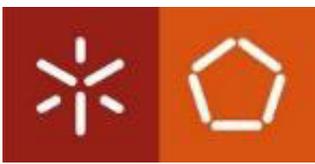
Os acessórios destas condutas são concebidos em ferro fundido.

3.5 Cloreto de polivinilo (PVC)

Diâmetros comercializados:

- 32, 40, 50, 63, 75, 90, 110, 125, 140, 160, 200, 250 e 315 [mm].

Este material, sobretudo presente nas redes de distribuição, instalações prediais, sistemas de irrigação e no transporte de produtos químicos, têm pouca aplicação em adutoras. O PVC resiste a pressões de serviço até 1,6 MPa, tem um módulo de elasticidade de 3 GPa e um peso específico de 1400 kg/m³.



Nas canalizações de PVC encontram-se elementos acessórios tais como, as uniões, curvas, tês, cruzetas, cones de redução e flanges. A montagem é conseguida por colagem (quando o tubo integra uma boca para o efeito) e por união, com recurso a juntas integrais (que implicam a inserção de um anel de borracha que garanta a estanquidade).

São consideradas como vantagens deste material: o peso reduzido; a resistência à corrosão; a reduzida rugosidade e a resistência mecânica. Entre as desvantagens elencam-se: a reduzida resistência a pressões internas e à temperatura e ainda o elevado coeficiente de dilatação térmica.

Estas tubagens são concebidas para uma pressão nominal PN6 e PN10 (escoamento).

3.6 Polietileno (PEB e PEA)

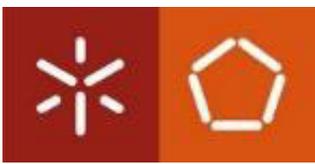
Diâmetros comercializados:

- 50, 63, 75, 90, 110, 125, 140, 160, 180 e 200 [mm].

Dadas as características físicas do Polietileno (PE), este é empregado recorrentemente em instalações de perfuração direccional, para aplicações pressurizadas. Os materiais de polietileno são classificados em três categorias: de baixa, média e alta densidade. Apresenta uma elevada resistência a químicos e abrasivos, é um material com peso muito reduzido e possibilita capacidades de alto fluxo. Face a propensa degradação do polietileno quando exposto directamente à luz solar, as tubagens são protegidas por um aditivo, o carbono negro (que atribui a cor ao tubo), que protege o tubo de degradação a longo prazo (American Society of Civil Engineers, 1996).

Não se registando uma classe que integre todos os diâmetros comercializados, os tubos são concebidos para pressões de serviço variadas (de 220 kPa a 1600 kPa).

São consideradas como vantagens deste material: o peso reduzido; a condutibilidade térmica reduzida; a flexibilidade com elevada resistência aos choques hidráulicos (golpe de aríete); elevada resistência às corrosões internas e externas; rugosidade pouco significativa; elevada resistência mecânica e baixo custo. Entre as desvantagens elencam-se: a reduzida resistência às pressões internas; o elevado coeficiente de dilatação e a reduzida resistência à temperatura.



3.7 Poliéster

Diâmetros comercializados:

- 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 e 600 [mm].

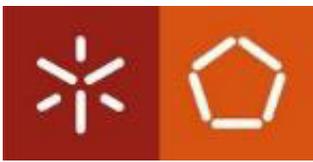
A tubagem de poliéster reforçada a fibra de vidro (PRFV) são preferidas nos sistemas de abastecimento de água, drenagem de águas residuais e de águas industriais, a emissários submarinos e a reabilitação de tubagens, por aplicação destes no interior dos existentes. Estas condutas podem permitir temperaturas de líquido com limite em 90°C.

A montagem dos tubos é possível pela aplicação de uma união de PRFV, instalando no interior desta um dispositivo elástico que serve de junta. Este material consegue resistir à compressão diametral de 2.5, 5.0 e 10.0 kN/m², um módulo de elasticidade de 13.3 GPa e um peso específico de 1700 kg/m³ e suporta pressões nominais de 0.1, 0.6, 1.0 e 1.6 MPa.

Estas tubagens plásticas, rígidas, reforçadas com fibra de vidro, com grande aplicação em adutoras dispõem dos seguintes acessórios: uniões, curvas de 11°15', 22°30', 30°, 45°, 60° e 90°, tês, reduções e tampões com a mesma gama de diâmetros nominais das tubagens e em três tipos de materiais diferentes: PRFV, ferro fundido dúctil e chapa de aço.

São consideradas como vantagens deste material: o peso reduzido; reduzida rugosidade; elevada resistência às corrosões internas e externas e à resistência mecânica.

Entre as desvantagens destacam-se algumas reservas de ordem sanitária devido à inclusão da fibra de vidro e, a vida útil reduzida com consequente perda de qualidade.



Capítulo II

Danos em condutas: Sistemas de detecção e Reparação

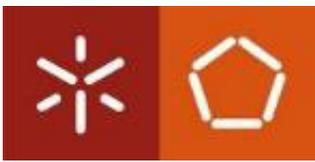


4. Danos em condutas

“Os sistemas de recolha e transporte de água residual são de extrema importância, apesar de serem componentes invisíveis da infra-estrutura urbana de uma nação. Nos Estados Unidos aproximadamente 19 000 sistemas de recolha de água residual fornecem serviço a 75% da população (E.P.A., 1999). Infelizmente, muitos sistemas de recolha de água residual encontram-se em estado avançado de degradação e falham no transporte de esgotos como pretendido. A despesa de construção para reparação, reabilitação ou renovação de sistemas sanitários esteve estagnada neste últimos anos devido a razões económicas nos Estados Unidos. Portanto torna-se de vital importância garantir que o dinheiro gasto em avaliação e reabilitação de esgotos sanitários seja feito de modo a tirar os maiores benefícios dos resultados para a infra-estrutura municipal urbana. Devido à avançada idade dos sistemas de esgotos nos Estados Unidos, as fugas ou vazamentos tornam-se um problema crónico. Existem muitas origens de vazamento em esgotos sanitários, das quais a principal é devido a defeitos estruturais” (Raposo M. J., 2008).

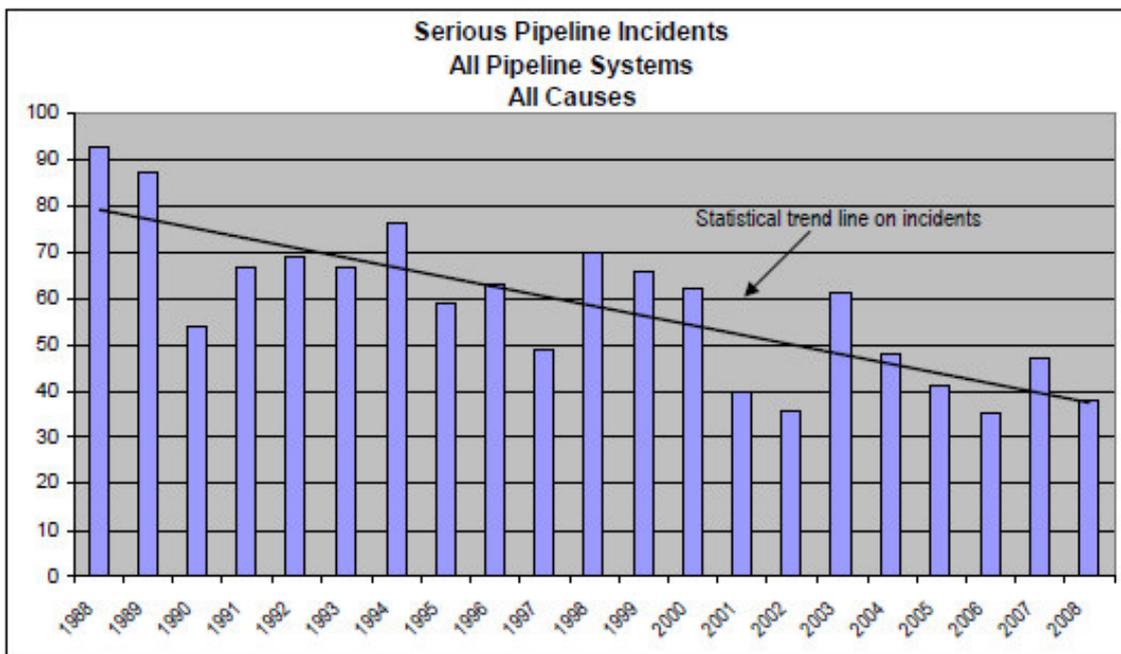
De acordo com o Departamento de Administração de Transporte e Segurança de Materiais Perigosos através de Conduas (PHMSA), danos fruto da escavação foram responsáveis por um quinto de todos os incidentes significativos sobre tubulações responsáveis pelo transporte de líquidos perigosos e gasodutos de transporte de gás natural (no mar ou em terra) durante os últimos 20 anos. Em sistemas de distribuição de gás, danos provenientes da escavação foram responsáveis por mais de 36 por cento dos todos os incidentes significativos em gasodutos, muito maiores do que qualquer outra causa de falha tubular.

Danos de escavação foram considerados a causa de mais de um terço de todos os incidentes sérios em condutas. A maioria dos danos de escavação resultou em falha imediata, devido a impactos nas tubulações; no entanto, alguns incidentes mediáticos na década de 1990 tiveram origem em danos mecânicos infligidos aos gasodutos fruto de escavações prévias. (Michael Baker Jr., Inc., 2010)



4.1 Levantamento estatístico

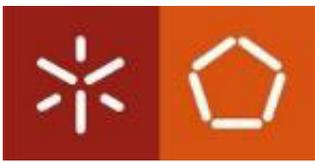
Um grande progresso tem sido alcançado ao longo dos últimos 20 anos pela PHMSA, a indústria de condutas e associações de pesquisa no que diz respeito à redução de incidentes graves em condutas (aqueles que resultam em uma fatalidade ou lesão que requer hospitalização) por todas as causas, incluindo danos escavação, corrosão, erro humano, dano de força natural, falha do material e outros danos força exterior. Como ilustrado na figura 12, os dados indicam uma tendência de queda de incidentes graves de todas as causas em todos os tipos de condutas



1988-2008.

Figura 12 - Incidentes sérios em condutas - Todos os sistemas de condutas (no mar e em terra) (Michael Baker Jr., Inc., 2010)

A figura 12 indica uma tendência semelhante para incidentes de condutas graves causadas por danos escavação para o mesmo período de 20 anos. Esta tendência positiva é o resultado de um amplo conjunto de iniciativas a todos os níveis projectado para envolver todas as partes interessadas nos esforços para reduzir o risco de danos às instalações subterrâneas.



INSPEÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS
Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

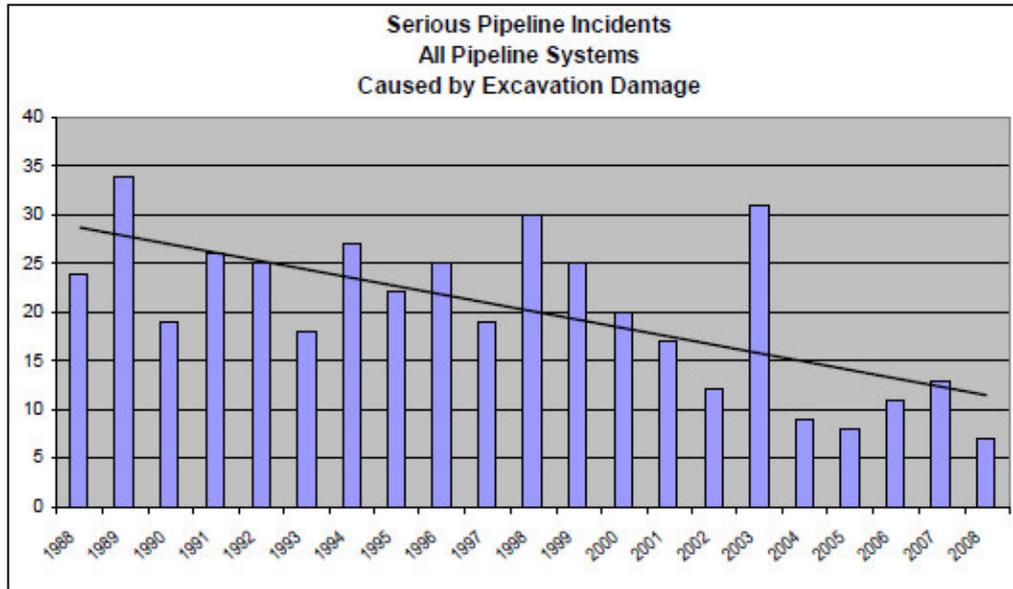
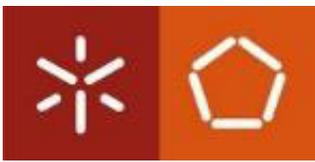


Figura 13 - Incidentes sérios em condutas fruto de escavações - Todos os sistemas de condutas (na terra ou no mar) (Michael Baker Jr., Inc., 2010)

Tabela 2 - Causas de incidentes sérios em condutas – Todos os sistemas de condutas (PHMSA 2000 – 2008)
Causas principais assinaladas

| Categoria da causa | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Corrosão | 8.1 % | 7.5 % | 5.6 % | 0.0 % | 6.3 % | 4.9 % | 8.6 % | 6.4 % | 5.3 % |
| Danos de Escavação | 32.3 % | 42.5 % | 33.3 % | 50.8 % | 18.8 % | 19.5 % | 31.4 % | 27.7 % | 18.4 % |
| Erro humano | 6.5 % | 7.5 % | 13.9 % | 6.6 % | 12.5 % | 19.5 % | 5.7 % | 4.3 % | 7.9 % |
| Falha do material | 11.3 % | 2.5 % | 11.1 % | 8.2 % | 10.4 % | 2.4 % | 2.9 % | 2.1 % | 5.3 % |
| Causas Naturais | 4.8 % | 7.5 % | 0.0 % | 4.9 % | 12.5 % | 4.9 % | 2.9 % | 2.1 % | 2.6 % |
| Outras causas de dano externas | 0.0 % | 0.0 % | 2.8 % | 4.9 % | 14.6 % | 26.8 % | 25.7 % | 19.1 % | 23.7 % |
| Todas as outras causas | 37.1 % | 32.5 % | 33.3 % | 24.6 % | 25.0 % | 22.0 % | 22.9 % | 38.3 % | 36.8 % |
| Nº total de incidentes | 62 | 40 | 36 | 61 | 48 | 41 | 35 | 47 | 38 |



Através da análise da tabela 2 verifica-se uma maior ocorrência de danos de escavação e outros danos de natureza e causa externa. Esses danos incluem-se no grupo de danos mecânicos. Dessa forma, importa então defini-los para uma melhor interpretação do problema.

4.2 Danos mecânicos

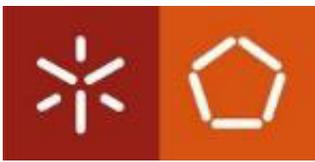
Este estudo refere-se a danos mecânicos vivida por condutas de aço do transporte de gás e líquidos para aplicações relacionadas com a energia. No contexto do estudo, dano mecânico é definido como de seguida:

“Danos localizados no tubo resultantes do contacto com um objecto” (Michael Baker Jr., Inc., 2010). "Localizados" significa que o dano é confinado a uma parte da secção transversal do tubo ou que tem uma forma limitada ao longo do comprimento do tubo (por exemplo, menos de cinco diâmetros de tubo).

O contacto com um objecto resulta numa carga ou tensão experimentados pelo tubo que não tenham sido considerados durante a concepção da conduta. Tais cargas e tensões podem ser de curta ou longa duração. O contacto é geralmente não intencional, mas pode ser deliberado (por exemplo, vandalismo). O contacto pode ocorrer durante o fabrico (excluindo as actividades de formação de tubos), transporte, construção, operações ou manutenção. (De referir que modificações no tubo devido a actividades de manutenção devidamente realizadas são excluídos, mas que os danos devido a actividades de manutenção realizadas incorrectamente está incluído.)

A maioria dos danos mecânicos que possam levar a uma falha ocorre como danos de escavação, quer pelo operador, ou o seu empregador, ou, mais frequentemente, a partir de actividade de terceiros sobre ou perto da conduta.

O desígnio deste estudo, bem como a definição acima, exclui danos que não resultam do contacto com um objecto. Excluídos estão os danos que incluem achatamento e ovalização devido ao carregamento do solo ou de liquidação, encurvadura e enrugamento devido à compactação do solo, deslizamento de terras, geada, terremotos, a erosão dos solos, fluxo de lama, e equipamentos pesados em funcionamento sobre a tubulação enterrada. Entalhes de rocha estão incluídos como danos mecânicos abrangidos no âmbito deste estudo.



Os danos mecânicos não podem ser tipificados como uma condição singular. Os estragos provocados pelos vários tipos de equipamento ou circunstâncias particulares podem resultar numa ampla gama de impactos no tubo.

O atributo físico do próprio dano - comprimento, profundidade, largura, orientação e aparência da superfície - pode variar largamente. Tal como acontece com qualquer defeito, a gravidade do estrago é dependente da geometria do defeito, propriedades inerentes ao material do tubo e do nível de tensão mecânica em que o ducto opera.

Numa última análise, a importância do dano é o chamado "caminho dependente", o que significa que é fortemente afectado por todas as circunstâncias do evento e danos do tubo afectado. Muitas das causas que incitam de uma ocorrência particular de dano mecânico pode ser desconhecido porque o evento dano não foi testemunhado ou relatado. Adicionalmente, os efeitos de certos tipos de danos na integridade do canal não está completamente compreendido a partir de ponto de vista científico.

4.2.1 Defeitos estruturais e seus tipos

Nesta secção, dano mecânico é discutida em três grandes categorias: dentes, ranhuras, e combinação dente/ranhura. A figura 14 mostra alguns exemplos. Cada dano mecânico reflecte uma única combinação de condições, tais como o tamanho e forma da penetração na conduta, assim como a força, ângulo, orientação, e duração do impacto. As diferentes formas de danos pode ser generalizada para facilitar a avaliação e priorização de reparos, como explicado abaixo (Cosham e Hopkins, 2002).

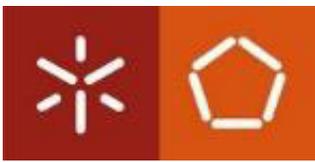
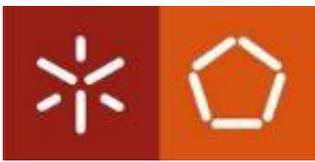


Figura 14-Da esquerda para a direita e para baixo- Entalhe; ranhura; entalhe com ranhura (Winkelman, 2008)

4.2.1.1 Entalhe

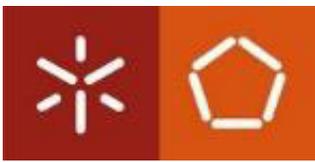
“Um entalhe é definido aqui como uma depressão que produz uma perturbação em bruto na curvatura da parede do tubo, provocada pelo contacto com um corpo estranho, e que resulta na deformação plástica da parede do tubo” (Michael Baker Jr., Inc., 2010).



Um entalhe pode ainda ser classificado como (Michael Baker Jr., Inc., 2010):

- Entalhe liso: entalhe que provoca uma alteração suave na curvatura da parede do tubo, não contém uma redução da espessura da parede ou concentrador de tensão, e não altera a curvatura de uma solda circunferencial ou costura de solda adjacente;
- Entalhe irrestrito: um dente, que é livre para se recuperar elasticamente (efeito *Spring back*) quando o penetrador é removido;
- Restrita Dent: entalhe que não é livre para se recuperar ou reround, porque o penetrador não é removido. Um entalhe de rock é um exemplo de um dente estrangido;
- Complexo Dent: Qualquer entalhe com uma goiva ou tensão secundária, um outro defeito secundário ou um dente que afeta a curvatura numa solda nas proximidades.

A profundidade de um dente depende da força de recuo do objecto, do diâmetro e espessura da parede do tubo, pressão interna, propriedades do material, e qualquer estrangimento do tubo, durante a deformação. Tubos de maior diâmetro e espessura da parede inferior têm uma maior adesão, e por isso são capazes de se deformar mais elasticamente sob uma força aplicada. No entanto, se a tubagem está restringida por um solo duro, em seguida, o dano pode ser maior, devido à parede mais fina. Claramente, um tubo com força de rendimento mais baixo vai deformar plasticamente mais cedo sob efeito duma força aplicada. Se um oleoduto é pressurizado internamente durante o processo de danos, em seguida, o endurecimento eficaz vai actuar contra a força aplicada e, eventualmente reduzir a profundidade do entalhe. Esses parâmetros afectam a profundidade resultante do travessão e, portanto, a integridade estrutural do *pipeline*. (Hopkins e Leis, 2003).



4.2.1.2 Ranhuras

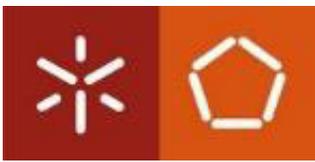
“Uma ranhura é definida aqui como danos na superfície de uma conduta causada pelo contacto com um objeto estranho que tenha movido ou removido material da tubulação, resultando em perda de metal, movimento do mesmo, danos microestrutura, crack, e / ou outro recurso prejudicial criado durante o processo de danos” (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

As ranhuras são tipicamente formadas quando um objecto, como um dente de escavadora, é desenhado ao longo da superfície do tubo. A ranhura funciona como um concentrador de tensão que afecta a integridade estrutural. Além disso, a ranhura tipicamente resulta em danos metalúrgicos na forma de endurecimento de tensão da tensão do material e residual. Estas características diferenciam goivas de muitos outros defeitos de perda de metal, como a corrosão, que pode resultar na redução da espessura do tubo de parede, mas não envolvem danos metalúrgicos.

O comprimento e orientação de uma ranhura, bem como outras características, podem variar significativamente num local de danos mecânicos, como demonstrado na figura 15.



Figura 15 – Ranhura (Michael Baker Jr., Inc., 2010)



4.2.1.3 Defeitos combinados

Quando os entalhes e as ranhuras são encontrados juntos, contendo fissuras ou de metal danificada, ou quando um ou ambos estão perto de uma costura ou solda, os danos devem ser tratados com cautela.

4.3 Características dos defeitos estruturais

Os danos mecânicos podem degradar ou reduzir a operacionalidade (capacidade de funcionar como desenhado) duma conduta. A fim de compreender e avaliar a gravidade e as implicações estruturais de danos mecânicos, primeiro é necessário identificar as características associadas aos mesmos, categorizá-los e, se necessário, para medi-los. Muitas características podem afectar a gravidade dos danos.

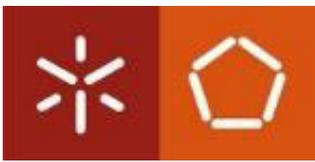
Essas características podem incluir um, vários ou todos os seguintes:

4.3.1 Mudanças na forma da conduta

- Um entalhe localizado, mudança na curvatura na direcção circunferencial, e / ou alteração da rectidão ao longo do eixo do tubo;
- Ovalização da secção transversal perto ou nas posições removidas a partir do ponto de contacto ou área de recuo mais significativo.

4.3.2 Alterações na espessura da parede

- Remoção do metal devido ao corte, cinzelamento, raspagem, ou mecanismos semelhantes;
- “Emagrecimento” devido ao estiramento, geralmente num entalhe afiado ou perto duma ranhura ou anomalia similar;



- Os aumentos na espessura da parede, como às vezes ocorrem quando um penetrador "empurra" o material para o lado à medida que se move ao longo do tubo;
- Metal re-depositado, como às vezes ocorre quando um penetrador atravessa metal que foi previamente cortado ou raspado durante danos.

4.3.3 Alterações em tensões e deformações localizadas

- Tensões residuais e deformações. Campos de tensão têm componentes axiais, circunferenciais e radiais. As tensões localizadas são "caminho dependente", o que significa que são influenciados pela ordem e magnitude de cargas e deformações;
- Concentrações de tensão, por exemplo, nos cantos de uma ranhura;
- Outros aumentos ou diminuições de tensões devido a mudanças na forma.
- Re-arredondamento, criado quando o penetrador recua em relação à conduta submetida a pressão de contacto.

4.3.4 Alterações das propriedades dos materiais

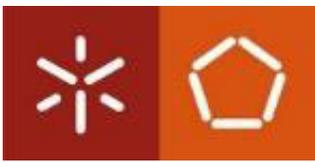
- Modificação das propriedades mecânicas (e magnéticas) do material da tubulação devido à deformação plástica. Estirpe de endurecimento pode aumentar a força de ligação do material, reduzir a ductilidade (isto é, o alongamento à ruptura), e / ou afecta a tenacidade;
- Mudanças devido a transformações de fase resultantes de aquecimento e arrefecimento rápido;



4.3.5 Outras anomalias ou defeitos

- Fissuras ao nível da superfície que se formaram, quer na superfície interior durante o entalhe, ou na superfície do lado de fora durante o re-arredondamento. Fendas provenientes de re-arredondamento são frequentemente dispostas a 45 ° em relação à direcção radial;
- Microvazios e fendas enterradas, especialmente na camada subsuperficial deformada;
- Extensão de fendas ou microfendas por fadiga subsequente, fadiga proveniente de corrosão, ou crescimento estável da fenda;
- Fendas de origem ambiental, como fendas de tensão superficial de origem corrosiva;
- Corrosão local ou generalizada, por vezes relacionada com blindagem por revestimento danificado e / ou o presença de rochas imediatamente adjacentes à parede do tubo;
- Outros defeitos ou anomalias, tais como imperfeições ocultas numa linha de soldadura.

Os parágrafos a seguir fornecem mais detalhes sobre alguns dos factores listados acima: re-arredondamento, *springback* elástico, tensão localizada / campos de tensão, e reduções na resistência provocada pelo processo de dano.



4.4 Fenómenos de mola de retorno e Re-Arredondamento

O processo de introdução de um dente numa tubagem envolve tanto a deformação elástica e plástica. Quando o penetrador é removido, o entalhe realiza um retorno elástico em certa medida devido ao facto da sua energia elástica armazenada ser libertada.

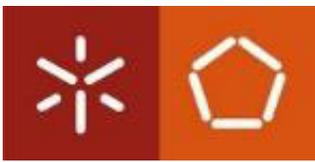
O fenómeno da mola de retorno é também referido como recuperação elástica. Distorções elásticas ou flexão pode ocorrer quando a pressão é aumentada ou diminuída num entalhe.

Porque a tubagem está pressurizada durante a deformação, ou porque a conduta é posteriormente repressurizada durante um retorno ao serviço ou pressurizada acima do nível presente quando a avaria tiver sido formada, a pressão interna irá também reduzir a profundidade do entalhe através de um processo referido como "re-arredondamento". Neste relatório, re-arredondamento refere-se a uma actividade plástica ou permanente distorção e em torno dum dente devido à pressão interna.

Muitas vezes, os efeitos de re-arredondamento devido à pressão interna são maiores do que aqueles devido à resposta elástica. *Springback* e comportamento de re-arredondamento dependem da geometria do tubo, das propriedades do material, da pressão de operação, da rigidez do apoio externo da conduta e da forma do entalhe. *Springback* e re-arredondamento é maior em tubos de paredes finas do que em tubos de paredes espessas, devido à maior adesão geométrica. Tubos que operam a pressões mais elevadas apresentarão mais re-arredondamento devido à força motriz maior presente no processo.

4.5 Campos Tensão/Deformação [Hopkins e Leis (2003)]

O entalhe inicial de um tubo conduz a uma tensão na sua superfície interna e compressão da sua superfície externa. O material desloca-se localmente, causando uma deformação plástica em ambas as superfícies. Quando o penetrador é removido e o tubo atravessa um processo de re-arredondamento, a superfície interna experimenta uma tensão residual. Se a tensão residual é grave o suficiente, pode dar-se início a um processo de fenda. Em muitos casos, o aparecimento de fendas pode levar a uma falha imediata do tubo durante o processo de re-arredondamento. Em



algumas circunstâncias, o dente é impedido de re-arredondar devido à limitação do material do tubo.

O processo de re-arredondamento leva a alterações significativas nos campos de tensão / deformação localizados, e podem levar a fissuras. O processo de entalhe e re-arredondamento estão associados com a deformação plástica do material do tubo. A deformação plástica efectuada no material durante o processo pode danificar ou reduzir a tenacidade ou restante ductilidade do material. Esta linhagem é sobreposta em qualquer tensão mecânica introduzida durante o fabrico da tubulação e instalação de ductos. (ANSI / ASME B31.8S, 2004).

4.6 Redução da tenacidade e ductilidade devido à tensão

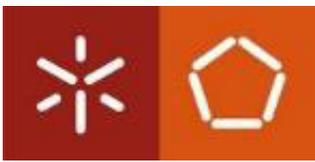
A deformação associada a danos mecânicos pode sobrecarregar e afectar significativamente as propriedades do material do tubo. Quando uma ranhura é formada, a área imediatamente abaixo do penetrador é altamente deformada e a sua resistência à iniciação de fenda reduz significativamente. Este tipo de danos estende-se para o material de tubo para uma baixa profundidade. A camada deformada é geralmente mais rígida do que a base metálica e pode conter microestruturas transformadas resultantes de aquecimento rápido e de arrefecimento durante a sua formação (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

O endurecimento por deformação ou trabalho a frio durante a deformação plástica pode aumentar a dureza e diminuir a resistência, mas em menor grau do que sob o penetrador. Os efeitos da tensão prévia sobre propriedades mecânicas, em particular dureza, foram revistos por Leis e Hopkins (2003 (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

4.7 Geometria e Caracterização de Danos

A profundidade do entalhe é geralmente medida por referência ao contorno exterior original do tubo não danificado, e muitas vezes expressa como uma percentagem do diâmetro do tubo inicial (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

A forma do entalhe pode ser definida em termos de local, raio de curvatura na direcção circunferencial e/ou axial (Figura 16) É feita uma distinção entre o facto de a medição ser obtida quando o tubo é pressurizado ou despressurizado. Tais medidas incluem um grau de ovalidade



ou achatamento da superfície do tubo como um componente inevitável de profundidade (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

O comprimento do entalhe, largura ou tamanho podem ser definidos pela envolvente em que o raio do tubo danificado é diferente do que o do tubo não danificado, mas esta é, por vezes, difícil de determinar. O tamanho do também foi definido em termos do local de pontos de meia-profundidade (API 1156, 1997; LPA, 1999; Rosenfeld, pimenta e Leewis, 2002; Ironside e Carroll, 2002; Dinovitzer et al, 2002;. Hopkins e Leis, de 2003; Baker, Jr., M., 2004).

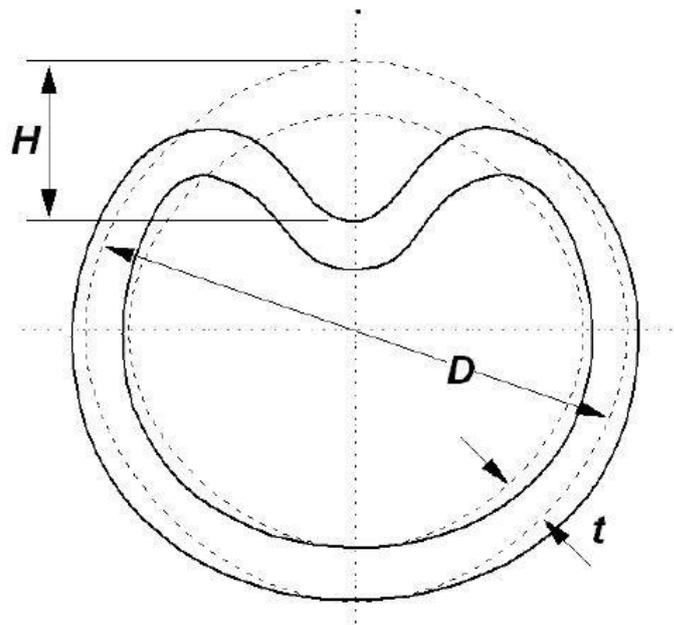


Figura 16 – Raio de curvatura

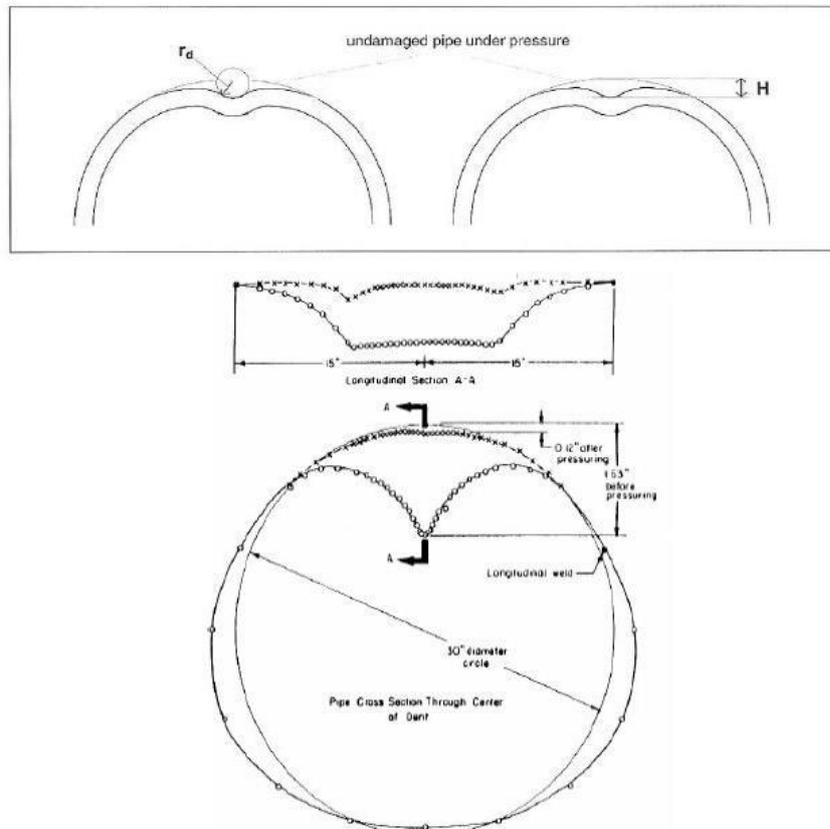
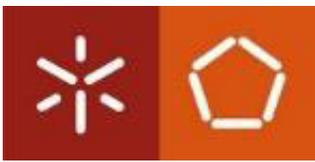


Figura 17 – Medida da profundidade do entalhe (Hopkins e Leis, 2003)

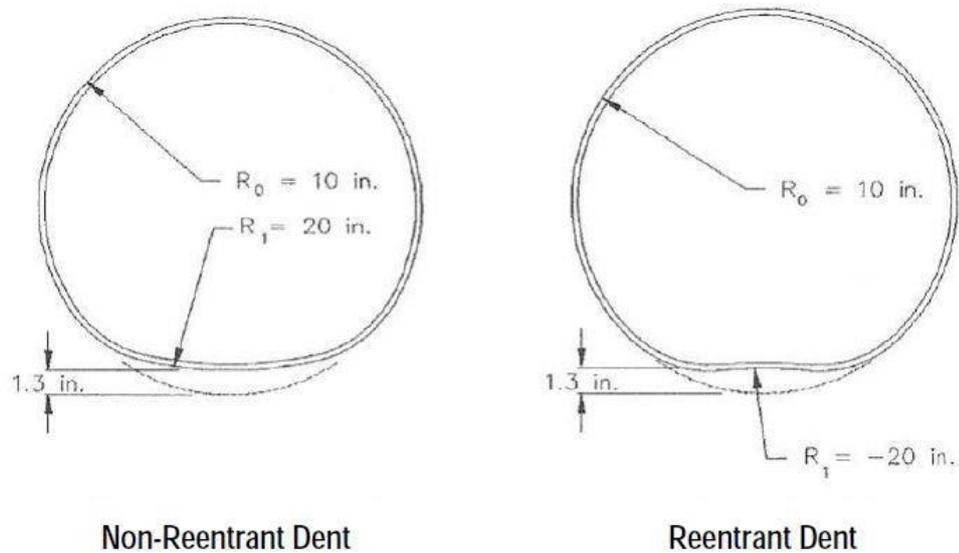


Figura 18 - Medida da profundidade de dentes re-entrantes e não re-entrantes (Michael Baker Jr., Inc., 2010)



Os parâmetros geométricos utilizados para caracterizar um sulco são a profundidade, largura, comprimento, ângulo e ao eixo, etc. Estes são geralmente medidos a partir do raio exterior não deformada do tubo (Figuras 17 e 18).

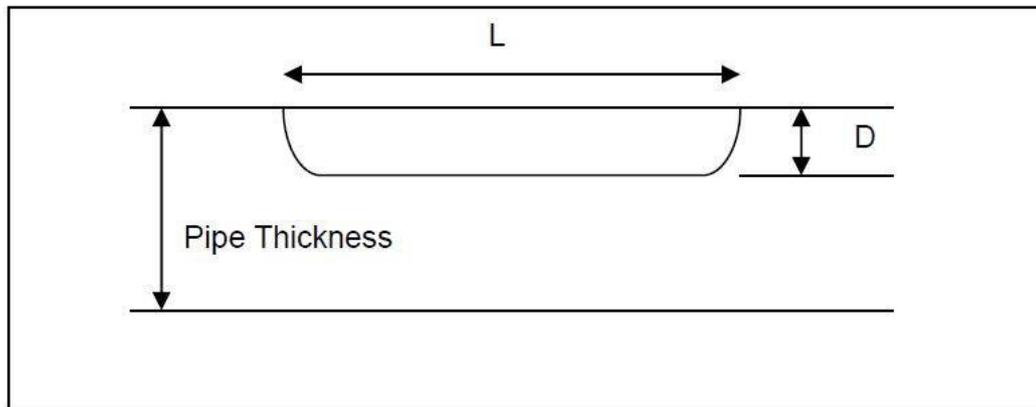


Figura 19 - Medida da profundidade de ranhuras/sulcos (OPS T1010, 2004)

Para dentes e ranhuras combinados, o comprimento e profundidade goiva são geralmente medidos a partir da superfície do metal no topo da ranhura - isto é, não incluindo a profundidade ou o comprimento do dente (Figuras 19 e 20).

Do mesmo modo, as profundidades de fissuras são medidas a partir da superfície do metal, excluindo a profundidade ou o comprimento do dente e / ou ranhura associado (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

Os locais de outros danos secundários associados a dano mecânico (incluindo corrosão e soldaduras) são geralmente definidos pela medição do deslocamento axial e / ou separações circunferenciais do ponto mais profundo do dente / sulco e a mais profunda do elemento secundário.

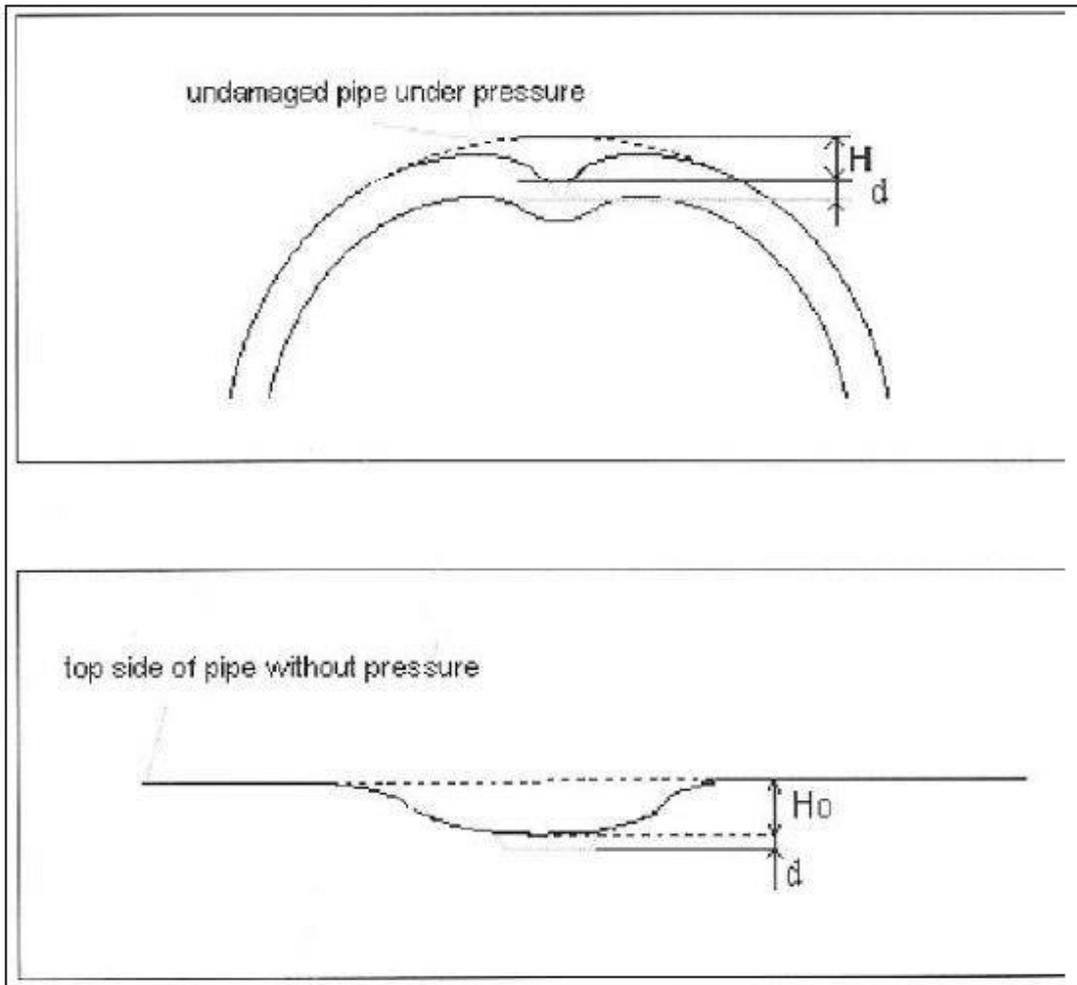
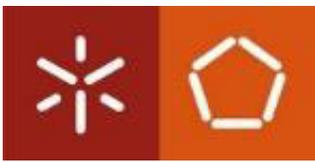
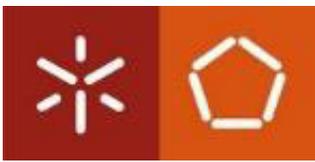


Figura 20 - Medição da profundidade de dano da combinação Entalhe/Sulco



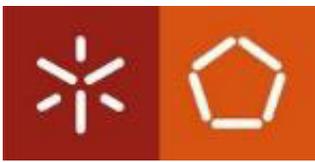
4.8 Condições de reparação e modos de falha

As condições de operação da conduta e a ductilidade do material da tubagem têm efeitos profundos sobre o impacto nos danos causados na mesma. Os danos mecânicos representam uma vasta gama de possíveis ameaças à integridade de um gasoduto afectado que vão desde extrema e urgente a tolerável, mas apenas por um período limitado de tempo (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

Os tipos de danos com interesse para este estudo são aqueles que resultam de processos de danificação que não perfuram a conduta, mas que surgem de danos assinalados por um *ILI* (In-Line Inspector) e que precisam de uma avaliação corrente e futura da integridade antes da própria escavação (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

Com efeito, todas as formas de danos mecânicos que não causam falha imediata do tubo são potenciais danos por aparecer. Os defeitos mecânicos que não resultam em falha mecânica imediata podem vir a sofrer da mesma, por exemplo, devido aos vários mecanismos de defeitos possíveis (Michael Baker Jr., Inc., 2010):

- Na altura em que ocorre o dano, este pode acontecer a uma pressão localizada maior do que a intratubular;
- O dano pode aparecer como resultado da acumulação de deformações plásticas localizadas e fadiga de ductilidade na zona de dano, devido à deformação e fadiga de baixo ciclo;
- Pode surgir como consequência do crescimento de fendas resultantes de altos ciclos de fadiga, causada pelos efeitos de várias pressões cíclicas no seio da deformação residual e da concentração de tensões;
- O dano pode servir ainda como local de inicialização de corrosão ou de SCC (*Stress Corrosion Cracking*/Corrosão sob tensão).



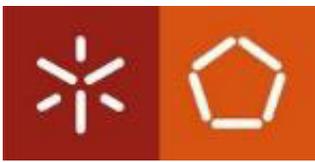
Para superar estas ameaças, a avaliação das condutas e a mitigação e reparo da mesma têm que ser levadas a cabo. A necessidade de reparação pode ser classificada como "imediate" ou "futura". A distinção fundamental entre a reparação imediata e futura está na urgência ditada pelo factor actual de segurança, acima da pressão de operação da conduta e do tempo previsto para o fracasso. A altura em que se dá o dano pode variar de semanas a meses, até anos, décadas ou possivelmente nunca (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

4.8.1 Condições de reparação imediata

A categoria de reparo imediata inclui danos suficientemente severos para a conduta ser vista como insegura no que toca à sua operação à pressão actual de funcionamento. Assim, ainda que a conduta esteja, momentaneamente, a resistir à pressão, a presunção seguida é a de que o coeficiente de segurança é inadequado e a futura falha pode ocorrer. Esta categoria pode ainda incluir danos insuficientemente estudados e caracterizados para determinar se a conduta poderá operar de forma segura à pressão corrente (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

Tais urgentes condições requerem uma resposta imediata por parte do operador no sentido de investigar e agir com vista ao restauro da margem de segurança da conduta. As opções de intervenção podem incluir a desmontagem da tubagem, reduzindo significativamente a pressão da tubagem, de modo a proporcionar um factor de segurança mínimo conhecido, ou de se executar uma reparação eficaz e capaz de restaurar a resistência à conduta (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

Os padrões de planeamento e gestão da integridade actuais, como ASME B31.8S, 49 CFR, consideraram que qualquer combinação de entalhe com uma ranhura representa uma ameaça imediata. A principal razão para tal é o facto de terem vindo a ser conhecidas falhas a níveis de tensão de operação. Além disso, não há nenhum método simples e fácil que o operador possa utilizar para calcular com precisão a pressão de segura de funcionamento (por outras palavras, não há nenhum "B31G" para entalhe) ou o tempo até à falha. São, no entanto, utilizados métodos analíticos derivados da pesquisa por especialistas para obter tempos estimativas de falha (B31.8S & PHMSA, 2004), 2008) (Michael Baker Jr., Inc., 2010).



4.8.2 Condições de reparação agendada (ANSI / ASME B31.8S, 2004)

Esta categoria de Reparação de Reparo Agendada inclui todas as formas de danos não considerados graves o suficiente para serem incluídos na categoria de ameaça imediata e, portanto, considerados toleráveis. O tempo previsto para a falha é, desta forma suficientemente longo para permitir a possibilidade de acompanhar a condição da conduta e / ou agendar a investigação e, conseqüentemente, tomar a decisão de reparar o dano (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

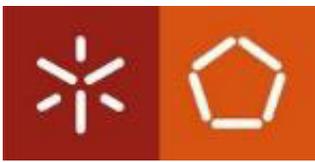
Um dente com um arranhão menor ou com ranhura não compromete necessariamente a segurança da conduta, sendo que a vida útil restante à tubagem pode representar muito tempo. Isto é particularmente verdadeiro quando a conduta opera a um nível de tensão moderado ou baixo e experiencia variações de pressão pouco frequentes. Poderá no entanto ser verdade para os ligeiros defeitos na tubagem que opera a maiores tensões. No entanto, a possibilidade de ameaça mecânica não é assinalável (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

Os *standards* actuais de planeamento de integridade apenas consideram deformações superficiais - sem ranhuras ou fendas - no grupo de reparações agendadas se estas não excederem o limite de tensão permissível (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

4.8.3 Crescimento de fissuras por defeitos mecânicos

Hopkins e Leis (2003) descrevem o crescimento de craqueamento de danos mecânicos como impulsionada por duas forças:

- Força da carga sobre a tensão de deformação plástica na superfície interior do tubo durante o contacto com o agente penetrante. Se suficiente, este pode levar a fissuras ou colapso da restante parede do tubo de plástico e, eventualmente, a falha imediata;



- A tensão na superfície exterior do tubo à medida que é removida pelo agente penetrante, e os tubos re-rodadas. Mais uma vez, se esta magnitude de deformação plástica é suficiente, pode levar a uma falha imediata.

A abertura de fendas na superfície exterior do tubo pode também ser promovida pela presença de microfissuras geradas durante um contacto deslizante com o penetrador. Como mencionado anteriormente, as tensões plásticas elevadas durante a deformação aumentam a dureza e reduzem a tenacidade, por vezes, ao ponto de as fissuras ou microfissuras desenvolverem, ao longo da superfície interna ou externa, à medida que o tubo se deforma. Estas fissuras estão geralmente orientadas perpendicularmente em relação ao movimento do penetrador e penetram perfazendo um ângulo de 45 ° em relação à superfície do tubo (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

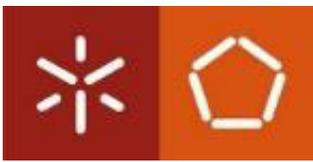
A abertura de fissuras pode desenvolver-se como resultado de uma dilaceração estável, fadiga, *stress* ambiental, deformação causada por ciclos de tensão a baixas temperaturas, e / ou como um resultado de outros mecanismos de tensão delta. Assim, entalhes e ranhuras podem exibir o desenvolvimento de fendas ao longo do tempo de fadiga. Estes fenómenos podem diminuir à medida que as tensões locais se redistribuem.

Danos associados à fadiga de alto ciclo são mais frequentemente encontradas em oleodutos ou produtos líquidos perigosos do que em condutas de gás natural. A fadiga mais grave vivida por condutas transportadoras de líquidos é atribuída ao facto de existir maior frequência de flutuações de carga. Esta condição também é agravada pelos maiores ciclos de tensão e maiores taxas de mudança de tensões do que as observadas em condutas de gás natural (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

4.8.4 Vazamento versus ruptura

Um defeito provocado por danos mecânicos pode manifestar-se na forma de um vazamento ou de uma ruptura. Num vazamento, o comprimento total da fissura de penetração é semelhante ao da fissura original e a libertação é controlada ou limitada pela dimensão da abertura.

Em caso de ruptura, a abertura inicial estende ou cresce rapidamente ao longo do eixo da tubulação, devido à propagação da fenda ao longo das extremidades.



O tamanho crítico de falha, que é o comprimento em que o modo de falha evolui de vazamento para ruptura, depende da geometria do tubo, do comprimento do defeito totalmente penetrante, das propriedades dos tubos, do grau de tensão de funcionamento e de outros factores (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

A determinação dos limites que situam a diferença entre vazamento e comportamento de ruptura é semelhante ao de outros defeitos axiais, excepto o facto de não poderem ser tensões adicionais associadas à geometria da deformação e ao material na vizinhança imediata podem exibir tenacidade reduzida. Por estas duas razões, a ruptura pode ser mais provável, no ponto de danos mecânicos do que no local de defeitos equivalentes comprimento de corrosão ou fendas axiais. Tais considerações influenciar as consequências de danos mecânicos e a prioridade para reparos (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

A determinação das fronteiras que separam vazamento de comportamento de ruptura é semelhante à que o faz em relação a outros defeitos axiais. Tais considerações influenciam as consequências dos danos mecânicos e priorizam a prática da sua reparação (PHMSA, 2009).

4.8.5 Estatísticas referentes às falhas no transporte

Os dados relativos às falhas no transporte tubular por condutas foram reunidos por agências de segurança nos Estados Unidos, Canadá e Europa. Os dados foram analisados periodicamente para identificar tendências no que diz respeito às causas de falha e factores de risco específicos. As análises indicaram que no em geral, os danos mecânicos em tubagens são uma importante causa de falha de transporte por condutas. No passado, danos mecânicos provocados por actividades como a usurpação (também conhecida como danos de terceiros) foi a principal causa de incidentes significativas nos Estados Unidos (Michael Baker Jr., Inc., 2010).

Devido ao advento e ampla adopção de práticas “à distância de uma chamada”, que permite que empreiteiros e outros possam ter condutas localizadas e marcadas antes da escavação, a proporção de incidentes significativos diminuiu gradualmente nos últimos anos, de tal forma que os danos de terceiros ainda é uma causa importante, mas não a maior.



INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

Desde 2000, a corrosão tornou-se a maior categoria de causalidade anualmente, mas os danos escavação continua a ser o maior de todos os anos desde 1985. Como ilustrado anteriormente na figura 21, danos de escavação também continua a ser uma das maiores categorias de causas para mortes e ferimentos graves (PHMSA, 2008).

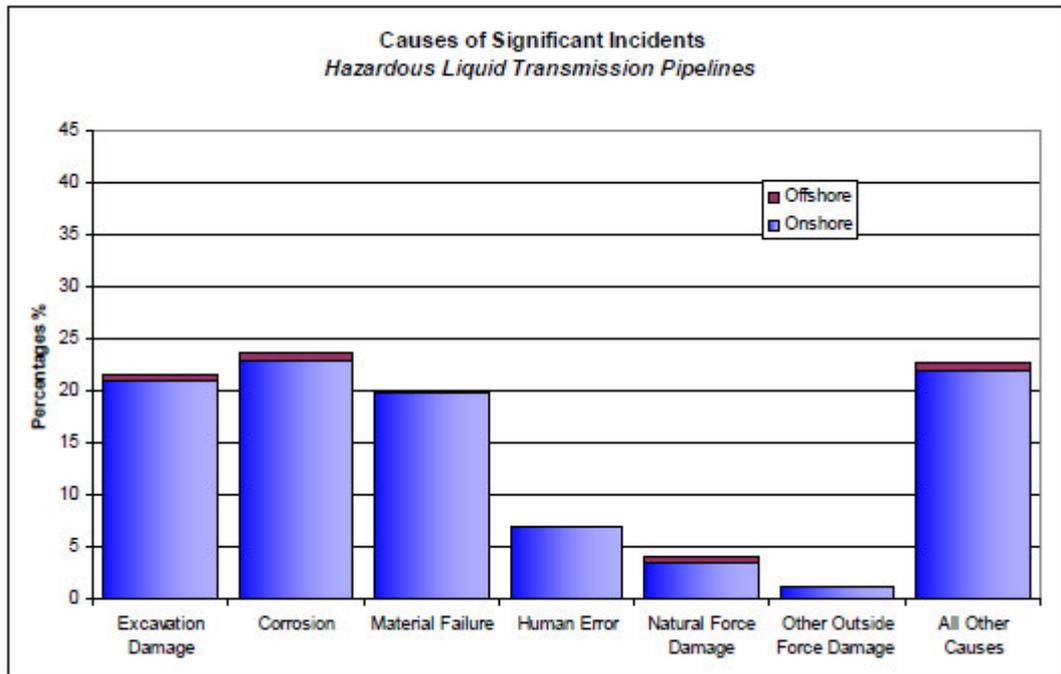


Figura 21 - Causas de Incidentes significativos no transporte de fluxo de líquidos perigosos a partir de 1988-2008

A Figura 21 mostra a distribuição dos incidentes significativos no transporte de fluxo de líquidos perigosos a partir de 1988-2008. Durante este período, houve 43 mortes relatadas e 234 lesões que necessitaram hospitalização, tudo em ductos terrestres. Destes, 14, ou 33 por cento das mortes, e 87, ou 37 por cento dos inquiridos, foram o resultado de dano de escavação. Apenas uma ligeira maior percentagem foi atribuída a "todas as outras causas." (Michael Baker Jr., Inc., 2010)

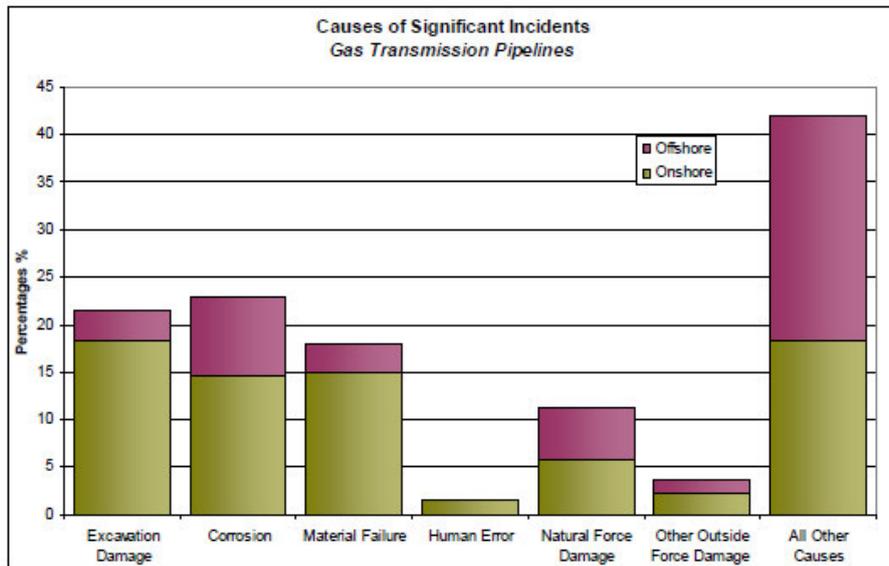
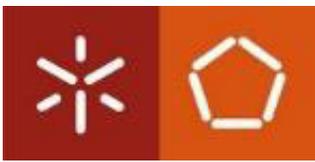
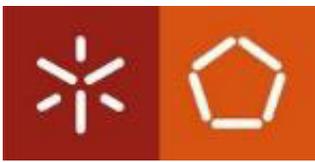


Figura 22 - Causas de incidentes significativos em *pipelines* de distribuição de gás

Um problema semelhante é mostrado na figura 22 para gasodutos de transporte de gás natural a partir de dados do PHMSA 1988-2008. Houve 36 mortes e 76 feridos resultantes de danos de escavação, 61 por cento e 36 por cento, respectivamente, do total de mortes e ferimentos devido a todas as causas. Metade das mortes relacionadas com danos de escavação foram associadas a ductos terrestres, juntamente com 74 por cento das lesões. Danos à propriedade no total de 958.000 mil dólares americanos foram relatados como associados a todas as causas, com 12 por cento atribuídos aos danos por escavação. Setenta por cento dos danos materiais relacionados com a escavação foram associados a ductos terrestres (PHMSA, 2009).

Dados para condutas de distribuição de gás são mostrados na figura 23 para fins comparativos. Enquanto o âmbito da presente dissertação se refere principalmente a danos mecânicos em ductos de transmissão por causa do ênfase dado à detecção, caracterização e questões de avaliação, a apresentação dos dados do PHMSA em condutas de distribuição de gás ajuda a enquadrar o contexto da prevenção de danos de ductos no geral.



INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

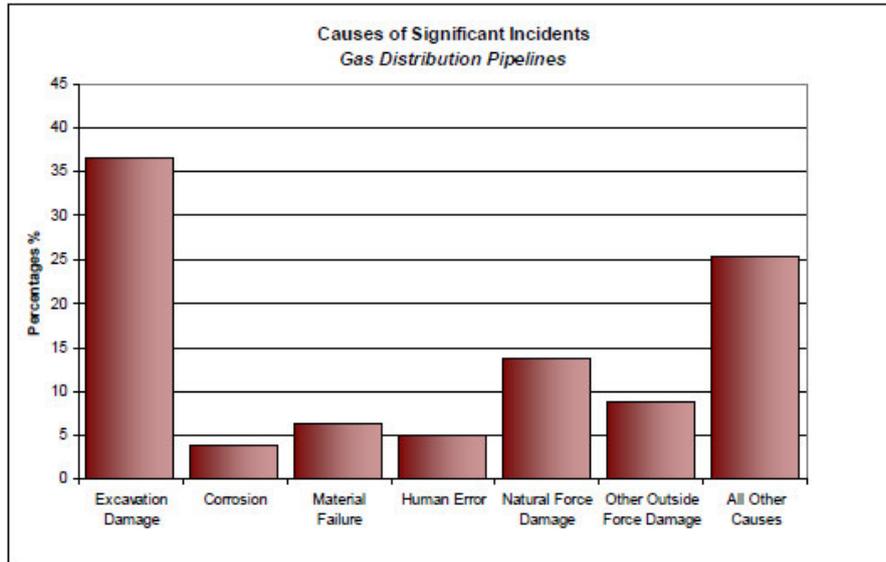
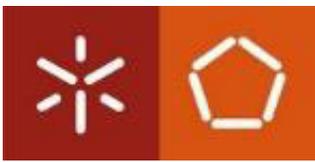


Figura 23 - Causas de acidentes significativos. *Pipelines* de distribuição de gás (PHMSA, 2009)

Devido à presença de sistemas de distribuição de gás em áreas mais congestionadas, as percentagens de falhas supera de longe as outras categorias de causa. Fatalidades relacionadas com terraplanagens e lesões para o período 1988-2008 relatórios foram 97 e 459, respectivamente, ou 30 por cento e 34 por cento de todas as mortes e ferimentos. Os custos de danos de propriedade eram 17 por cento dos quase 1000 milhões de dólares dos custos totais para todos os incidentes de distribuição de gás (PHMSA1, 2009).



5. Detecção de fugas em condutas

“Os recursos (...) não são inesgotáveis. É indispensável preservá-los, administrá-los e, se possível, aumentá-los”⁴

As fugas em condutas constituem um problema que afecta diversas instalações e serviços, nomeadamente as redes de distribuição e tratamento das águas, quer para consumo humano, quer residuais, reclamam o investimento em melhores soluções para responder a problemas crónicas. A degradação natural das infra-estruturas implica perdas nas redes de distribuição urbanas as quais estão inerentes os custos elevados da manutenção (reparação, reabilitação e renovação das redes). O problema tem sido alvo de múltiplos Estudos de Casos e testes computacionais, focalizados nas oportunidades de racionalização energética.

Os vazamentos nas condutas têm origens diversas assentes sobretudo em defeitos estruturais como se pode observar nas figuras 24, 25 e 26.

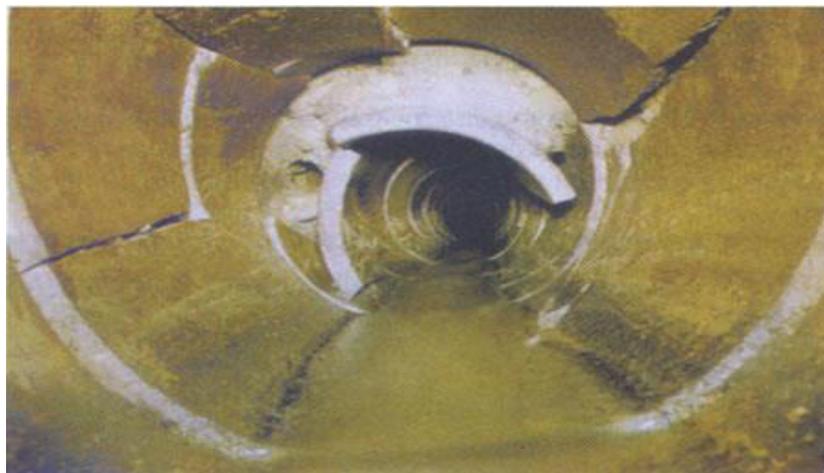
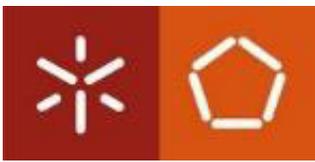


Figura 24 - Defeitos estruturais que incluem fissuras e fracturas

⁴ Carta Europeia da Água, proclamada pelo Conselho da Europa, em Estrasburgo, em 6 de Maio de 1968.



INSPEÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis



Figura 25 – Infiltração

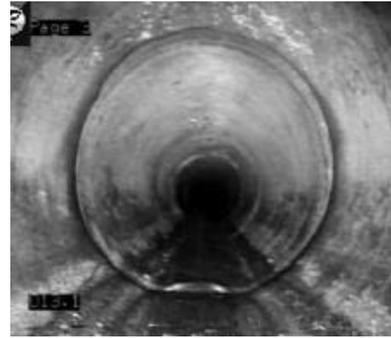


Figura 26 – Deslocamento de juntas

Os defeitos estruturais incluem deformidades, fissuras, fracturas, deslocamentos de juntas, e colapso (ASCE, 1994; Zubia, 1999). Na categoria de danos operacionais defeitos incluem-se raízes, assoreamento e entupimento como se pode observar nas figuras que se seguem.



Figura 27 – Da esquerda para a direita: entupimento por raízes; intrusão de raízes entupimento por gordura



A ocorrência de infiltração e influxo nas condutas são constrangimentos importantes que oneram a manutenção e potenciam o risco de colapso estrutural.

A sobrecarga das águas residuais incrementa o risco da concentração ou libertação de sedimentos no perímetro dos subterrâneos (Stein e tal., 1995). Os ciclos de infiltração/exfiltração conduzem ao colapso estrutural pelo que, o vazamento é o item mais significativo que necessita de ser identificado aquando da avaliação das condutas (Bellows, 2000).

As técnicas de identificação dos vazamentos podem ser categorizadas em técnicas de “larga escala” e “pequena escala”. A primeira envolve a medição de fluxo e análise estatística sendo que a segunda integra um conjunto diversificado, tais como a medição de fluxo, o circuito fechado de vídeo (CCTV – Closed circuit television) ou ainda observações manuais.

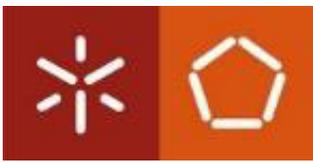
5.1 Estatística

Os métodos estatísticos, considerados adequados, compreendem uma gama diversificada de técnicas - Análises de fluxo de tempo seco ou modelos estocásticos⁵ modernos de computador (Jones, 2002).

A aplicação informática típica de modelação observa os seguintes itens:

- Rede de saneamento dividida em duas zonas, *input* e *output*, sendo que o enfoque do estudo está nas zonas de *output*;
- Fluxo monitorizado nas localizações de *input* e *output* durante períodos de tempo consideráveis;

⁵ Que surgem por meio de eventos aleatórios...



- Recolha, armazenamento e análise dos *inputs* correspondentes aos *outputs*;
- O programa gera um algoritmo que interliga o conjunto dos dados recolhidos;
- O programa pode integrar no seu processo novos *inputs* e gerar *output* actualizados em função do algoritmo.

5.2 Monitorização de fluxo

Os instrumentos para monitorização do fluxo, sendo muito úteis como componente de um exercício de modelação estatística, podem resultar insuficientes e pouco rigorosos (figuras 28 e 29). Actualmente, a informação acerca do uso de água e das conseqüentes descargas nas redes de saneamento é essencialmente estatística, pelo que, nas avaliações de pequenas escalas não se garante rigor na informação. Este constrangimento pode ser superado com a colocação estratégica de alguns medidores (que podem rapidamente integrar ou anular componentes de um sistema em estudo) quando combinada com a modelação de redes e proporcionar a percepção global, mais rigorosa, de uma captação a custos sustentáveis.



Figura 28 - Instrumento para monitorização de fluxo; Medidor de caudal; Eléctrodo de monitorização de fluxo contínuo

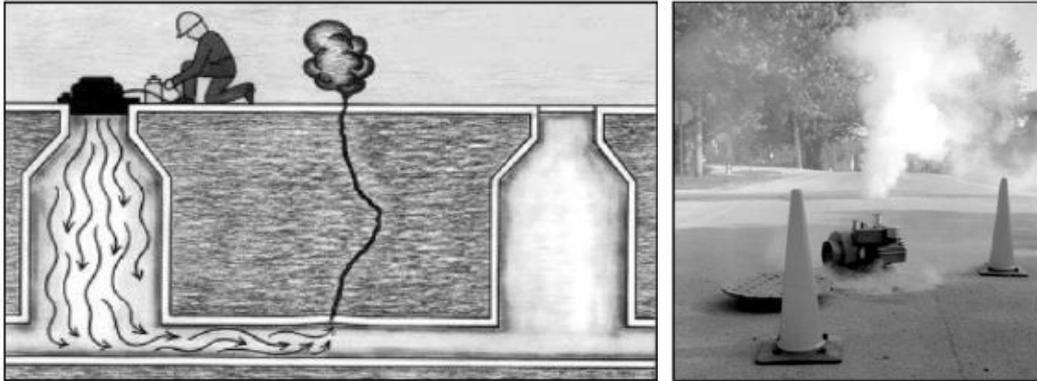
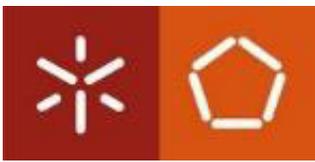


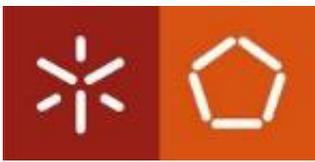
Figura 29 - Teste de fumo em sistemas de saneamento

5.3 O teste de tintura

O teste da diluição de tintura é um sistema utilizado inicialmente na década de sessenta do séc. XX e baseia-se na injeção, com uma concentração determinada, de uma tintura fluorescente (tal como Rhodamine) no sistema e na medição da taxa de diluição corrente abaixo (Figura 30). Este método procede como uma forma de monitorização na área suspeita de infiltração, que pode ser complementado com a monitorização de fluxo ao ponto de amostragem, para medir a quantidade de vazamento.



Figura 30 - Teste de pintura



5.4 Circuito fechado de televisão

Nos projectos de recuperação, o Circuito Fechado de Televisão (CFTV), é um equipamento de pesquisa que surge pela primeira vez no Séc. XX, em 1950, afirmando-se na década de 80, com o salto tecnológico que possibilitou a produção de equipamentos com elevado desempenho e confiabilidade, a custos reduzidos (Figura 31).



Figura 31 – Sistemas de Circuito Fechado de Televisão (CCTV)

O CFTV sendo actualmente um equipamento muito recorrente nas intervenções de inspecção e muito eficaz na detecção de infiltrações, revela no entanto, algumas limitações, quando a interpretação resulta apenas do vídeo. Releva-se o constrangimento evidenciado nas capacidades limitadas para identificar situações de vazamento, ou na inspecção em condutas que se encontram sob fluxo. Nestes casos, recorre-se ao complemento da informação com sistemas combinado por exemplo com uma unidade de sonar.

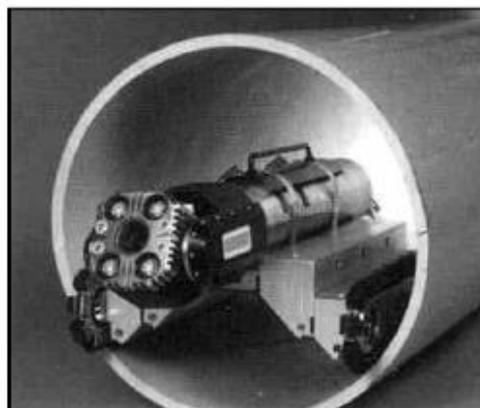
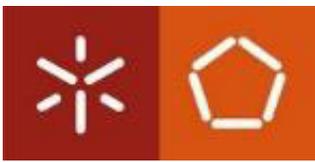


Figura 32 - Sistemas de circuito fechado de televisão - inspecção da linha principal



5.5 Sonar

O sonar pode, em circunstâncias adequadas, complementar ou substituir as informações obtidas pelos sistemas convencionais de CFTV. O sonar é usado principalmente para pesquisas sob água (por exemplo, em tubulações em carga acima de meia secção) e, além de identificar os defeitos, pode produzir dados quantitativos sobre as dimensões da tubulação e os níveis de assoreamento. Existem sistemas para inspeccionar uma rede parcialmente cheia usando uma câmara de CFTV acima da linha da água e um transponder sonar abaixo desta.

O sonar possibilita uma imagem com relativo rigor do perfil da parede de uma conduta e do solo envolvente. As leituras realizadas são por vezes complexas e objecto de interpretações distintas, pelo que implicam a qualificação técnica exigente.



Figura 33- Equipamento de sonar



5.6 Radar de penetração de solo

O radar de penetração de solo (*GPR – Ground penetrating radar*) permite a inspeção no interior da rede e fora das paredes do tubo, importante quando existe suspeita de vazios externos. As leituras resultam do envio de pulsos de energia que se propagam pelo solo e são reflectidos por alvos existentes sob a superfície. A leitura procede do cálculo realizado relativamente ao tempo de envio e retorno de pulsos de energia electromagnética do objecto ou área de enfoque, determinando profundidades e localizações. As propriedades dieléctricas dos materiais existentes no solo condicionam o tempo de trânsito do pulso de energia., sendo que estas condições afectam também a profundidade e penetração alcançadas (os terrenos argilosos, por exemplo, são de difícil propagação). Deste modo, diferentes tipos de solos implicam a selecção adequada da frequência correcta para se ser bem-sucedido com o *GPR*. Actualmente o uso de sistemas de multi-sensor na tecnologia *GPR* alcançam resultados mais exactos, rápidos e capazes de trabalhar numa grande variedade de condições de solo (Figura 34).

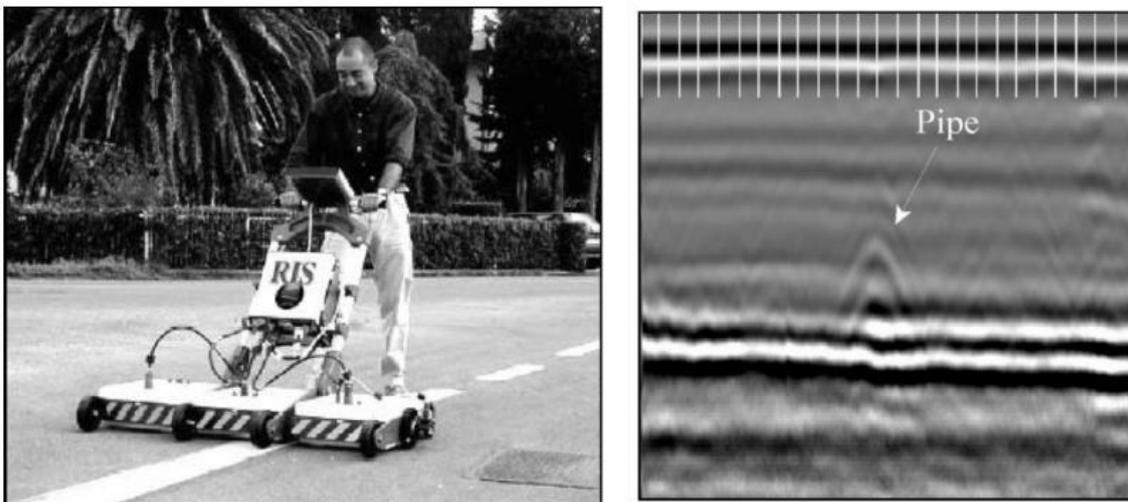
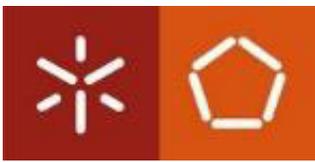


Figura 34 - *GPR* com multi-sensor utilizado na localização de tubos subterrâneos.



5.7 Termografia de infravermelhos

A termografia de infravermelhos é uma tecnologia sobretudo empregada na inspecção de tubagens expostas mas pouco adequada à inspecção de condutas subterrâneas ou em áreas de estudo alargadas pois, importa custos muito elevados, afectos aos recursos necessários, nomeadamente, a utilização de viaturas especializadas que percorrem as zonas de inspecção ou mesmo aviões que sobrevoam a área.

5.8 Testes de pressão de ar

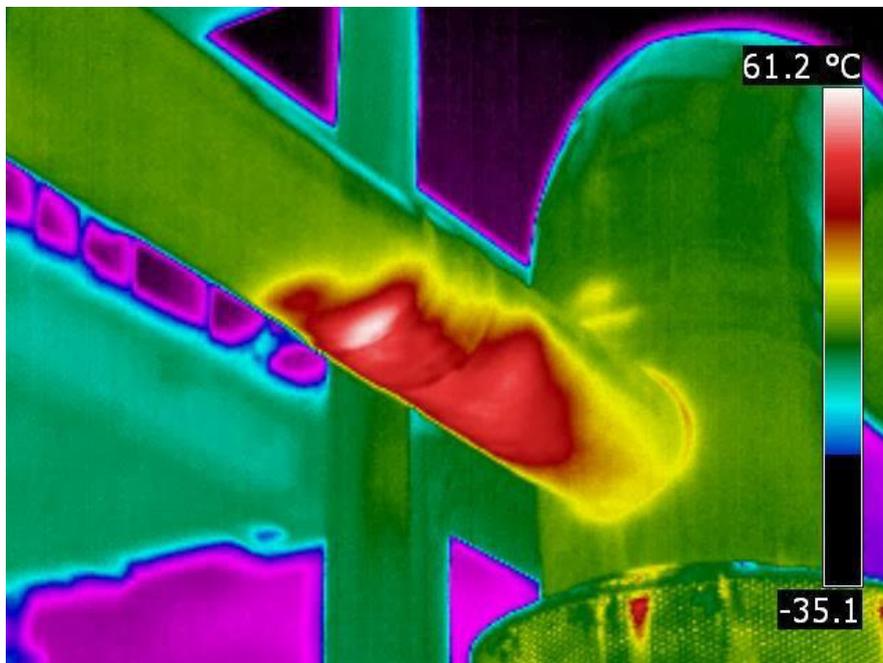


Figura 35 – Imagem de uma termografia de infravermelhos



Os testes de pressão de ar eram no passado consideradas ineficazes na inspecção de redes de saneamento antigas. O desenvolvimento tecnológico na área da robótica permitiu reparações nos locais afectados e executar tamponamentos que permitem selar as condutas (juntas, laterais, etc.), para então proceder, com sucesso, aos ensaios de pressão de ar. Regista-se a fragilidade desta técnica viabilizar apenas ensaios no sistema de saneamento principal, não sendo possível o teste nas laterais ou nas caixas de saneamento.

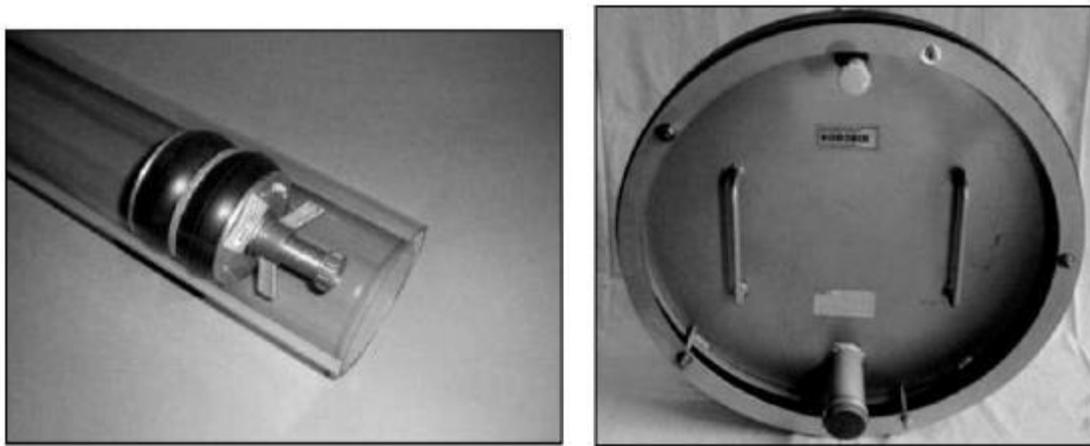


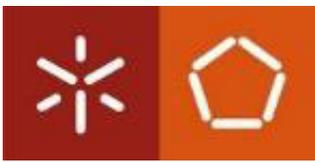
Figura 36 - Instrumentos/aparelhos de teste de ar e de água.

5.9 Teste de água

O teste de água, apesar de ser o mais confiável no rigor dos resultados, relativamente à suspeita de infiltração e vazamento, constitui-se um processo complexo face à tipologia da tarefa e ao tempo de execução. Este processo é considerado como último recurso e apenas após aplicação de métodos alternativos.

5.10 Vigilância manual

A vigilância manual é aplicável em condições de fluxos reduzidos ou inexistentes, de forma progressiva, tratando-se apenas da abertura de orifícios para inspecção. Considera-se um processo económico para a detecção de infiltrações, mas relativamente à avaliação de eventuais exfiltrações não revela eficácia.



5.11 Localização de fugas por eléctrodo enfocado (*FELL-41*)

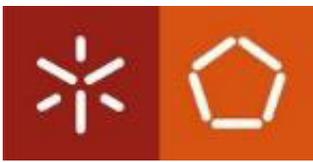
A detecção de fugas com eléctrodo FELL-41 foi desenvolvida na Alemanha e assenta na medição eléctrica do fluxo entre a sonda que viaja no tubo e um eléctrodo à superfície. As deformidades das tubagens com ocorrência de vazamento (que possibilitam fluxos para o interior ou exterior das tubagens) acusam um “pico” no sinal eléctrico, que identifica assim o local da infiltração ou vazamento. A intensidade do referido “pico” no sinal eléctrico está normalmente correlacionada com a magnitude das fugas.

Vantagens importantes da tecnologia FELL-4:

- Localização de juntas com fugas na linha principal (durante o período de tempo seco);
- Avaliação da intensidade da fuga e priorizar reparações;
- Determinação de fugas nas ligações laterais do sistema principal;
- Processo alternativo ao teste de pressão de ar para aceitação de sistemas sanitários novos e renovados.



Figura 37 – Aplicação do teste FELL



A sonda utilizada no sistema de teste FELL-41 (com 75cm de comprimento e 7,5 cm de diâmetro) gera um campo eléctrico que permite proceder à avaliação da conduta visada nas seguintes circunstâncias:

- O campo eléctrico é focado num disco estreito e é colocado perpendicularmente ao eixo longitudinal da sonda;
- Um eléctrodo de superfície (uma estaca de metal) é colocado no solo à superfície;
- Quando a sonda é colocada num tubo não condutor com esgoto (e/ou água), o fluxo de corrente eléctrica entre a sonda e a superfície é muito pequeno;
- As deformidades da tubagem que possibilitam o fluxo do fluido para o interior ou exterior da tubagem, descrevem o percurso entre a sonda e o eléctrodo de superfície, atravessando a parede do tubo não condutor e o solo;
- Quando a sonda se encontra uma deformidade, a corrente eléctrica entre a sonda e o eléctrodo de superfície aumenta.

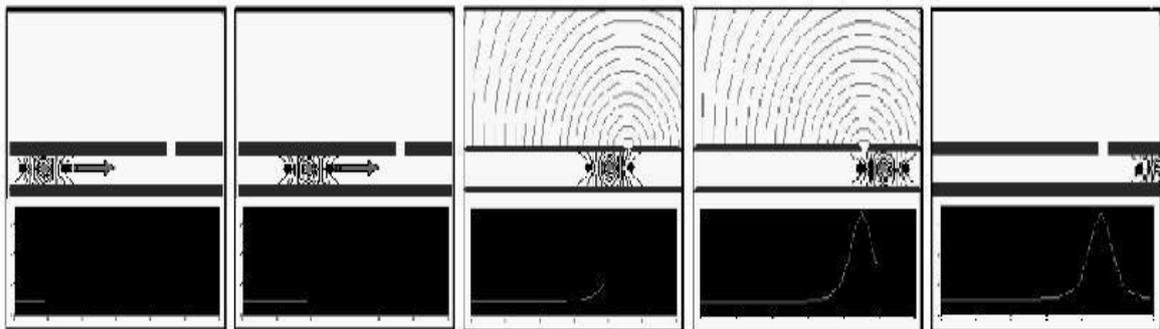
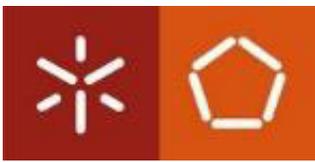


Figura 38 - Representação gráfica do sistema FELL-41

A acima representa graficamente a leitura resultante do processo operativo FELL-41. Observa-se a deslocação da sonda com a ocorrência do “pico” à sua passagem pelas fissuras. E pode-se ver que a sonda à medida que se desloca pelo tubo não há “fugas” de corrente eléctrica, mas quando a sonda se aproxima de uma fissura a corrente começa a escapar-se permitindo uma leitura dos resultados.



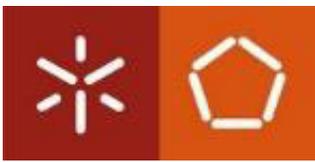
5. 12 Características acústicas de sinais de fugas em tubos plásticos de distribuição de água

Encontramos hoje, disponíveis, uma vasta gama de equipamentos para detecção acústica de fugas. Este procedimento implica na fase inicial o recurso a varetas de audição e microfones para detectar o som induzido pelas fugas de água, colocando-os directamente em contacto com os tubos ou elementos associados (por exemplo, válvulas de controlo). Posteriormente são utilizados microfones para localizar a suspeita de fuga, escutando sons de fuga no pavimento ou solo directamente por cima dos tubos de água. Equipamentos de correlação de ruídos de fuga, os quais são dispositivos baseados em computadores de última geração, são também utilizados para detectar a localização da suspeita de fuga.

Os métodos acústicos de detecção de fugas são considerados eficazes, quando aplicado na detecção de fugas em tubos metálicos. No caso de tubos em plástico, a eficiência deste processo acústico não encontra documentação. São constrangimentos deste processo os sinais sonoros de interferência (por exemplo do tráfego na estrada ou outras fontes), a atenuação excessiva de sinal pela característica dos materiais envolventes e a sensibilidade limitada dos instrumentos. Face à actual e crescente utilização de tubagem em plástico nas redes urbanas, a debilidade na detecção de fugas nestes materiais relevam de importância e constitui-se um alvo de pesquisas por parte de diversas instituições. A AWWARF (American Water Association Research Foundation) são exemplo do investimento nesta área. Regista-se o projecto protagonizado pelo Concelho Nacional de Pesquisa do Canada, que resultou em diversas descobertas e recomendações relativas a procedimentos de medição e análise para uma detecção de fugas em tubagens plásticas bem sucedidas (Hunaidi & Chu, Acoustical Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes, 1999).



Figura 39 - Fuga de água em tubagem plástica



INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis



Figura 40 – Detecção Vareta electrónica de escuta

Componentes do sistema

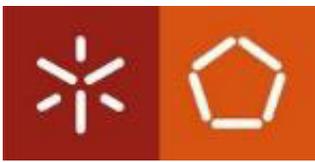
- Unidade principal TMIC
- 3 varetas de extensão (1 metro de comprimento total)
- Acoplamento magnético
- Ponta de escuta
- 3 pilhas LR03 AM4 alcalinas de 1,5 Volt.
- Auscultadores Bluetooth com bateria recarregável de ion Lítio 3,7 Volt. 300 mA
- Cabo de carregamento USB para auscultadores



Figura 41 - Vareta electrónica de escuta

5.13 Rastreador Miniatura Helicoidal de tubos (dsm - Mission Critical Motion Control)

O Rastreador Miniatura Helicoidal de tubos foi criado na sequência da solicitação do Centro de Pesquisa da NASA para o desenvolvimento de tecnologias de inspeção de reduzidas dimensões. Este rastreador, foi concebido para habilitar a aquisição de imagem de pequenos tubos, cujo diâmetro seria inferior a uma polegada, com distâncias superiores a três metros e com curvaturas superiores a 90° tendo raio $> 101,6$ mm. Para responder à necessidade de introduzir o equipamento de inspeção nas tubagens, foi capacitado para uma carga de 2,27 Kg força através do tubo num rácio de 2 a 5 mm/s. A *Mission Critical Motion Control (DSM)* concebeu um rastreador a volta de um motor miniatura de corrente contínua sem escovas e uma técnica de



locomoção única. Esta técnica utiliza rodas que viajam com movimento helicoidal de modo a fazer com que o rastreador se desloque através do tubo.

5.14 Instrumentos de escuta

De entre os instrumentos de escuta disponíveis elencam-se os aquaphones, geofones ou microfones de terra (Figura 40), os quais podem ser mecânicos, electrónicos ou digitais. Os Dispositivos electrónicos/digitais mais avançados integram amplificadores de sinal e filtros de ruído por forma a possibilitar registo indelével e distinguir os sinais de vazamento. Estes equipamentos recorrem a mecanismos de alta sensibilidade ou materiais (tais como elementos piezoeléctricos), para perceber um som ou uma vibração induzida por vazamento.

A operação desta tipologia de instrumento é normalmente acessível, sendo que a eficiência da detecção depende directamente da experiência do operador (Hunaidi, Detecting Leaks in Water Distribution Pipes, 2000).

Flexão de estado sólido fornece uma pré-carga para o actuador de contacto das rodas e cubo rotor das rodas. O cubo rotor é concebido com um ângulo de inclinação para gerar um movimento helicoidal para propulsar o rastreador para a frente e para trás.



Figura 42 - Rastreador miniatura

O desenvolvimento do projecto foi terminado antes que tivessem sido conseguidos refinamentos adicionais de modo a melhorar as capacidades do rastreador. O desempenho experimental do projecto está documentado conforme a tabela de especificações que segue.

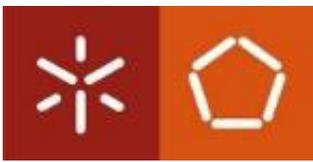


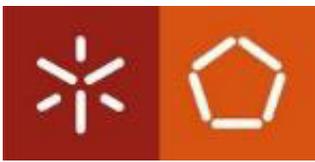
Tabela 3 - Concepção escalável para distâncias e cargas maiores ou menores

| Velocidade (com pouca carga) | ~10 mm/s |
|--|--------------------------|
| Capacidade de tracção (estática) | ~2,72 kgf |
| Capacidade de tracção (dinâmica) | ~0,91 kgf |
| Máxima capacidade de tracção a 3mm/s | ~0,862 kgf |
| Capacidade de contornar curvas – Não testado | Expectável de < 101,6 mm |

5.15 Rastreador de interior de tubos adaptável ao diâmetro interior do tubo (Moghadam, Arbabtafti, & Hadi)

Como refere Raposo (2009) os autores com este artigo procuram demonstrar que um dos requisitos mais importantes para reparação e manutenção de tubagens é a capacidade de monitorizar e avaliar o interior do tubo. Neste artigo foi apresentado um novo aparelho para deslocação dentro dos tubos. O mecanismo emprega três unidades independentes de “lagarta” em borracha, as quais se encontram espaçadas 120° simetricamente. O aparelho emprega um modo activo de adaptação a uma vasta gama de diâmetros de tubo, desde 250 mm até 350 mm. Contudo, esta gama pode ser estendida, aumentando o comprimento das ligações do robot. Também tem a capacidade de se deslocar verticalmente, horizontalmente e através de tubagens curvas. Pode passar por pequenos obstáculos na superfície interior do tubo e navegar através de curvas a 90° no sistema de tubagens com a ajuda de braços com molas. Será também apresentado um algoritmo autónomo ajustável para assistir o operador para melhor regulação da força de contacto sem a utilização de qualquer sensor de força. Finalmente o protótipo foi construído e testado em diferentes situações. Também foi montada uma câmara no robot.

Como refere Raposo (2009) os autores com este artigo procuram demonstrar que um dos requisitos mais importantes para reparação e manutenção de tubagens é a capacidade de monitorizar e avaliar o interior do tubo. Neste artigo foi apresentado um novo aparelho para deslocação dentro dos tubos. O mecanismo emprega três unidades independentes de “lagarta” em borracha, as quais se encontram espaçadas 120° simetricamente.

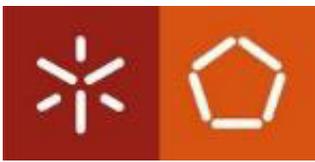


INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

O aparelho emprega um modo activo de adaptação a uma vasta gama de diâmetros de tubo, desde 250 mm até 350 mm. Contudo, esta gama pode ser estendida, aumentando o comprimento das ligações do robot. Também tem a capacidade de se deslocar verticalmente, horizontalmente e através de tubagens curvas. Pode passar por pequenos obstáculos na superfície interior do tubo e navegar através de curvas a 90° no sistema de tubagens com a ajuda de braços com molas. Será também apresentado um algoritmo autónomo ajustável para assistir o operador para melhor regulação da força de contacto sem a utilização de qualquer sensor de força. Finalmente o protótipo foi construído e testado em diferentes situações. Também foi montada uma câmara no robot.

A valência do investimento nesta temática emerge da necessidade de monitorização e avaliação do interior das tubagens em consequência da descrição de problemas internos de corrosão com métodos de teste não destrutivos, sendo estes insuficientes para avaliar o dano, e onde a inspecção visual é vital para a correcta análise do problema e posterior acção rectificativa do mesmo.

O método mais recorrente nestes casos é o corte de uma pequena secção de tubo para amostragem, apesar de se associar a este processo altos custos de reposição e tempos elevados de operação. Verificam-se ainda riscos na apresentação de resultados sobre a análise de uma longa extensão de tubagem, face a distribuição não uniforme da taxa e depósitos de corrosão ao longo do tubo. Assim é justificada a necessidade de recorrer a um rastreador para análise de tubagens. São equipamentos para integrar instrumentos de monitorização, incluindo sensores e/ou câmaras para monitorizar a integridade do tubo e ajudar a diagnosticar a reparação ou manutenção necessária.



6. Métodos de reparação

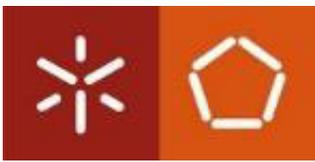
A corrosão apresenta-se hoje como um problema relevante e transversal, a rápida degradação das estruturas constitui um problema técnico grave cada vez mais evidente em virtude do processo de modernização das sociedades. A problemática é transversal, pois não incide apenas nas estruturas metálicas, cuja longevidade depende das intervenções de manutenção anticorrosiva (periódica). O problema é complexo e está presente também nas estruturas de betão armado, que, como Machado (2005) salienta, foram muitas vezes consideradas tão resistentes e duráveis que dispensavam qualquer tipo de manutenção ou reparação. Esta noção comprometeu as estruturas das construções que não foram sujeitas a qualquer processo de manutenção, sofrendo a corrosão natural do envelhecimento dos materiais, do aumento de carga sobre as estruturas (consequência, por exemplo, do aumento populacional nos edifícios de utilização pública).



Figura 43 - Exemplo de degradação do betão armado

Em geral, a tarefa de reabilitação de uma obra de construção civil consiste em quatro fases distintas (Machado, 2005):

- Fase de inspecção antes dos trabalhos de reabilitação;
- Fase de preparação de um projecto adequado com um sistema de controlo de qualidade das operações principais;



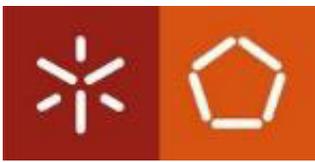
- Fase de realização de trabalhos de reabilitação;
- Fase de verificação dos trabalhos executados;

A utilização do betão data do início do século XX, pelo que se considera um material relativamente recente, cujo uso, em Portugal, teve expansão significativa a partir da segunda metade do século XX, e caracterizaram de forma influente a concepção dos edifícios e restantes estruturas. As técnicas tradicionais consagradas em séculos de experiência foram progressivamente abandonadas. Os engenheiros e construtores exaltaram nos seus projectos o recurso ao betão e às suas capacidades de resistência e moldagem. Surgiram inúmeras pesquisas acerca do comportamento deste material e conseqüentemente foi alvo de um regulamento autónomo para a sua aplicação em estruturas (Appleton, Reabilitação de edifícios antigos - Patologias e tecnologias de intervenção (1ª edição), 2003). No entanto, esta regulamentação, que discriminava a utilização adequada do betão, não conseguiu evitar o desrespeito pelos factores determinantes então indicados para garantia de longevidade do material (fabrico, aplicação e manutenção). Esta lacuna viu-se agravada pela procura crescente de betão com conseqüências visíveis na construção civil.

Os custos elevados dos processos de construção tradicional face à vertente funcional, construtiva e estética do betão, conduzem à viabilidade da sua utilização, mesmo interessante até em termos financeiros (Appleton, Inspeção e reabilitação de pontes, 2005).

Estes argumentos reforçaram a necessidade crescente no investimento em pesquisas acerca de técnicas na abordagem da reabilitação das estruturas em betão. O conhecimento sobre este material induz à chamada de atenção para o desenvolvimento de estudos sobre outros materiais igualmente presentes nas obras de construção civil. Diversos elementos estruturais como o aço, a madeira, a pedra, etc., bem como elementos não estruturais, como as pedras ornamentais, o azulejo, a cal, as tintas, etc., reclamam a intervenção na área de reabilitação. Considera-se cada vez mais relevante o investimento na descoberta de técnicas inovadoras, mais eficazes e eficientes para a conservação e manutenção (Grilo, 2007).

No caso desta dissertação, as técnicas de reabilitação estudadas e de maior relevância incidem em componentes de sistemas de abastecimento de água,



Porque o dispositivo alvo de projecto desta dissertação contempla também a possibilidade de inspecção e reparação de condutas de água, mais especificamente em condutas, algumas das quais compostas também por betão armado.

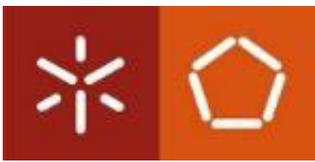
A reabilitação de condutas sem comprometer as áreas envolventes (abertura de valas) está disponível no mercado por via de dois processos:

- O revestimento das condutas, assente na aplicação de um material no interior da conduta com a mesma resistência estrutural ou maior capacidade de transporte;
- O re-entubamento que visa a inserção de uma segunda conduta no interior da conduta a reabilitar (Grilo, 2007).

A alternativa em vala aberta não é contemplada nesta dissertação, uma que o principal objectivo desta visa a acessibilidade intratubular, sendo que, se observa o facto de um dos maiores custos no processo de reparação das condutas se baseia na furação e escavação do solo. Existem vantagens evidentes no acesso às condutas se o mesmo for feito de forma a não destruir o solo nem furá-lo.

6.1 Revestimento com argamassa de cimento

O revestimento com argamassa, também designado por Cement (Technology, 2009) consiste no revestimento interno da conduta com uma argamassa de cimento. A composição da argamassa contém cimento Portland e areia de quartzo em partes iguais. A elevada resistência e durabilidade resulta do conjunto formado pela camada de argamassa de cimento em contacto com o material da conduta. Este processo aplica-se a condutas metálicas de aço e ferro fundido. A acção protectora baseia-se fundamentalmente no agente passivo, efectuado através do isolamento mecânico da parede metálica da conduta e no agente activo, conseguido pela conversão química da camada de cimento com o óxido de ferro na zona da fronteira entre a argamassa de cimento e a parede metal da conduta., processo concretizado pela interacção da água que se dissemina para o interior da argamassa.



Considera-se a viabilidade deste processo de revestimento nas condutas com diâmetros entre 80 e 2000 mm. As condutas de diâmetro inferior implicam aberturas (poços de acesso) com cerca de 2.00x1.50 m, em intervalos de 150 m, sendo que, em condutas com diâmetros superiores a 600 mm, o intervalo entre poços é estimado nos 400 m (Grilo, 2007). Estas operações estão condicionadas à extracção de um troço de conduta (aprox.1.00m.).

6.2 Polimento das condutas

O polimento constitui um procedimento essencial na reabilitação de condutas e é acompanhado pelo revestimento com a argamassa de cimento já referido. Procede-se à raspagem das incrustações e de outros resíduos de corrosão, cada seccionamento da conduta, com raspadores de aço e limpeza simultânea com escovas de borracha. Um dispositivo semelhante a um pulverizador aplica a argamassa, que deverá submeter-se ao tempo necessário de secagem (10 a 16 horas), procedendo-se com a limpeza com água sob pressão. A reinstalação da conduta na rede deverá acontecer após 24 horas da intervenção.

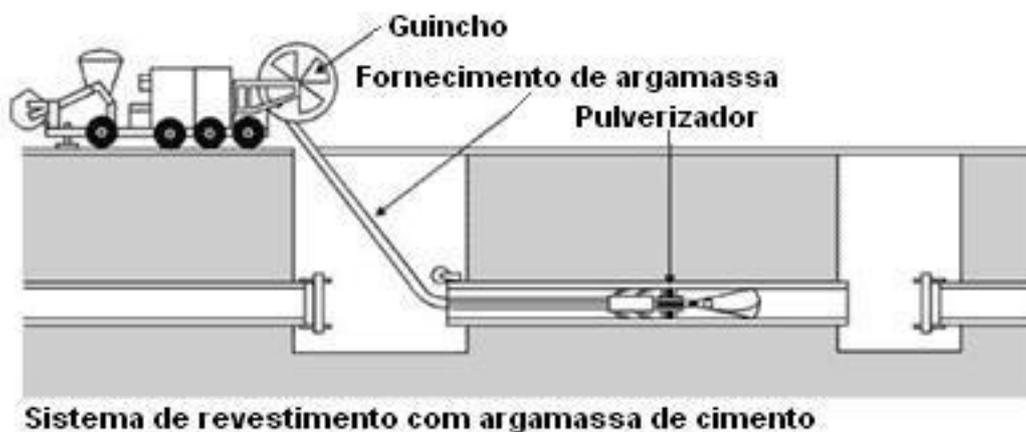


Figura 44 - Esquema do sistema de revestimento com argamassa de cimento

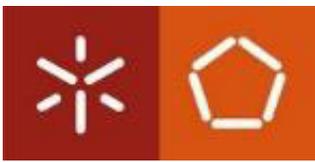
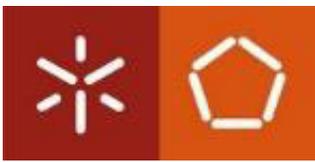


Figura 45 – Da esquerda para a direita: Mecanismo de revestimento com argamassa; Aplicador de argamassa; Raspador de aço



6.3.1 Vantagens e inconvenientes

Vantagens do revestimento com argamassa:

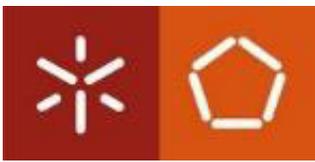
- O método é um processo compatível com a defesa do ambiente, pois não utiliza materiais tóxicos na sua execução de limpeza nem durante o revestimento;
- As perturbações à superfície são reduzidas;
- As perturbações de tráfego são mínimas (excepto na abertura dos poços);
- O tempo necessário de intervenção é mínimo;
- Os seus custos também são reduzidos comparativamente com outro tipo de soluções (por exemplo, revestimento com resinas epoxy).

Inconvenientes do revestimento com argamassa:

- Técnica dispendiosa e morosa em troços longos de condutas;
- Após o polimento da parede interior da conduta, pode haver necessidade de alteração da técnica, uma vez que esta técnica não confere uma maior durabilidade estrutural à conduta;
- Considerada uma solução provisória dadas as características do material de revestimento utilizado (cimento); e não permite um aumento significativo de capacidade hidráulica do sistema (Grilo, 2007).

6.4 Revestimento com resinas epoxy

Como alternativa ao revestimento com argamassa apresenta-se o revestimento com resinas epoxy ou *Spray Lining* (*Subterra - Effective solutions, Total capability.*, 2003). Esta técnica visa a aplicação de resinas líquidas, epoxy, na conduta deteriorada com um *spray*. Considera-se a pertinência desta aplicação na ocorrência de problemas na qualidade da água devido à corrosão da parede interna da conduta.



INSPEÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

O epoxy é um material de múltiplas aplicações em diversos sectores industriais, particularmente na indústria da construção civil. A composição da resina epoxy tem evoluído, no sentido de garantir a durabilidade da camada aplicada e um a maior resistência à corrosão. A resina é recorrente na reabilitação de condutas de abastecimento de água, de combate a incêndios e de abastecimento industrial.



Figura 46 - Pormenor da ponta dispersora para revestimento com resinas epoxy



Figura 47 - Aplicação da resina em conduta de grandes dimensões

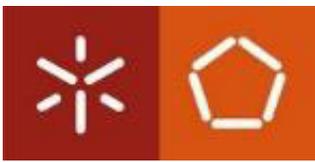


Figura 48 - Tubo revestido com resinas epoxy

6.4.1 Processo

O processo de aplicação das resinas é executado por via de uma ponteira de spray e por centrifugação. O caudal do spray determina a espessura da camada na conduta que também está condicionado pela velocidade de introdução/passagem na conduta. Este processo anticorrosivo é implementado apenas nas paredes interiores das condutas.

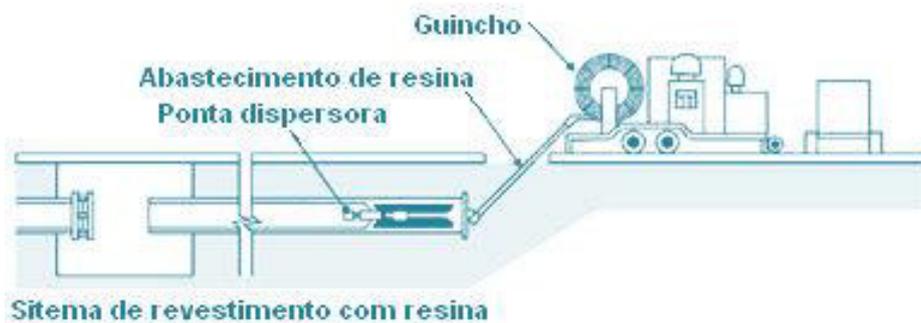
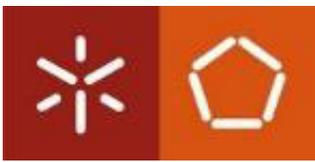


Figura 49 - Esquema do sistema de revestimento com resinas epoxy



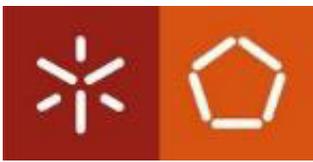
6.4.2 Vantagens e inconvenientes

Vantagem do sistema de revestimento com resinas epoxy:

- Técnica de operação mais expedita comparativamente ao revestimento com argamassa de cimento;
- As resinas têm uma maior durabilidade e a superfície adquirida com este método é substancialmente mais polida;
- Maior controlo na espessura da camada de resina comparativamente ao revestimento com argamassa de cimento;
- Não bloqueia ramais prediais;
- Técnica preferencial para a reabilitação de condutas com corrosão;
- A plicação das resinas garante a resolução de problemas com a qualidade da água.

Desvantagens do sistema de revestimento com resinas epoxy:

- Método não aconselhável para troços muito longos (mais de 1000 m), nem para condutas com diâmetros superiores a 1000 mm;
- Método não aconselhável à resolução de problemas relevantes de fugas, ou problemas estruturais na conduta existente apesar de haver potencial para tal;
- Não permite um aumento significativo da capacidade hidráulica da conduta (Technology, 2009).

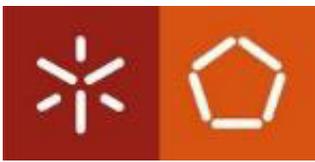


6.5 Reparação de tubagens por moldação de resina (RTM)

As reparações em tubagens ou sua substituição implicam constrangimentos de natureza diversa pois, podem comprometer o tráfego e produzir grande quantidade de lixo e desperdício inerentes às escavações. Implica ainda o recurso a equipamentos pesados, a intervenção de longa duração com elevado custo financeiro. Neste estudo, o processo de reparação ou reforço de tubos subterrâneos é utilizando tecido de fibra de vidro e compósitos poliméricos através de RTM (resin transfer molding). Este processo requer menores tempos de operação e custos relativamente a equipamentos também de operação sem abertura de terreno.

6.5.1 Processo

O processo de desenvolvimento envolve a modelação do reforço (pré-forma) a aplicar, colocado na cavidade interior do molde, sendo este fechado e bloqueado pelo processo RTM (Figura 50). Prossegue-se com a injeção da resina no molde por via de uma abertura e transferida até a pré-forma. O fluxo de resina é interrompido quando jorra pelo respirador do molde e iniciado o processo de reabilitação da conduta. O processo é concluído após a resina se encontrar curada e ter-se removido a estrutura formada do molde. O processo de reabilitação por via da moldação com resina encontra-se representado no esquema que se segue.



INSPEÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

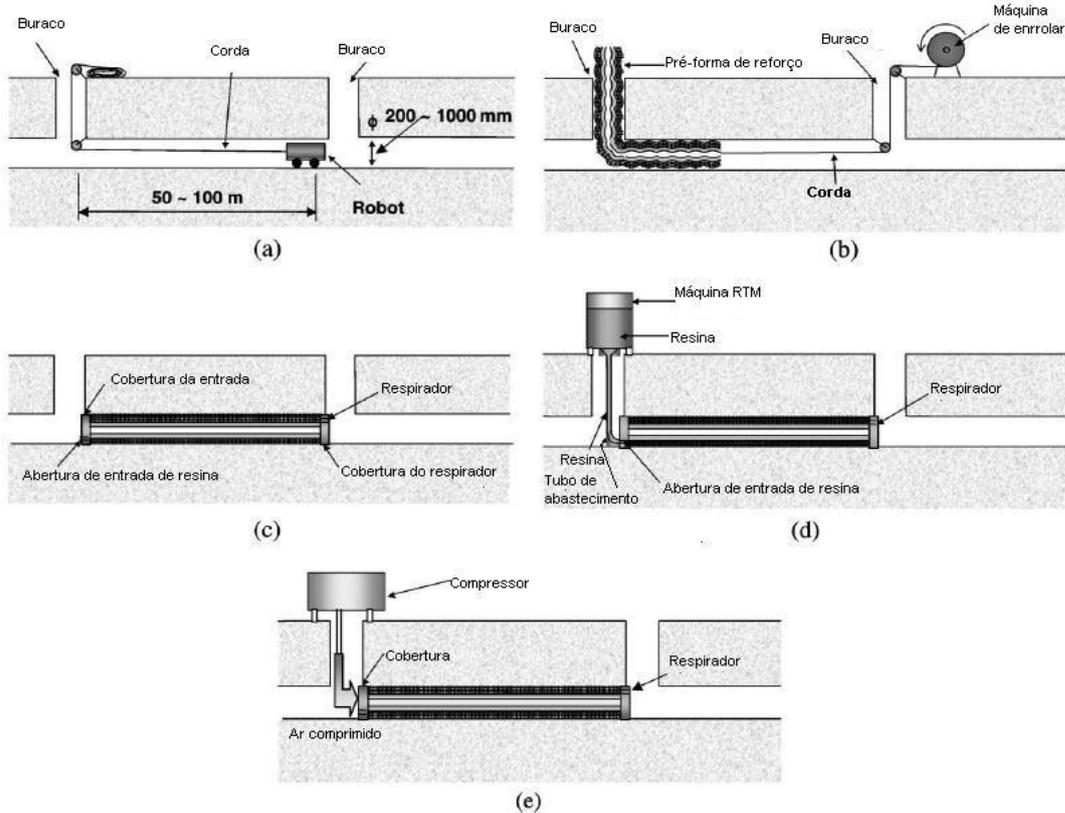
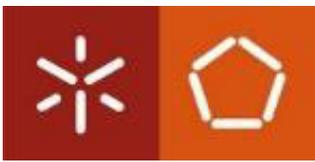


Figura 50 – Processo RTM

6.5.2 Descrição das fases do processo (Raposo, 2009):

1. Limpeza interior do tubo subterrâneo através da utilização de um equipamento robótico para remoção dos sedimentos e incrustações. Posteriormente este equipamento transporta um cabo de um orifício ao outro. A pré-forma de reforço é ligada ao cabo e puxada para o interior do tubo;
2. As extremidades do reforço colocado no tubo são fechadas utilizando duas coberturas que são compostas de um anel em aço e um disco em acrílico, na qual também se encontra o processo de montagem da cobertura. Neste método a cobertura e o reforço são unidos com um grampo que é fortemente ajustado ao anel de aço. O anel em aço suporta o peso e funciona como vedante para a resina, enquanto que o disco em acrílico permite uma visibilidade para o interior onde se vê o estado da resina. Depois de se selar o reforço no tubo, é fornecido ar comprimido através do



respirador para expandir a película interna do reforço a qual faz com que a película externa e a pré-forma de fibra de vidro encostarem à superfície interna do tubo a ser reparado ou reforçado, e ao mesmo tempo remove rugas que se podem formar durante a operação de inserção. Posteriormente o ar comprimido na cavidade formada entre as duas coberturas e a película interna é removido para facilitar o fluxo de resina;

3. Após a remoção da pressão na cavidade, é injectada a resina termo-rígida de poliéster não saturada na pré-forma de fibra de vidro utilizando uma máquina de RTM através da abertura de entrada de resina presente na cobertura. Uma vez que a resina de poliéster não saturada é composta por um monómero de baixa viscosidade, torna-se fácil a injeção sob baixa pressão de resina na pré-forma.

4. Após a injeção de uma quantidade predeterminada de resina, a máquina RTM é separada da abertura de entrada de resina. É fornecido ar comprimido para a cavidade de modo a que a resina seja distribuída uniformemente na pré-forma de fibra de vidro e também para que haja um contacto justo entre o reforço e a superfície interna do tubo. O ar e os voláteis produzidos durante o processo de cura do poliéster na pré-forma foram evacuados pelo respirador através da aplicação de vácuo neste. Após a resina na pré-forma esteja totalmente curada, as coberturas das extremidades do tubo são removidas para completar o processo (Lee, Chin, Kwon, & Yoo, 2002).

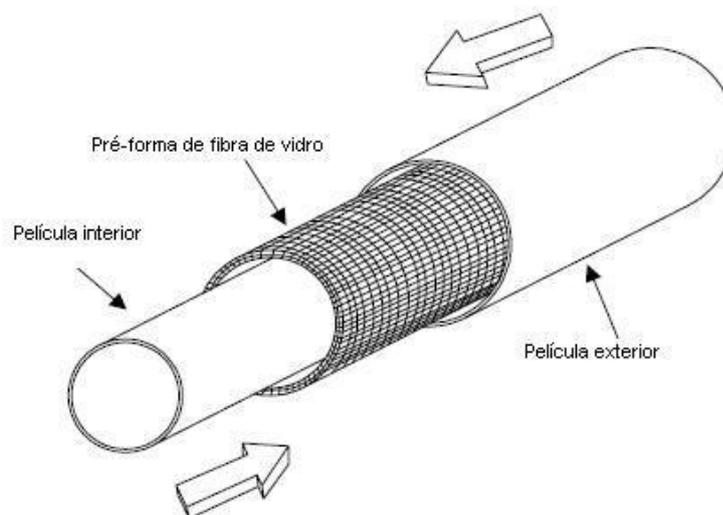
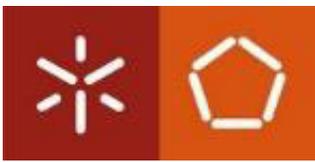


Figura 51 - Preparação do reforço composto



A película exterior do reforço tem duas funções: a protecção da pré-forma de fibra de vidro contra danos provocados durante a inserção do reforço no interior do tubo subterrâneo, e a selagem da resina do reforço. As películas interior e exterior evitam que a pré-forma de fibra de vidro seja impregnada com água subterrânea ou alguma água residual que tenha ficado no tubo. Ao colar-se adesivo com viscosidade apropriada na superfície exterior da película externa conseguimos o efeito de lubrificação durante a operação de inserção tal como adesão entre o reforço e a superfície interna do tubo subterrâneo (Figura 52).

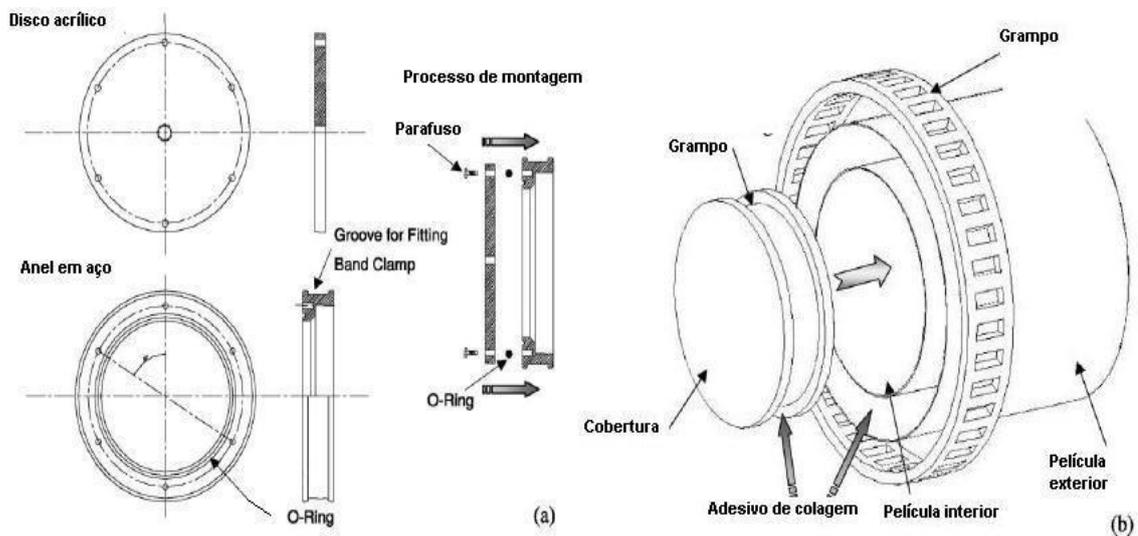
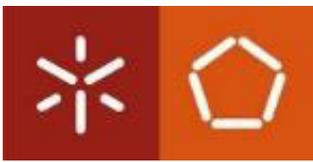


Figura 52 - Esquema de componentes e de montagem



6.5.3 Selecção da resina

A matriz do material compósito impede a flexão das fibras e sustenta cargas de compressão. A selecção da matriz apropriada é decisiva, particularmente em estruturas de condutas subterrâneas submetidas a cargas de compressão e a ataque químico. No processo de reabilitação de tubos subterrâneos por RTM, o enchimento adequado do molde está condicionado ao grau de viscosidade (deve ser reduzido) da resina de polímero termo rígida. Este aspecto garante o preenchimento completo e homogéneo da pré-forma em fibra. O custo financeiro que envolve a selecção da resina para a reabilitação de tubagens são muito importantes, de entre as resinas existentes, a mais recorrente no processo RTM é a resina de epoxy (com melhores propriedades mecânicas), no entanto o encargo financeiro das intervenções supera largamente o custo da resina de poliéster não saturada (com baixa viscosidade, do tipo poliéster ortoftálica⁶ não saturada PC670). O custo desta resina é significativamente mais reduzido.

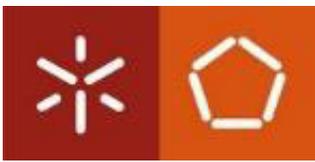
6.6 STOP IT ® - Pipe repair system

No âmbito da temática da reparação de canalizações importa referir a empresa designada *InduMar – Priducts, Inc.* que comercializa um produto de interesse relevante para o protótipo projectado.

O STOP IT® é promovido pela empresa como sendo de execução rápida, eficiente e cómoda na operacionalização do processo que contempla apenas o recurso ao epoxy moldável e à fita de malha de fibra de vidro.

Em conformidade com a documentação disponível o STOP IT® aplica-se em produtos compatíveis com poliuretano. O operador do processo determina a aplicabilidade do produto em função da reparação visada tendo em conta que a durabilidade da reparação pode eventualmente ser afectada por ácidos fortes ou bases.

⁶ Resina ortoftálica - São aquelas que na sua composição, são utilizadas como ácidos modificadores, o ftálico ou seu anidrido. Suas propriedades mecânicas e químicas são inferiores às demais, devido à dificuldade de se obter polímeros de alto peso molecular. O anidrido ftálico tem forte tendência de se regenerar a partir dos meios ésteres do ácido ftálico (reacção reversível), facto que incrementa a presença de espécies de baixo peso molecular, altamente sensíveis ao ataque químico.



6.6.1 Resistência química

Conforme as descrições disponibilizadas, o STOP IT® sustenta a imersão durante 35 dias nos seguintes químicos:

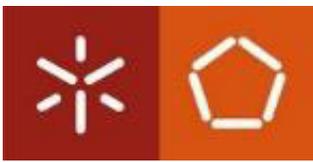
- Anidrido Acético;
- Amónia;
- Hidróxido de Amónio (10%);
- Decil Cloreto de Amónio;
- Combustível diesel;
- Éter dietílico;
- Acetato de Etilo;
- Éter etílico;
- Etileno glicol;
- Gasolina;
- Ácido clorídrico;
- Óleo lubrificante;
- Hidróxido de sódio;
- Ácido sulfúrico a 10% e 20%.

O uso do STOP IT® em linhas de água potável é considerado aceitável (pelo WRc7 - Reino Unido). O Kit *FIX STIX™ EPOXY* inclui a certificação NSF (*Public Health and Safety Company*).

Considera-se ainda a capacidade da fita de reparação, quando sujeita a altas pressões, não tende a fissurar ou estilhaçar.

6.6.2 Propriedades físicas

- **Prazo de validade:** Dois anos a partir da data de compra se preservado entre 5° e 28°C)
- **Cor:** Branco ou preto
- **Força Tênsil** (ASTM D 638-111): 3,920 psi (275 kg/cm²)
- **Limite de integridade** (ASTM D 2095-72): 230 psi (16 kg/cm²) média



- **Flexão** (ASTM D 790-1-B): 2,260 psi (159 kg/cm²)
- **Dureza** (ASTM D 2240): 82 (Shore D)
- **Capacidade de retenção de pressões:** Recomendável para pressões acima de 400 psi (28 kg/cm²)
- **Resistência** a **temperatura:**
 - Contínua: -29° a 121°C
 - Intermitente: 121° a 260°C
- **Tempo de aplicação:** 3 to 5 minutos para 10° a 27°C
- **Tempo de cura:** para 1/2" de espessura (1.27 cm) - 30 minutes

6.7 Re-entubamento simples

O autor Grilo (2007) salienta o processo de re-entubamento simples, também designado por *sliplining* (Subterra - *Effective solutions, Total capability.*, 2003) ou *pipe relining* como processo cujo objecto assenta na colocação de um tubo com diâmetro mais reduzido no interior da conduta a reabilitar. É utilizado sempre que se pode diminuir o diâmetro da conduta inicial. É um processo onde domina a utilização de materiais como o PVC e o PEAD (Figura 53) (Drain-Spec, 2008).

⁷ WRc – Grupo de pesquisa que fornece consultoria nos sectores de água, lixo e ambiente. www.wrcplc.co.uk

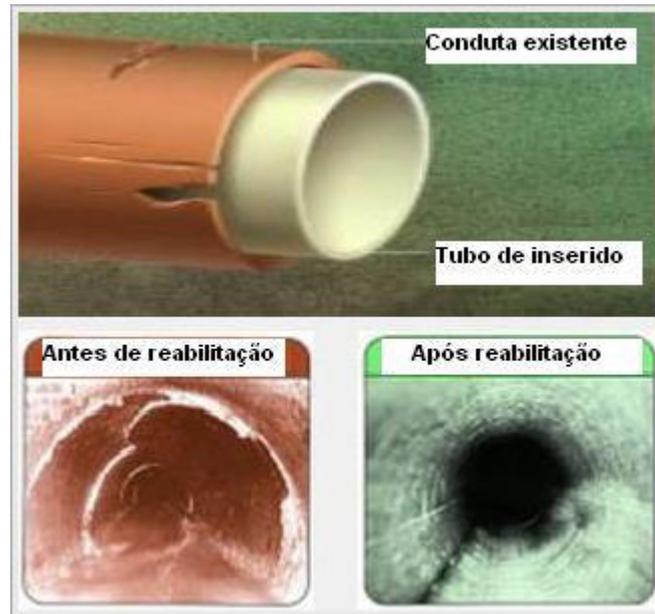
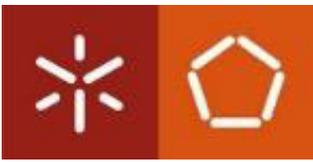


Figura 53 - Re-entubamento simples

6.7.1 Processo

O entubamento é executado após a limpeza e polimento do interior da conduta, sendo aconselhável proceder-se a uma inspecção com um sistema CCTV.

Fases do processo:

- Principia com a ligação de um cabo ao tubo que se pretende introduzir na conduta receptora;
- Posteriormente o cabo é puxado por um macaco hidráulico, arrastando o tubo dentro da conduta antiga, até que o troço que se pretende reabilitar esteja totalmente abrangido pelo novo tubo;
- Ponderar quanto ao preenchimento do espaço vazio entre as duas condutas;



- Caso o tubo com o qual se pretende reabilitar for de comprimento inferior ao da conduta que se pretende reabilitar, procede-se ao aumento do seu comprimento através da colagem dos dois topos ou pela inserção de um de diâmetro ainda inferior;
- A colagem deverá ser devidamente monitorizada de acordo com o procedimento de controlo de qualidade.

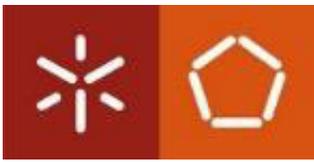


Figura 54 - Re-entubamento simples

6.7.2 Vantagens e inconvenientes

Vantagens na implementação do re-entubamento simples:

- Simplicidade de aplicação;
- Possibilidade de progressão em troços longos;
- Não perturbação de obras (ou outras actividades) circundantes;
- Possibilidade de aplicação em longos troços;



- Facilidade de contornar curvas e pendentes elevadas;
- Variada gama de abrangência de diâmetros;
- Rápida instalação;
- A conduta a reabilitar serve de protecção ao novo tubo resolvendo os problemas de pequenas fugas existentes.

Desvantagens na implementação do re-entubamento simples:

- Apesar deste processo técnico ser recorrente na reabilitação de troços de conduta em redes de distribuição, face à perda de alguma capacidade de transporte, a sua utilização não é aconselhável quando se suspeita da presença de sobrecargas significativas e diametrais na conduta ou em sistemas submetidos a grandes pressões (uma vez que os materiais utilizados neste processo são o PVC e o PEAD);
- Sempre que exista uma fuga, o local onde a água aparece à superfície pode não corresponder ao local onde a fuga realmente ocorreu, podendo incorrer-se no erro de reabilitar um troço de conduta em boas condições (registra-se a relevância da inspecção com CCTV).

6.8 Re-entubamento por destruição da tubagem existente

O re-entubamento por destruição da tubagem, processo existente, também designado por *pipebursting* (Subterra - *Effective solutions, Total capability.*, 2003) tem por objectivo introduzir uma nova tubagem de igual ou maior diâmetro no interior da conduta existente, destruindo esta através de um cone hidráulico ou pneumático que arrasta atrás de si a tubagem nova e progride conforme a destruição da conduta antiga.



O recurso a este processo é aplicável em sistemas de abastecimento de água, sistemas de transporte e distribuição de gás (para baixas pressões) e em sistemas elevatórios de águas residuais.

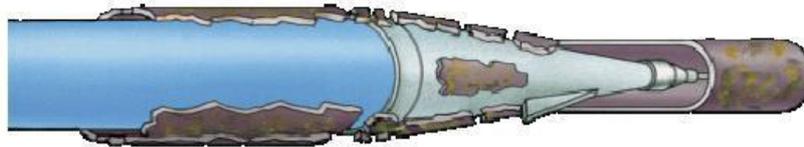


Figura 55 - Destruição da conduta antiga.

6.8.1 Processo

O processo de destruição contínuo de condutas implica o recurso a uma unidade de avanço FIG impulsionada (por exemplo por ar comprimido) para o interior da conduta inoperacional sendo que, simultaneamente é puxada por intermédio de um cabo.

A conduta nova é directamente puxada pela unidade de avanço forçando a conduta existente à expansão lateral dos fragmentos, resultantes da destruição da conduta velha, para o solo circundante. As caixas de visitas servem o acesso às intervenções, ou eventualmente, se procede à abertura de poços de acesso especificamente abertos para a intervenção. As ligações dos ramais à nova conduta são efectuadas nos poços de acesso (ou caixas de vista).

Tipologia do avanço da unidade:

- Avanço por rebentamento dinâmico, onde o martelo de expansão avança por meio de ar comprimido e a energia cinética do pistão de percussão destrói a conduta antiga e simultaneamente faz progredir o martelo e a nova conduta;
- Avanço por rebentamento estático em que o martelo avança por meio de pressão hidrostática controlada a partir de um mecanismo de expansão (Johnson - Service Company, 2004).

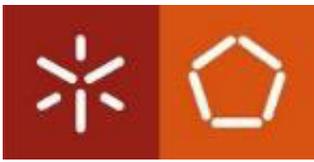
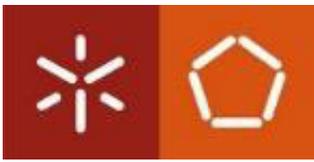


Figura 56 - Re-entubamento por destruição - pormenor de funcionamento

6.8.2 Vantagens e inconvenientes

Vantagens na implementação do re-entubamento por destruição:

- Progressos de instalação relativamente rápidos ao longo de grandes extensões de uma só vez (mais de 1500 m);
- Processo ideal para situações em que se necessita de um aumento do diâmetro da conduta ou de substituição por um material que tenha maior resistência à compressão diametral;
- Processo economicamente viável, quando mais funda estiver implantada a conduta, quando não é possível a abertura de valas, ou quando os solos são instáveis requerendo entivação.



Desvantagens na implementação do re-entubamento por destruição:

- Apesar de tudo, este processo provoca algumas vibrações e ruído, o que em locais urbanos (ex: escolas ou hospitais) ou rurais (ex: zonas protegidas) pode não ser o mais aconselhável;
- Pode provocar perturbações no terreno ou em tubagens adjacentes e obriga à abertura de poços de ataque de alguma extensão, como se pode ver no facto que pode não ser exequível em zonas urbanas.



Figura 57 - Zona de ataque para execução do processo

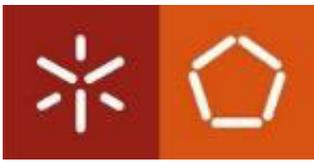


6.9 Re-entubamento com tubo com diminuição diametral temporária

O re-entubamento com tubo com diminuição diametral temporária é um processo conhecido por *Rolldown* (Subterra - *Effective solutions, Total capability.*, 2003) (*ProLine Technologies*), tem por objecto a reabilitação de condutas por via da introdução de tubos de polietileno comprimidos diametralmente no interior da conduta existente. O processo foi concebido para solucionar problemas de condutas com patologias estruturais e/ou não estruturais, especificamente para tubos com diâmetros entre os 100 e 500 mm. Pode ainda ser desenvolvido para curvas até aos $11^{\circ}25'$ e funcionar como uma conduta sujeita a uma pressão comum ou para tubos de pequenas reparações.



Figura 58- Compressão diametral do tubo



6.9.1 Processo

O procedimento resume-se à introdução de um tubo de polietileno através de dois rolamentos concêntricos, tal como se pode ver na, conferindo uma redução de diâmetro, após de ter sido efectuado o polimento da superfície interior do tubo a reabilitar e de modo a poder ser introduzido no interior da conduta existente. Em seguida, e quando a água é introduzida na nova conduta, o tubo retoma o diâmetro inicial, minimizando assim as perdas em cruzamentos ou curvas e consequente aumentando a capacidade da conduta.



Figura 59 - Inserção de conduta nova

6.9.2 Vantagens e inconvenientes

Vantagens do Re-entubamento com tubo com diminuição diametral temporária:

- Rápida execução, podendo ainda ser aplicada a extensões de conduta superiores a 1500 m por cada inserção, voltando apenas ao diâmetro original quando os técnicos assim o desejarem;
- Possibilita uma instalação mais eficiente e versátil cujo procedimentos de inserção toleram a realização de outros trabalhos entre diferentes troços;



- Para além do processo ser utilizado em condutas de abastecimento e distribuição de água, também é viável em condutas de distribuição de gás, em instalações elevatórias de esgotos e em *pipelines* industriais;

6.9.3 Desvantagens do Re-entubamento com tubo com diminuição diametral temporária:

- Apesar de se tratar de um método utilizado correntemente, apresenta um elevado preço, não sendo recomendado para condutas que não necessitem de reabilitação estrutural (Grilo, 2007), (Technology, 2009).

6.10 Re-entubamento com tubo de parede dobrada

O processo de re-entubamento com tubo de parede dobrada, também designado por “*Sublime*” (Technology, 2009), tem por objecto a introdução de um tubo de PE previamente dobrado em fábrica no interior da tubagem a reabilitar. Mantém-se a forma de “U” com umas tiras que serão removidas após a inserção. Uma vez dentro da tubagem a reabilitar, pressuriza-se o tubo dobrado de modo a este rebentar com as tiras e adquirindo a forma original adaptando-se ao tubo receptor e selando as fugas, garantindo a prevenção contra corrosão. Processo utilizado para condutas de parede fina, numa gama de diâmetros entre 75 e 1600 mm, podendo vencer curvas até aos 45°. Comparativamente a este método designado de “*Sublime*”, registam-se também outros muito semelhantes, sendo o “*Subcoil*” idêntico mas para condutas de diâmetros inferiores, e o “*Thermopipe*” que consiste de um tubo de PE reforçado com uma malha de poliéster de alta resistência, mais adequado a condutas pressurizadas, sendo fornecido de fábrica com a forma de “C” e depois de inserido dentro da conduta a reabilitar, necessita de aquecimento para expandir, com isto conseguindo-se um contacto mais justo com o tubo receptor.



6.10.1 Vantagens e inconvenientes

Vantagens do re-entubamento com tubo de parede dobrada:

- Processo relativamente económico;
- Resolve a questão das fugas na conduta existente;
- Resolve problemas de corrosão e, como fornece um re-entubamento justo pode aumentar a capacidade de transporte da conduta;
- Verifica-se a possibilidade de instalação em troços com mais de 1000 m de comprimento;
- A rápida instalação minimiza o tempo de interrupção do abastecimento através da conduta existente e reduz o potencial custo de "relining";

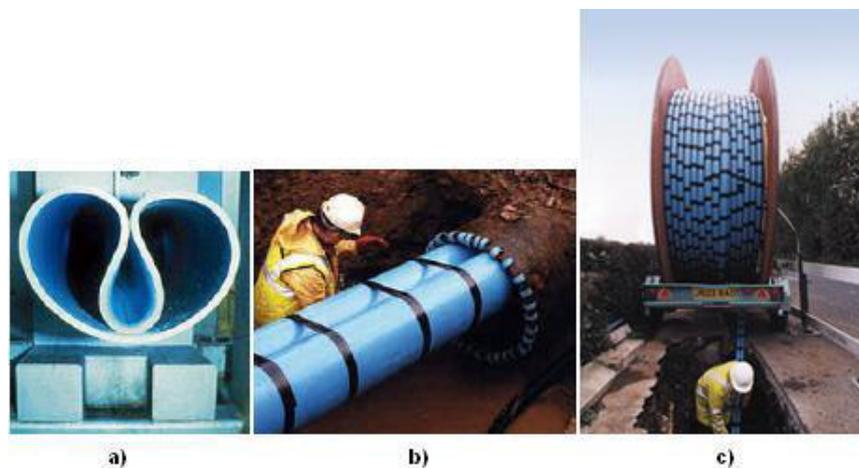
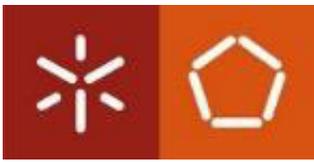


Figura 60 - Re-entubamento por parede dobrada: a) pormenor de fábrica; b) inserção do tubo (método "Sublime"); c) Método "Subcoil".



- Não perturba serviços adjacentes e tem um tempo de vida útil superior a 50 anos.

Desvantagens do re-entubamento com tubo de parede dobrada:

- Pode provocar danos no material da conduta aquando da expansão do polietileno;
- A conduta reabilitada não ganha uma capacidade de resistência diametral tão grande quanto outros métodos, como o de re-entubamento por destruição da tubagem existente;
- Este processo apesar de os tubos já serem fornecidos com a parede dobrada de fábrica, também há a possibilidade de realizar essa dobra em obra, mas torna necessário o uso de máquinas adequadas e conseqüentemente torna mais moroso o processo.



Figura 61 - Re-entubamento por parede dobrada "*in situ*"



6.11 Revestimento por tira em espiral

Processo que consiste no enrolamento de uma tira de plástico de forma espiral ou helicoidal à medida que se vai inserindo dentro da conduta a reabilitar. Este processo é realizado no local e efectua-se a expansão espiral da conduta e posterior preenchimento das juntas através da injeção de argamassa entre esta e a conduta anfitriã. Método recorrente em esgotos.



Figura 62 - Revestimento por tira em espiral

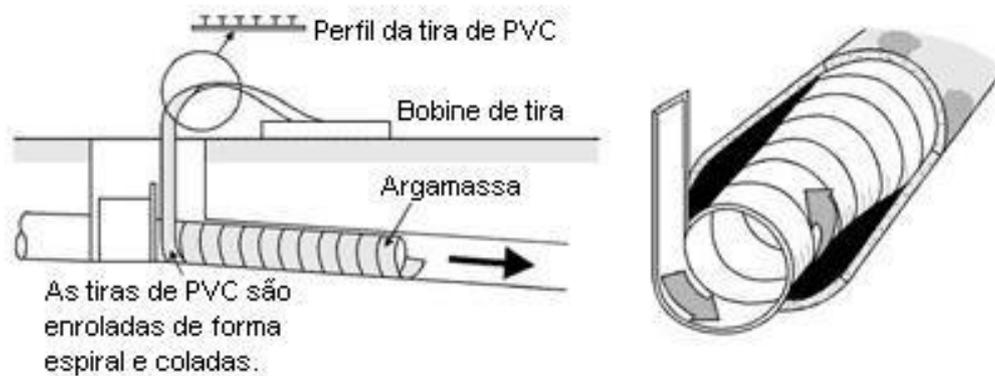
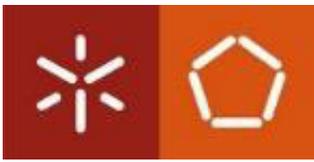


Figura 63 - Aplicação do processo



O Revestimento por tira em espiral visa o enrolamento de uma tira de PVC previamente extrudida, de forma espiral para dentro da conduta deteriorada através de uma bobina posicionada na base de uma abertura de manutenção. As extremidades da tira interligam-se à medida que vai sendo enrolada, formando assim uma conduta contínua e estanque.

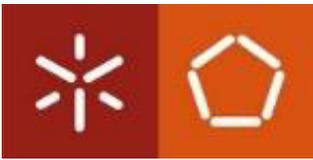
Constitui um processo de fácil aplicação e de curto tempo de realização. Dependendo do diâmetro dos tubos a reabilitar, torna-se praticamente imperceptível uma vez que pode ser realizado dentro dos fossos de manutenção, ou seja, não requer a abertura de buraco ou vala. No entanto a conduta reabilitada tende a ser de fraca resistência à compressão diametral, sendo necessário o reforço da tira com uma malha de arame, e a utilização de um dispositivo de preenchimento das juntas.

6.12 Metodologias de apoio à decisão de reabilitação de sistemas de abastecimento de água

Ocorrem dois tipos de atitudes protagonizadas pelas entidades gestoras face ao envelhecimento dos seus sistemas e perante a reabilitação: a atitude reactiva e a atitude preventiva. Na atitude reactiva, as condutas reabilitadas são seleccionadas de acordo com critérios de emergência (por exemplo condutas que falhem ou tenham sido reparadas muitas vezes) e de previsão de intervenções na via (de acordo com a necessidade de intervenção noutras infra-estruturas). Muito raramente, as características da conduta ou outros aspectos ambientais são tidos em conta. Este tipo de atitude leva a reduzidas (ou nulas) taxas de reabilitação de condutas e as condições de funcionamento da rede irão, certamente originar encargos financeiros elevados envolvendo grandes investimentos a curto, médio e longo prazo depois de analisarem as condições estruturais das condutas e prever a sua degradação. Esta atitude requer um bom conhecimento das características das condutas da rede que deveriam estar disponíveis em bases de dados informatizadas, tais como em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Grilo, 2007), (Saegrov, 2005), (Eisenbeis, 20).

Capítulo III – Robôs de Inspeção Tubular Interna: Desenvolvimento de um Dispositivo Acessível

“The key problem in any design and implementation consist in combining the capacity of self-moving with that of self-sustaining and the property of low weight and dimension. A very important design objective is represented by the ability of the in-pipe robot to the inner diameters of the pipes” (Tătar, 2007)



7. Tipos de Robôs de Inspeção Tubular Interna

7.1 Contextualização

O robô é um dispositivo mecânico programado que executa as actividades controladas normalmente de forma automática. É usado em tarefas que requerem alta eficiência, grande produtividade e de alta precisão, dependendo do tipo de critérios necessária aos dispositivos.

A robótica é destinada a todo o sistema de produção que contemple a utilização de robôs. A robótica é agora amplamente utilizada em muitas indústrias, como a automóvel, de petróleo e gás, transporte ferroviário, alimentos e bebidas, soluções de mineração, soluções químicas, geração de energia e mais. (ABB ROBOTICS, 2013). Na figura 64, mostra o uso de robôs a partir do ano 1994-2011, onde pode ser visto que o fornecimento de robôs industriais aumenta 38% gradualmente apenas de 2010-2011 (LITZENBERGER, 2012).

Estes estudos foram retirados de uma conferência de imprensa em Taipei realizada pela Federação Internacional de Robótica do Departamento de Estatística, em 2012. Esta mostra que o crescimento e uso de robôs têm vindo a aumentar. Esta pesquisa foca-se maioritariamente na robótica utilizada em inspeções de ductos nas indústrias que usam tubos.

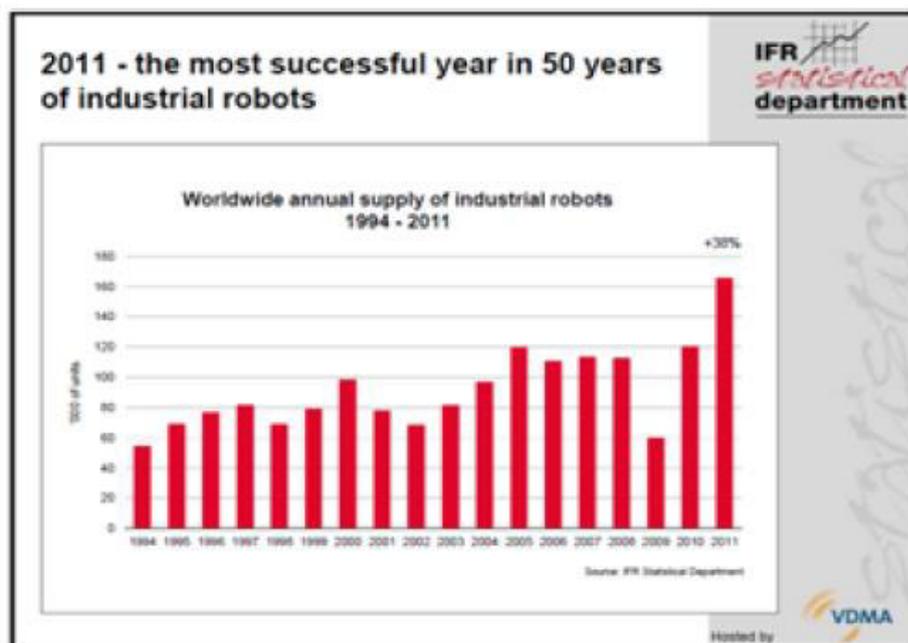
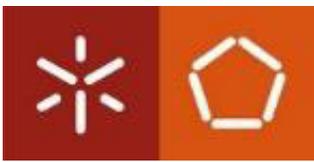


Figura 64 - Fornecimento anual global de robôs industriais. Fonte: IFR ANalitical Department



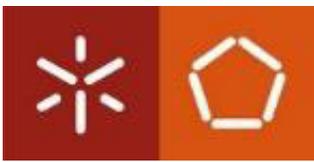
Dadas as diferentes aplicações em robótica, a concepção de robôs varia de acordo com a tarefa pretendida. Alguns robôs são concebidos para uma produtividade elevada, tais como no fabrico de automóveis. Os braços robóticos podem ser projectados para a mesma tarefa, por exemplo soldadura por pontos, que pode ser usada em diferentes tipos de carros utilizando o mesmo robô, nomeadamente no que toca à soldadura, por exemplo. A tarefa programada também é repetível para cada carro na produção. Porém, em determinadas aplicações robóticas complexas como inspecções de ductos, os robôs são geralmente projectados especialmente para uma determinada tarefa com determinado diâmetro alvo e para tubos com alta precisão e grau limitado de liberdade e acessórios. Para esta aplicação, as melhorias de projecto específicos sobre os robôs são obrigados a realizar actividades de inspecção e reparo. Até certo ponto, a complexidade vai ao extremo de produzir um micro-robô com um diâmetro de 10 mm (Lim, 2008).

7.2 Aplicações de Robots de Inspeção tubular interna

Devido aos existentes em diferentes tipos de tubos, como fendas, corrosão interna e vazamentos, o robô de inspecção interna é uma das aplicações robóticas mais importantes, especialmente em gasodutos, tubulações de água, sistema de esgoto e condutas de petróleo. A maioria das condutas de transporte são subterrâneas, daí o aparecimento da necessidade do desenvolvimento de um robô de inspecção interna adaptável a todos os tipos de tubos, com diferentes aplicações e, acima de tudo, diferentes diâmetros.

7.3 Tendência actual de aplicações de inspecção interna

Vários investigadores estão neste momento a tentar desenvolver robôs de inspecção interna de tubos para melhorar a sua capacidade de adaptação a condutas de diferentes diâmetros. Um dos alvos de desenvolvimento é a melhoria no que toca à força de tracção para que os dispositivos sejam capazes de se impulsionar de forma periférica em tubos horizontais e verticais. Outro dos alvos centra-se na melhoria dos sistemas de transmissão de sinal no sentido de os dispositivos sejam capazes de se moverem a longas distâncias.



7.4 Construção e funcionamento

"Numerosos robôs de inspeção tubular interna foram construídos durante as últimas duas décadas, com base em alguns tipos: tipo rodas, tipo lagarta, tipo cobra, tipo pernas, tipo minhoca, tipo parafuso, tipo PIG e tipo condução helicoidal" (Roslin, 2012).

A construção de qualquer tipo de robô tem de ter em conta a sua finalidade, construção, condições de funcionamento e adaptabilidade. Importante é, também e de forma óbvia, conhecer algumas limitações como o diâmetro, material dos tubos, a distância de curso e inspeção, entre outros. Todos estes parâmetros devem ser conhecidos antes fase de concepção. Tome-se o exemplo do robô do tipo rodas. Este pode trabalhar em tubulações tipo T e cotovelo. O último tipo, tipo minhoca, tem a vantagem de se mover, principalmente, em tubos em forma de cotovelo. Na figura 25, apresentam-se alguns tipos de inspeção tubular interna (Gargade, 2013).

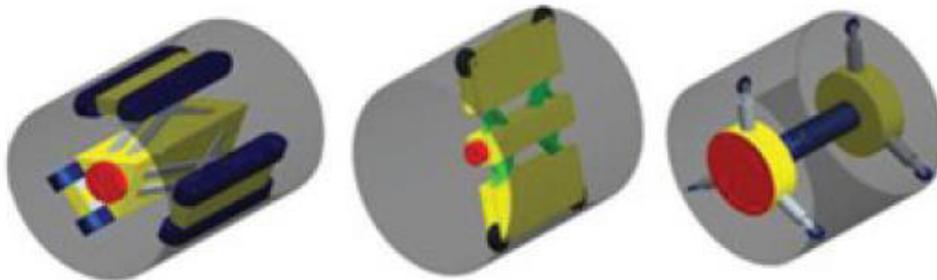
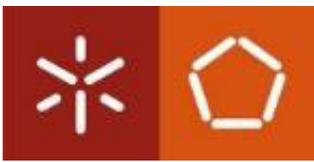


Figura 65 - A partir da esquerda, tipos: pressão na parede realizada por lagartas, por rodas e por parafuso. Fonte: Gargade, Modelling and Analysis of Pipe Inspection Robot (2013)



O objectivo do projecto de qualquer robô centra-se na tentativa de redução da complexidade electromecânica. Este objectivo é geralmente atingido com recurso a um único actuador.

Os dois componentes principais de um robô são o estator e o rotor, ambos conectados por articulações activas. Estes conjuntos incluem motores de corrente contínua com redutor e articulações universais. Esta articulação universal fará com que o dispositivo se mova facilmente ao longo de tubos curvilíneos.

Por outro lado, o dispositivo deverá ser concebido para um intervalo de diâmetros que possa ser abrangido. Os estudos sobre a inspecção intratubular ainda continuam e têm sido feitos com base em no tipo de movimento a que se devem adequar.

Em geral, os dispositivos de inspecção terão que ter atenção aos seguintes factores (Zhang, 2007):

- Curso da Inspeção;
- Adaptação ao diâmetro da tubagem;
- Sistemas de sensores;
- Sistemas de iluminação.

Existem uma série de dispositivos que podem ser acoplados ao robô de inspecção. Estes dispositivos podem incluir, por exemplo e entre outros, uma fonte luminosa, uma câmara CCD (charge-coupled device ou dispositivo de carga acoplada), transformadores, motores de passo e sistemas embutidos de computador (Zhang, 2007).

7.4.1 Mecanismo de paralelogramo adaptável

No caso específico de alguns robôs projectados para cursos de inspecção e reparação de 1Km, são incluídos uma fonte de alimentação, sendo que os dados relativos à inspecção são transferidos através de um cabo de fibra óptica de forma a evitar a existência de uma interface entre o sinal e a alimentação. A eficiência do robô de inspecção interna baseia-se no ajustamento da pressão entre as lagartas e a parede interior do tubo. Isto significa que ocorre uma proporcionalidade exponencial entre a força de tracção e a adaptabilidade diametral (Zhang, 2007)

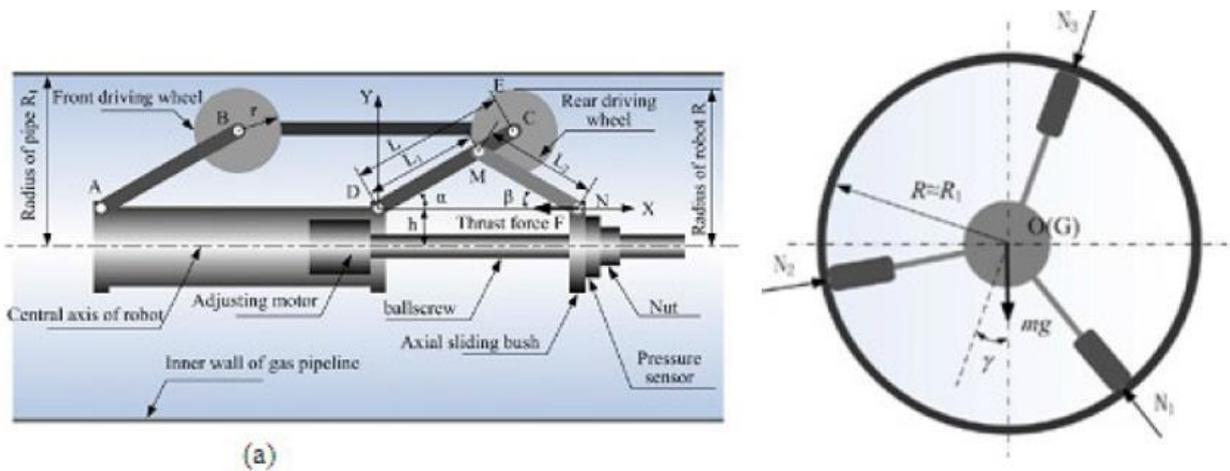
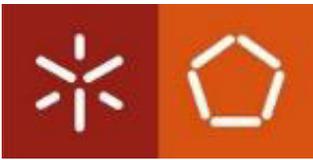


Figura 66 - (a) mecanismo de paralelogramo adaptável ao diâmetro interno da tubulação (b) distribuição das forças de apoio.
Fonte: (Zhang, 2007)

7.4.2 Robôs com utilização de rolamento de peso

No que concerne a projectos de robôs destinados a tubos com diâmetro de 80 milímetros, tem-se vindo a apostar na utilização de um rolamento de peso com fim de adaptabilidade diametral. O motor apropriado para este diâmetro é um servo-motor, devido às suas pequenas dimensões e alta capacidade de torque (Zin, 2012). Neste tipo de pequenos robôs o deslizamento dentro do tubo é de tomar em conta e de extrema importância. Uma das técnicas utilizadas neste dispositivo contempla a utilização dum campo de forças magnéticas presente no anel do rolamento de peso para suporte do peso do robô. Outra das técnicas utilizadas durante o projecto do dispositivo foi a cobertura do anel do rolamento com borracha, aumentando o coeficiente de atrito, no sentido de evitar o processo de deslizamento no interior da tubagem (Zin, 2012).

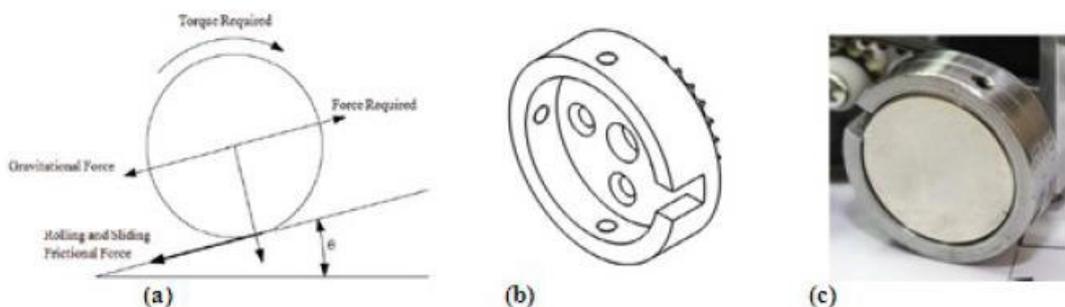
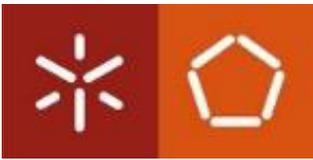


Figura 67 - Diagrama de corpo livre de acção sobre a roda, (b) Projecção de um aro de roda vazia, (c) protótipo concluído de aro da roda com disco magnético de fenda. Fonte: (Zin, 2012)



7.4.3 MRINSPECT

Alguns mini-robôs móveis têm flexibilidade periférica no interior do tubo, contemplando ainda uma estrutura capaz de o adequar facilmente ao diâmetro do tubo em que circula.

Existe nesta altura no mercado uma vasta gama de mini-robôs móveis com base na sua estrutura e funções. Alguns deles são o: MRINSPECT I, MRINSPECT II e o MRINSPECT IV.

O MRINSPECT I é constituído por seis mecanismos de manivelas deslizantes, cada uma impulsionada por uma roda accionada por um motor de corrente contínua e pela transmissão da correia. Pode ser utilizado em tubulações horizontais, verticais e em cotovelo, não operando em tubagens em T ou entroncamento.

O mecanismo MRINSPECT II é capaz de mover-se em direcção radial, sendo que essa característica lhe permite reduzir as forças de torção aplicadas ao dispositivo. No caso do dispositivo MRINSPECT IV, este pode operar em tubagens em cotovelo e junções em T.

Os componentes comuns aos mini-robôs suprarreferidos são: mola helicoidal, elemento de transição, suporte do actuador, parafuso sem-fim, engrenagem, actuador, eixo central, correia de ligação, e rodas como mostrado nas figuras 28, 29 e 30 (Tătar, 2007).

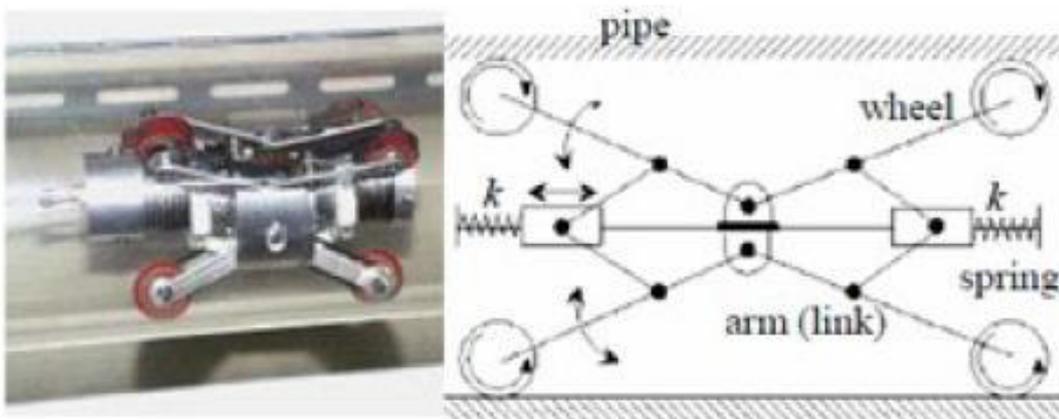


Figura 68 - MRINSPECT I e seu mecanismo correspondente. Fonte: (Tătar, 2007)

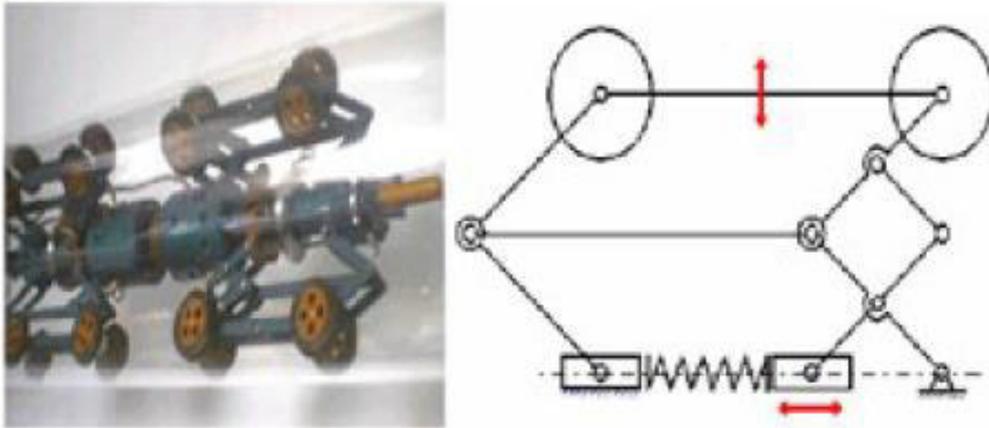
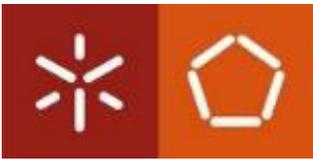


Figura 69 - MRINSPECT II e seu mecanismo correspondente. Fonte: (Tătar, 2007)

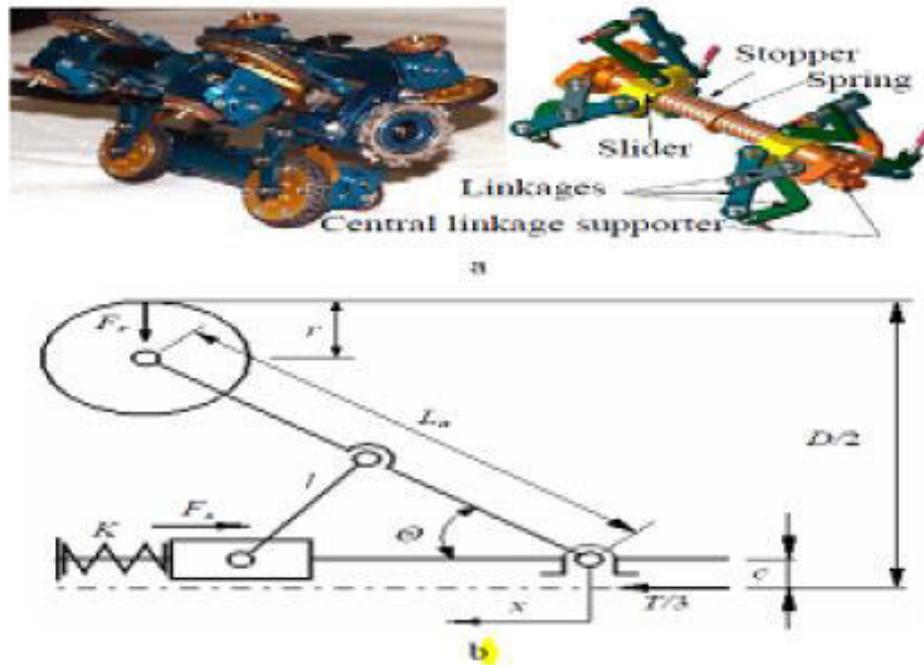
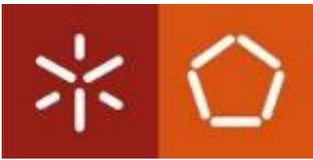


Figura 70 - MRINSPECT IV e seu mecanismo correspondente. Fonte: (Tătar, 2007)



7.4.4 Robôs de inspecção do tipo pressão pneumática e vácuo

A combinação da pressão pneumática do vácuo é um dos métodos utilizados no desenvolvimento de robôs utilizados em inspecções tubulares internas. São dispositivos projectados para uma distância de inspecção limite de 20 metros, a uma velocidade de 33 mm por segundo e com uma força de tracção de 7.8 N. São projectados para diâmetros tubulares de 44 mm (Ono, 2001).

Uma das dificuldades que enfrentaram esse tipo de robô centra-se na necessidade de arrastar um tubo de alimentação de ar e um cabo eléctrico de alimentação ao longo do seu curso e por longas distâncias. Este problema foi resolvido no projecto aquando da geração de uma alta força de tracção através da inserção nos no dispositivo de anéis de fricção.

Este robô vem equipado com uma câmara CCD e válvulas termiônicas emisoras de luz. Este dispositivo está projectado para detectar fendas, fissuras e corrosão em condutas (Ono, 2001). A sequência cronológica de funcionamento do dispositivo de pressão pneumática está representada na figura 71.

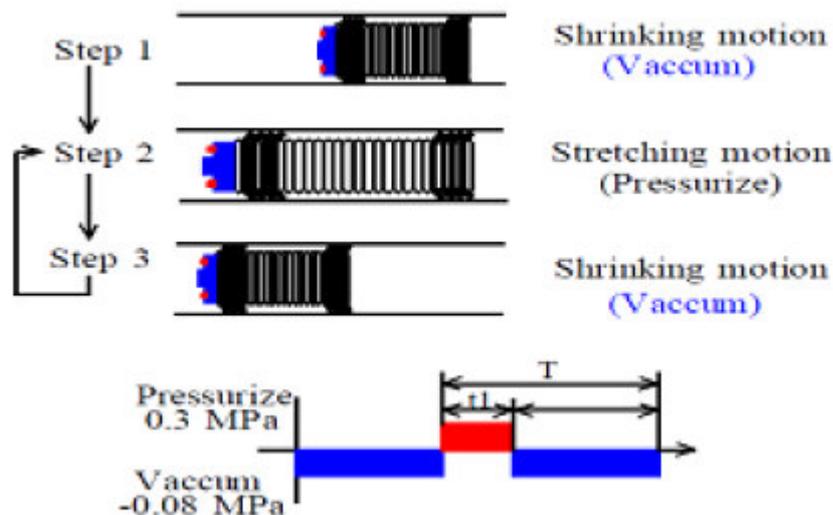
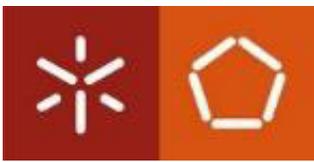


Figura 71 - Sequência cronológica de funcionamento do dispositivo de pressão pneumática. Fonte: (Ono, 2001)

Para entendimento e consulta mais detalhadas deste dispositivo, consultar o Anexo I da presente dissertação.



7.5 Softwares utilizados no projecto

Existem nesta altura vários softwares utilizados no projecto e teste de modelos robóticos de inspecção tubular. Os mais utilizados são, no entanto, o SolidWorks e o Ansys. O SolidWorks no projecto, modelação e montagem, além da análise de tensões em todos os principais componentes do conjunto. O Ansys fica geralmente responsável pela análise de tensão estática e de montagem.

7.6 Controlo do Robô de Inspeção Intratubular e Transmissão da Informação

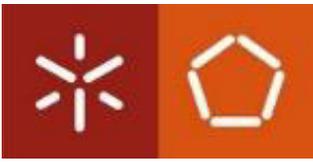
7.6.1 Por cabos híbridos fotoeléctricos

A maioria dos tipos de robôs utilizados na inspecção da tubulação utiliza cabos de controlo direcional do robô e de transferência de dados de informação provenientes dos possíveis defeitos encontrados (Zhang, 2007).

Cabos híbridos fotoeléctricos são usados para transferir os dados de energia e de informação. O robô de inspecção estabelece uma comunicação em tempo real com a estação de trabalho no solo, trocando informações relativas a transferência de vídeo, parâmetros ambientais, intruções de controlo, estado do robô e dados de detecção (Nishijima, 2010).

7.6.2 Sistemas sem fios

Outros tipos de robô utilizam sistemas de comunicação sem fios que transmitem imagens provenientes do interior das condutas. "O Instituto Indiano de Tecnologia de Kanpur tem pesquisado uma sonda rotativa usando elementos piezo para inspeccionar o interior de tubos com um sistema de sensores de toque" (Nishijima, 2010). Este sistema de sensores de toque utiliza uma sonda rotativa capaz de inspeccionar e detectar a curva de variação de tensões que fazem o mapeamento dos defeitos. Estes procedimentos funcionam a partir da captura de variações de voltagem, convertendo-a de sinal analógico para digital. A partir daí o sinal digital é enviado para um microcomputador que é depois remetido para o computador principal localizado no corpo do robô. Este computador irá fazer uma leitura da informação com base em múltiplas transmissões.



7.6.3 Sensores ultrassónicos

Alguns dispositivos utilizam sensores ultrassónicos capazes de detectar defeitos em condutas, como fendas ou fissuras, e transmitir através de um sistema sem fios essa informação para um computador central que, depois de detectada a localizada, processa a profundidade dos defeitos.

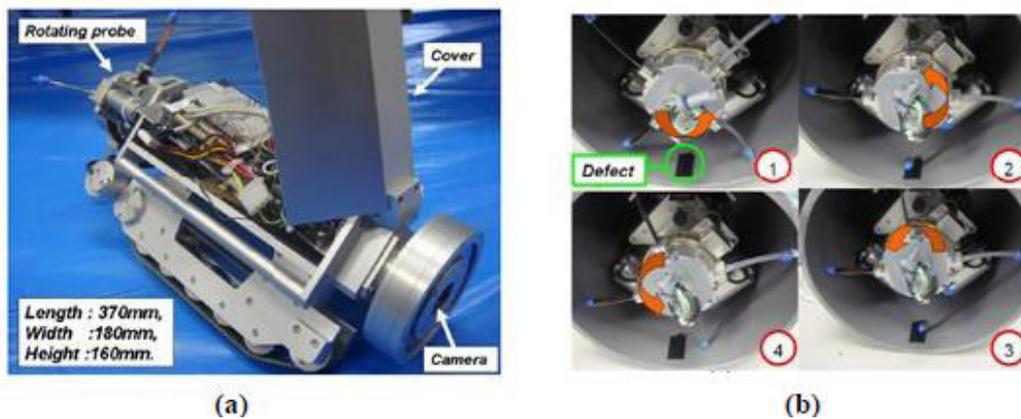
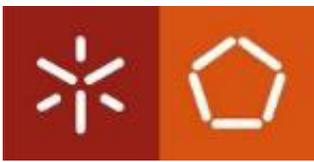


Figura 72 - (a) Robô de Inspeção (Mogurinko) e (b) Movimento de sonda rotativa

7.7 Técnicas em utilização e futuras de detecção interna de danos

7.7.1 Circuito Fechado de Televisão

O método de controlo remoto que mais tem vindo a ser implementado na inspeção interna de condutas inclui robôs equipados com sistemas CCTV (Circuito Fechado de Televisão). O CCTV, no contexto da inspeção tubular interna, faz a gravação da superfície interna, fotografando também em andamento detalhes específicos quando necessários. O CCTV continua em desenvolvimento, especialmente tendo em conta que as resoluções de imagem apresentam evoluções brutais a cada dia que passa.



7.7.2 SSET

A OYO-EUA desenvolveu um novo tipo de sistema de inspecção de esgoto chamado SSET, que, utilizando a mesma estrutura do CCTV, acrescenta-lhe uma lente de olho de peixe para obter uma vista directa para a parede do tubo (W. Kim, 2007).

Há ainda uma nova abordagem desenvolvida para superar as limitações da SSET. O sistema desenvolvido utiliza maior área de visão lateral e constrói resoluções de imagem de maior qualidade gerando imagens costuradas com qualidade nunca antes vista nesta área. Os métodos de digitalização de imagem são técnicas inovadoras de avaliação da condição das imagens de alta qualidade retiradas do interior dos tubos, sendo esta uma das áreas em desenvolvimento e estudo nesta altura.

Hoje em dia, existem diversas técnicas de inspecção à distância. Neste trabalho serão estudados os métodos de avaliação não destrutivos. Técnicas de inspecção sem contacto podem ser classificadas em técnicas ópticas e não ópticas. Técnicas de inspecção óptica sem contacto incluem sistemas de visão a partir da máquina em deslocamento, instrumentos ópticos convencionais (comparadores ópticos e microscópios), sistema a laser (dispositivo de varredura a laser), dispositivos de matriz linear, e técnicas de triangulação óptica.

Técnicas de inspecção não óptica e sem contacto incluem: técnicas de campo eléctrico, técnicas de radiação, e os métodos de inspecção ultrassónicos. Dentro desta categoria, os robôs de inspecção têm utilizado, na maioria das vezes, a chamada “visão de máquina” (visão de computador) uma vez que esta tende a imitar as capacidades do sistema óptico e sensorial humano, que inclui não apenas “os olhos”, mas também as competências interpretativas complexas do cérebro humano (Groover, 2008).

7.7.3 Charge-coupled device

Uma das técnicas de processamento de imagem que será abordada neste trabalho é a CCD (Charge-Coupled Device). Este sistema está incorporado na estrutura do robô de inspecção.



Figura 73 - Da esquerda para a direita: (a) Teste de aquisição de imagem tubular e (b) Sistema CCD de câmara e lentes

Algumas limitações que restringem a sua aplicação contemplam: (1) a falta de visibilidade no interior dos tubos e (2) a má qualidade das imagens obtidas por causa de condições difíceis de iluminação (W. Kim, 2007).

Esta tecnologia de processamento de imagem pode ser usada na detecção de defeitos de soldadura. Em inspeção de ductos o robô inclui um sistema de visualização robô que contém uma câmara CCD, fonte de iluminação, cartão de aquisição de imagem, dispositivos mecânicos, computador de recepção da informação processada (host PC), sonda de ultra-som, tubos, como demonstrado na figura 35.

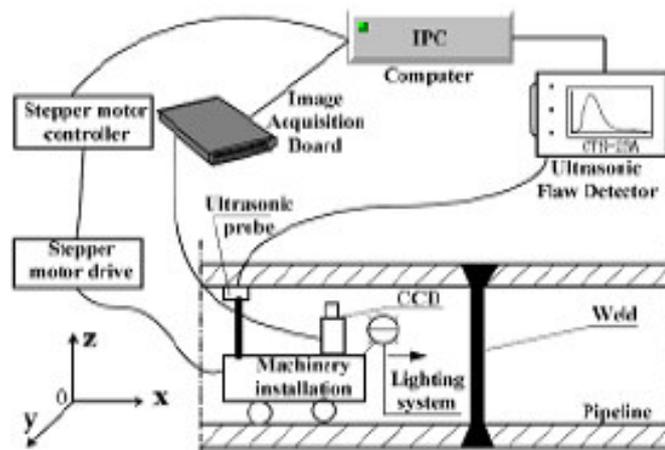
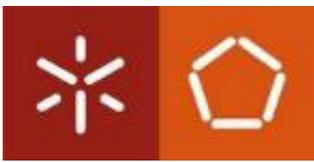


Figura 74 - Sistema de Inspeção Visual para Inspeção de tubos soldados



Este sistema de captura de imagem envia os dados para o computador, que depois converte a informação em imagem de formato digital. No exemplo apresentado, o objectivo da experiência foi a detecção da localização de possíveis defeitos em pontos de soldadura do tubo. O foco do problema é, naturalmente, a obtenção duma alta qualidade de imagem de forma a procurar interferências visuais simples no tubo. Os procedimentos seguidos incluem a análise e processamento da imagem de solda e de, seguida, segmentação da imagem com recurso a dois métodos: O Método de comparação de variâncias e o Método de destaque. Em ambos os métodos, a existência de superfícies ásperas dentro da conduta causou um grande número de interferências na fase de identificação. Como não é simples estabelecer fronteiras entre a superfície danificada e a não danificada, surgem muitas interferências na fase de identificação, iluminações irregulares e arrastamento da imagem devido ao movimento do dispositivo base. No entanto, o maior problema é mesmo a inexistência dum contraste esclarecedor.

A solução para estes problemas reside na utilização de métodos de projecção e identificação de objectos, A figura 35 mostra o tratamento utilizando estes dois métodos (Xi, 2009). Como se pode observar na mesma figura, foram obtidas imagens de pré-tratamento com alta qualidade e capacidade de distinção e, acima de tudo, capazes de identificar e localizar os defeitos nas áreas soldadas.

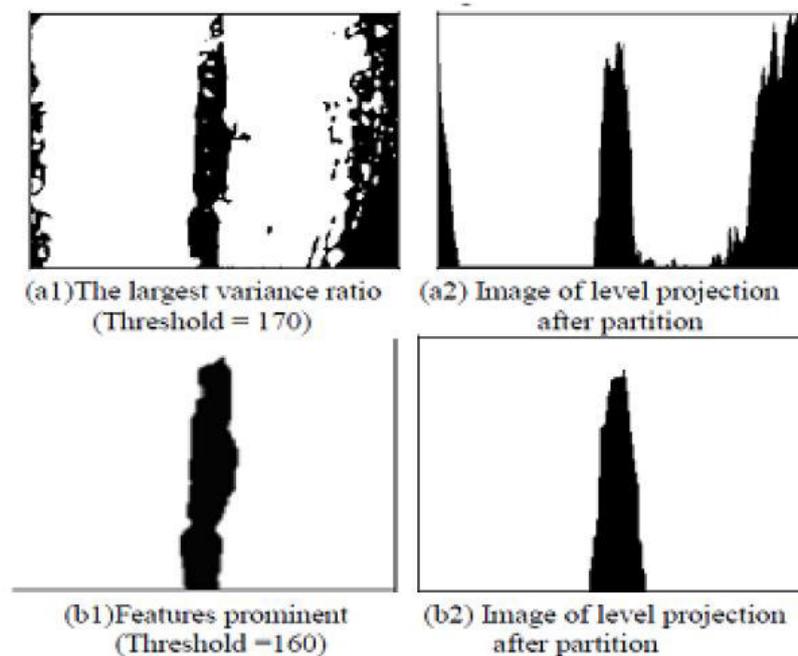
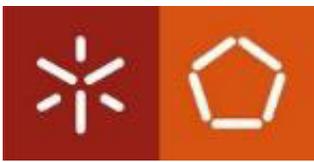


Figura 75 - Mapa do nível de Projecção da soldadura



8. Desenvolvimento do protótipo

8.1 Contextualização do Problema

O principal objectivo deste trabalho centra-se na construção de um dispositivo acessível do ponto de vista financeiro, capaz de se deslocar facilmente dentro duma tubagem, ainda com a valência de reparar, as suas mais do que prováveis, imperfeições ou danos. Os danos mais comuns em condutas já foram abordados no Capítulo II da presente dissertação.

Nesse sentido, foram pensados o projecto e a possível construção de um protótipo elaborado dentro do possível, com recurso a componentes presentes no mercado, no sentido de tornar acessível a construção do mesmo por qualquer pessoa que se interesse pelo projecto. Por via da possibilidade futura de ensaios experimentais do dispositivo na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, e também numa óptica de reaproveitamento de alguns materiais e componentes existentes nessa mesma oficina, foi decidido que o dispositivo teria que ser pensado e desenvolvido para que pudesse locomover-se por dentro de tubos de PVC com diâmetros compreendidos entre os 110 e os 125 mm, uma vez que esses são os diâmetros tubulares em maior abundância e de mais fácil acesso no Departamento da Universidade.

Tendo em conta estas limitações de projecto e depois de uma análise a vários aparelhos, e avaliadas as suas vantagens e inconvenientes, optou-se por um sistema de posicionamento semelhante ao Pipe Crawler mas com seis braços de apoio, onde seria incluído nas extremidades um módulo de locomoção por sistema de lagartas, acautelando ainda alguma área de superfície, no corpo central do dispositivo de preferência, para conjugar sistemas de inspecção e recolha de dados gráficos como uma câmara CCTV e sistemas de reparação.

O grande desafio encontra-se na conjugação de todos estes factores, associando-os a um baixo custo de projecto e fabrico, assim como à facilidade de montagem e troca de componentes por via da fadiga causada pelo coeficiente de atrito existente entre o tubo e as lagartas de locomoção, entre outros componentes com contacto entre si.



8.2 Procedimento experimental

8.2.1 Selecção do Mecanismo de tracção

O primeiro desafio centrou-se na selecção de um sistema de tracção capaz de impulsionar o dispositivo. Pensada a locomoção e dadas as características base do dispositivo em questão, a primeira abordagem em relação ao sistema de tracção focou-se na utilização de um motor hidráulico de engrenagens externas do tipo da figura 76.



Figura 76 - Motor hidráulico de engrenagens externas

Esta escolha é justificável pelo facto de estes motores possuírem a capacidade de aplicarem pressão a um fluido confinado, no caso óleo, e transmitirem essa mesma pressão, sem perdas de força, em todas as direcções, actuando com força igual e em áreas iguais nos ângulos correspondentes. Essa vantagem ganha ainda mais importância quando se pretende um dispositivo cujos três módulos de lagartas exerçam a mesma tensão, separada e individualmente, nas paredes do tubo em que circulam, de forma contínua e a não causar instabilidade no movimento. A importância da utilização dum motor hidráulico centra-se também no facto de este ser estanque, possibilitando o deslocamento do dispositivo por dentro de tubagens transportadoras da generalidade dos líquidos e gases que vulgarmente transportam sem perigo de corrosão ou infiltrações.



Uma vez tomada essa decisão, foi feita uma pesquisa de mercado e contactados vários fornecedores no sentido de averiguar a existência dum motor hidráulico com essas características. A pesquisa revelou que não foram encontrados no mercado, nacional e internacional, motores hidráulicos cujas dimensões cumprissem, numa óptica de acoplagem e funcionamento global, as limitações diamétrais impostas.

Desta forma, a abordagem teve que ser alterada e um motor eléctrico passou a ser o alvo da pesquisa de mercado. A adopção do motor eléctrico justifica-se pela grande variedade de motores no mercado, com grande espectro de dimensões e potências.

O resultado foi a adopção dum motor eléctrico da *DirectIndustry* com um custo convertido de 2,20 euros.

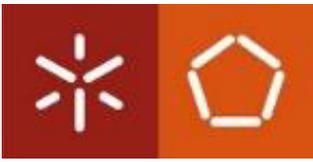
O motor seleccionado e as características e parâmetros de funcionamento globais do mesmo estão representados nas figuras 77 e 78.



Figura 77 - Motor eléctrico *DirectIndustry* seleccionado

| Model | Voltage | | No Load | | At Maximun Efficiency | |
|-----------------|----------|------|---------|---------|-----------------------|---------|
| | | | Speed | Current | Speed | Current |
| | | | r/min | mA | r/min | mA |
| RE270B-18155-42 | 4.5~9.0V | 6.0V | 7160 | 65 | 6066 | 361 |

Figura 78 - Descrição das características do motor eléctrico seleccionado



O critério de escolha do tipo de engrenagem de parafuso sem-fim baseou-se além disso, e com grande grau de importância, no facto de estas serem capazes de transmitir movimento entre veios que não sejam paralelos nem se intersectem. Este sistema evita a necessidade de colocação dum motor por cada conjunto de lagarta.

São também uma excelente opção aquando da necessidade de grandes reduções de transmissão. Esse tipo de engrenagem costuma ter reduções de 20:1, chegando até a números maiores do que 300:1. Além do mais, engrenagens sem-fim têm uma propriedade interessante que nenhuma outra engrenagem tem: o eixo gira a engrenagem facilmente, mas a engrenagem não imprime rotação ao eixo. Isso deve-se ao facto do ângulo do eixo ser tão pequeno que quando a engrenagem tenta imprimir-lhe rotação, o atrito entre a engrenagem e o eixo não permite que a engrenagem se mova. Essa característica é muito útil para este tipo de dispositivos, nos quais este fenómeno ao nível dos dentes pode funcionar como freio para o movimento das lagartas quando o motor eléctrico não estiver a funcionar.

A figura 81 mostra a disposição das polias dentadas, e consequentemente das lagartas, para a distribuição do movimento e da potência de forma angular a 120° .

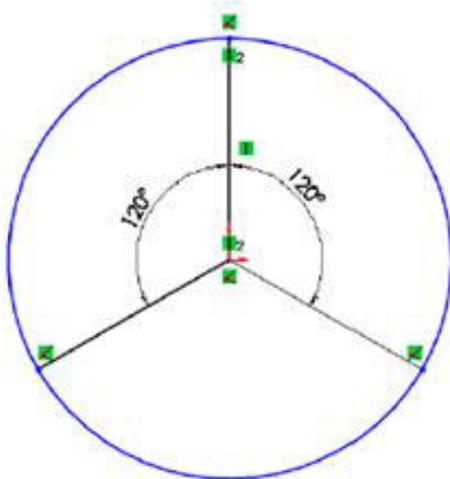
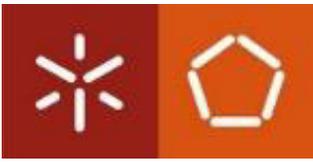


Figura 81 - Disposição das polias em torno do parafuso sem-fim



8.2.2.1 Modelação CAD tridimensional

O motor eléctrico seleccionado servirá desta forma como actuador do parafuso sem-fim, que consequentemente irá transmitir a potência de funcionamento do motor às polias dentadas. Estes dois componentes serviram, desta forma, de base de projecto de modelação CAD, uma vez que resolvido o sistema de transmissão de potência e desenhados os seus componentes à escala, resta a modelação do restante dispositivo numa perspectiva de projecto puro, ou seja desenhando de raiz componentes e articulações capazes de satisfazer as necessidades de suporte do dispositivo e, acima de tudo, de adequação diametral.

Começou-se por desenhar o conjunto acoplado motor eléctrico/parafuso sem-fim. A (Figura 42) ilustra a vista explodida do mesmo.

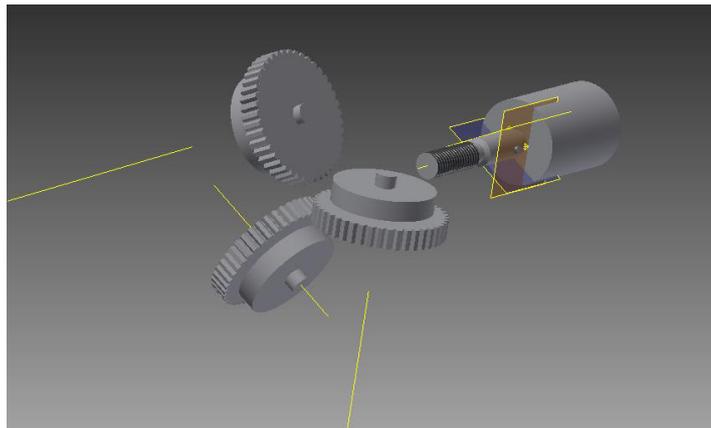


Figura 82 – Vista explodida do sistema de tracção

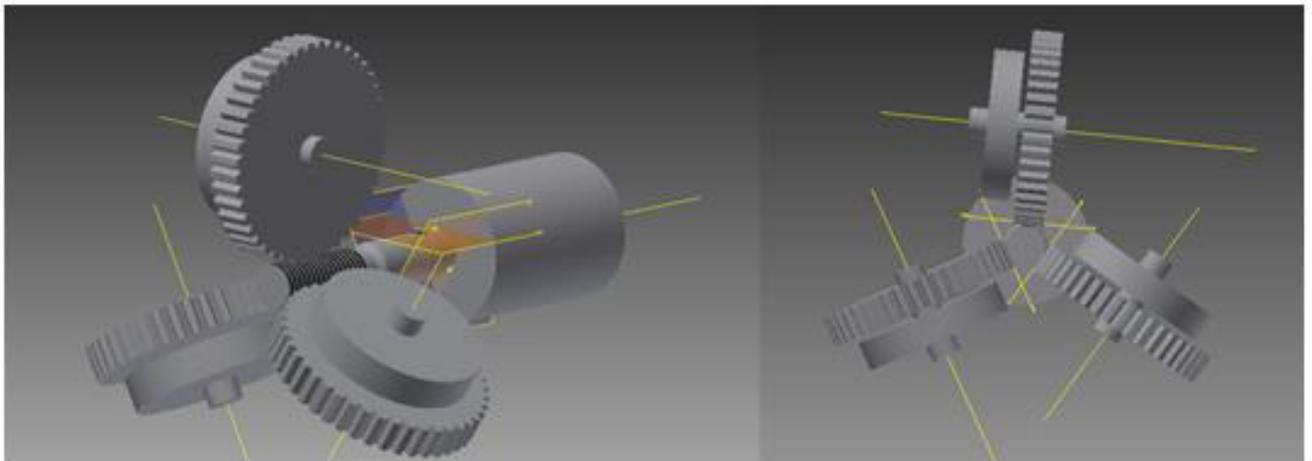
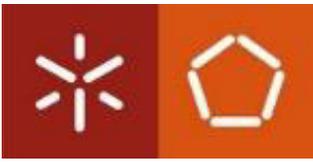


Figura 83 - Acoplamento radial do sistema de transmissão de potência



De seguida, é necessário resolver o problema do corpo central, uma vez que é este o responsável pelo apoio dos veios das polias dentadas e da estabilidade radial do sistema. A primeira solução estrutural foi um cilindro recortado (Figura 84).

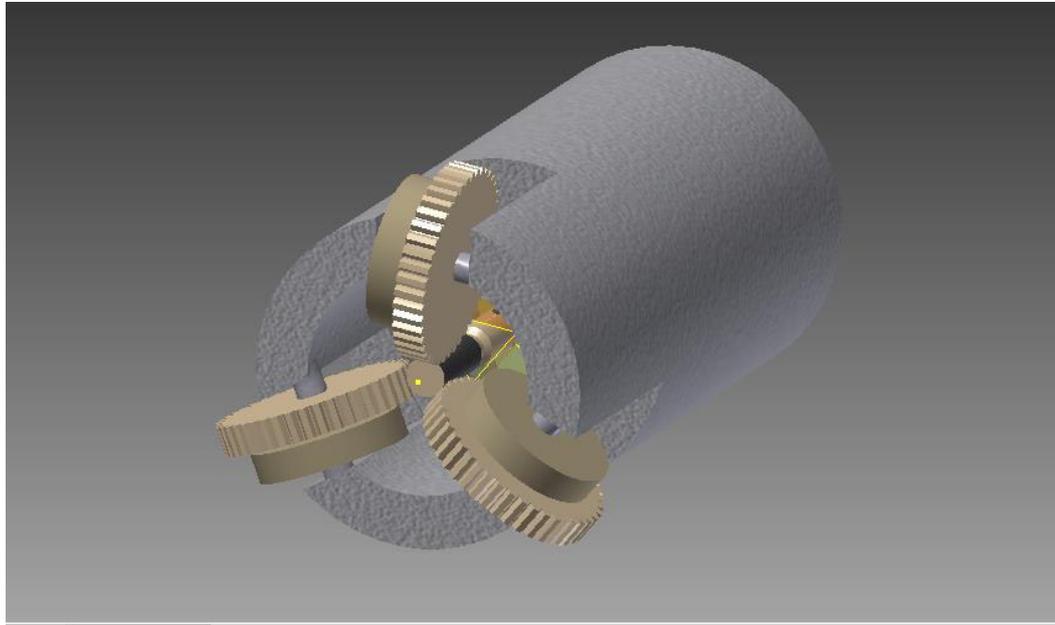


Figura 84 - Abordagem Inicial em relação ao corpo central

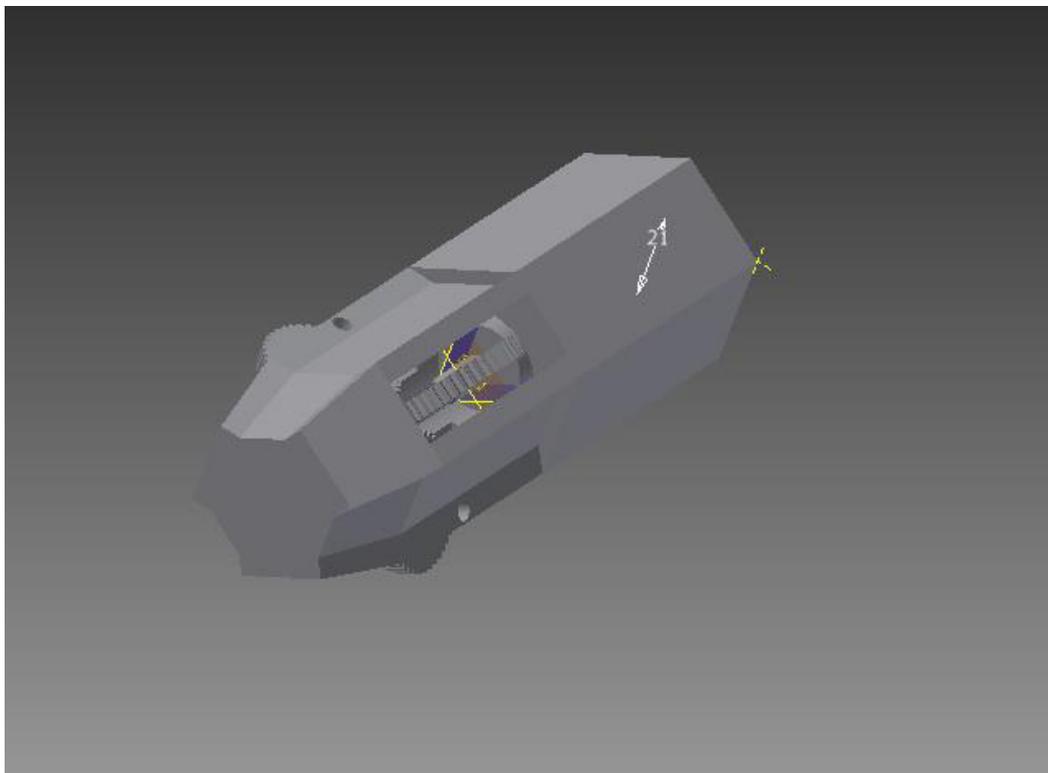
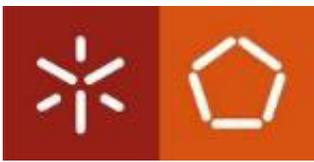


Figura 85 - Corpo central final do dispositivo



Após deliberação em torno do processo de fabrico envolvido no mesmo, nomeadamente na dificuldade de furação envolvida na entrada dos pinos de suporte das rodas, foi adoptada uma geometria que evitasse superfícies curvilíneas.

O resultado final da modelação tridimensional do corpo central está representado na Figura 85.

8.2.3 Sistema de suspensão

Resolvido o problema do corpo central e pensando-o também como um apoio de base às lagartas de locomoção, tornou-se importante uma decisão relativamente a um mecanismo de suspensão, que não só garantisse a absorção de choques sofridos pelo conjunto ao longo do seu curso, como também a inclusão da capacidade de orientação das lagartas e adequação ao diâmetro.

Dessa forma, e uma vez mais com acesso a componentes existentes no laboratório do departamento, adaptou-se o seguinte dispositivo de mola helicoidal tornando-o um sistema de suspensão (Figura 86).



Figura 86 - Vistas traseira, lateral e de frente da suspensão com mola helicoidal seleccionada



A utilização de um sistema de suspensão que contemple uma mola helicoidal justifica-se pela necessidade de este componente permitir o funcionamento por compressão, por tracção e por torsão, indispensáveis ao avanço e à adequação a acidentes no interior de condutas. Além disso, os braços deste componente serão responsáveis pelo suporte das lagartas.

A modelação deste componente à escala e a sua representação é dada pela Figura 87.



Figura 87 - Modelação CAD da suspensão

No sentido do acoplamento das lagartas na suspensão central, foram introduzidos componentes de apoio, com capacidade de rotação em torno do eixo da suspensão, também dispaes em 120° (Figura 88).

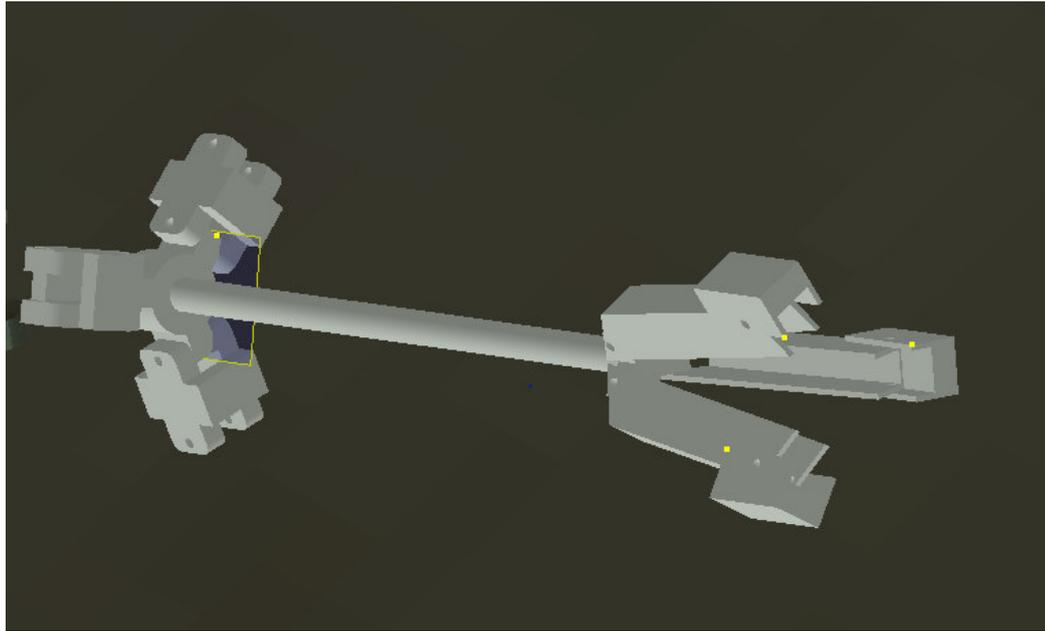
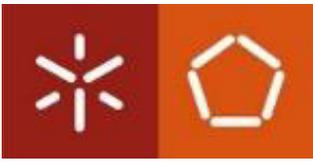


Figura 88 - Inserção de componentes intermédios de apoio das lagartas

8.2.4 Construção do sistema de lagartas

As lagartas incluídas no projecto foram modeladas tridimensionalmente de raiz, para que a sua acoplagem no conjunto cumprisse os limites dimensionais intimamente ligados aos parâmetros diametrais de projecto, ou seja que, no mínimo fossem capazes de ser incluídas, juntamente com o corpo central, num diâmetro mínimo de 110 mm.

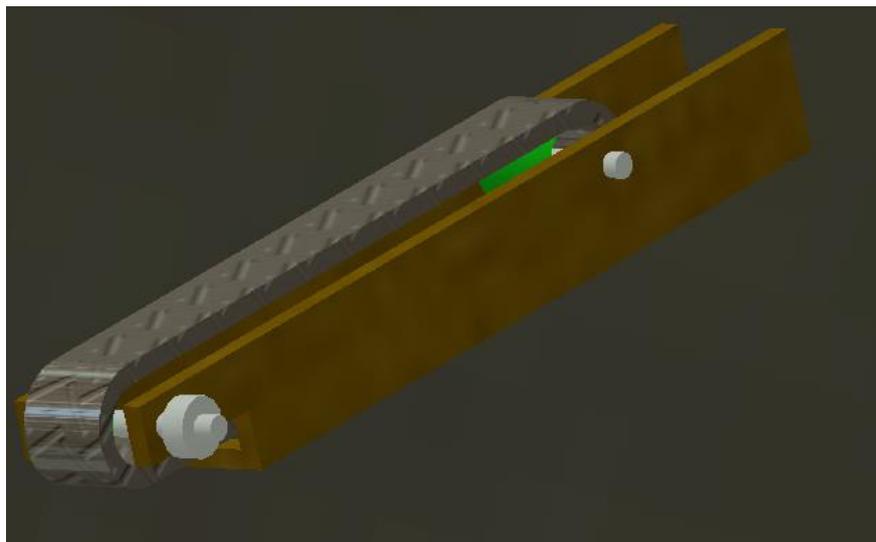


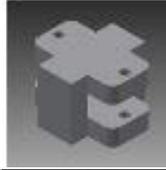
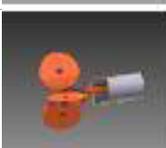
Figura 89 - Desenho do sistema de lagartas



8.2.5 Lista de Materiais

Apresentados que foram os componentes principais do projecto de modelação, importa agora fazer uma listagem dos componentes utilizados, com indicação da descrição, quantidade e modelos.

Tabela 4 – Lista de Materiais

| Componente | Nome | Modelo | Quantidade |
|------------|---|--|------------|
| 1 | Apoio Distribuidor |  | 2 |
| 2 | Encaixe Lagarta |  | 6 |
| 3 | Correia Dentada |  | 3 |
| 4 | Assembly Lagartas Frontais |  | 3 |
| 5 | Assembly Lagartas Traseiras |  | 3 |
| 6 | Conjunto Polias motoras/Motor eléctrico |  | 1 |
| 7 | Peça central |  | 1 |



INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

| | | | |
|-----------|--|---|---|
| 8 | Veio central da suspensão |  | 2 |
| 9 | Componente de Ligação da Lagarta à Suspensão |  | 6 |
| 10 | Pino de Ligação |  | 3 |
| 11 | Polia movida |  | 3 |
| 12 | Extremidade Mola |  | 6 |

Elencados os componentes do conjunto, surge a importância da colocação dos mesmos em vista explodida e prontos a acoplar

8.2.6 Vista explodida do conjunto

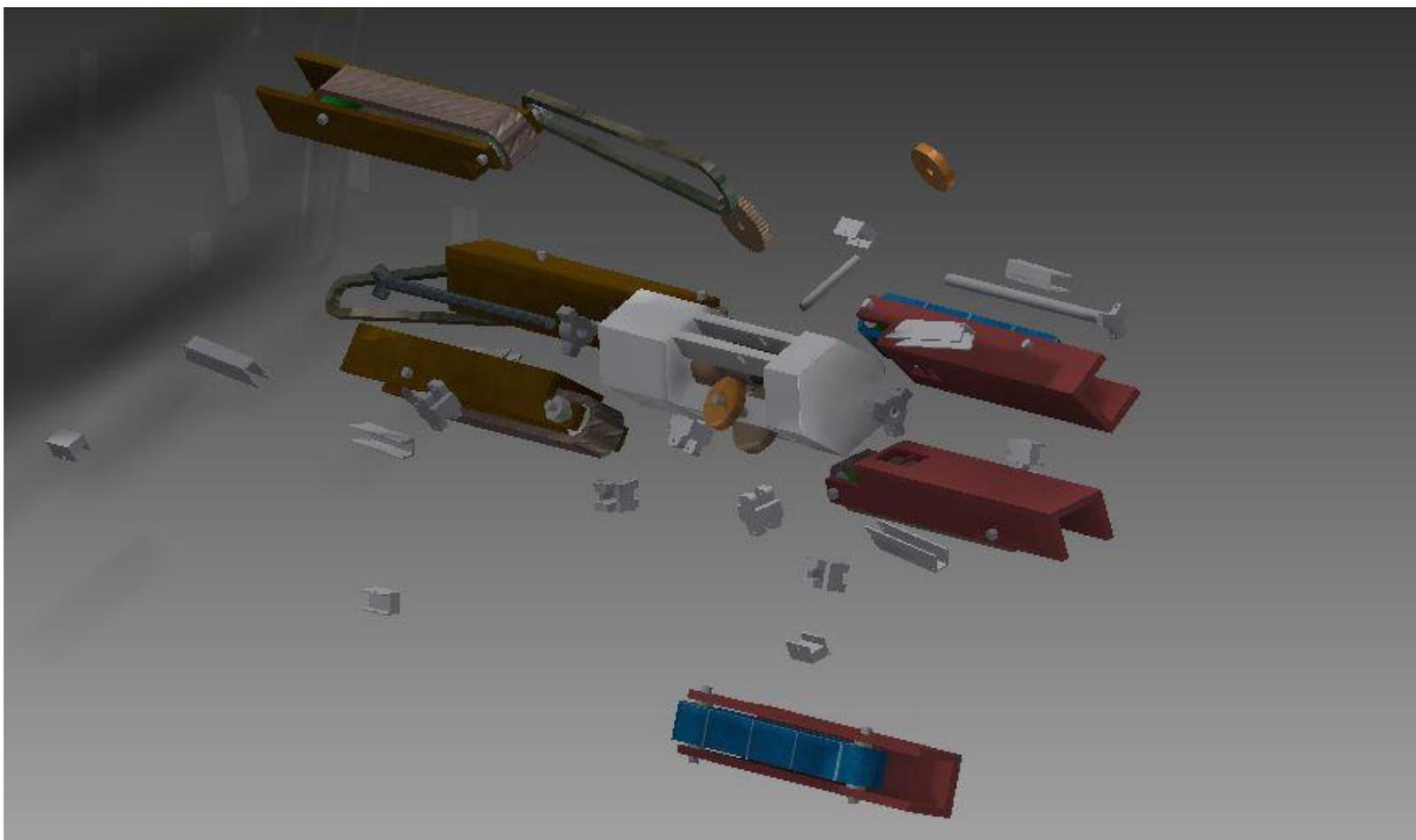


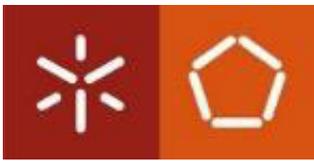
Figura 90 – Vista explodida do conjunto



8.2.7 Protótipo Final



Figura 91 – Protótipo final



Resultados – Teste diametral

Finda a construção, importa averiguar a adequabilidade do dispositivo ao intervalo de diâmetros a que o projecto se propôs. Após a aplicação duma circunferência de 110 mm com centro no ponto central da cabeça do veio central de suspensão (ponto central do dispositivo) verifica-se que o dispositivo cumpre as especificidades diametraes a que se tinha implicado.

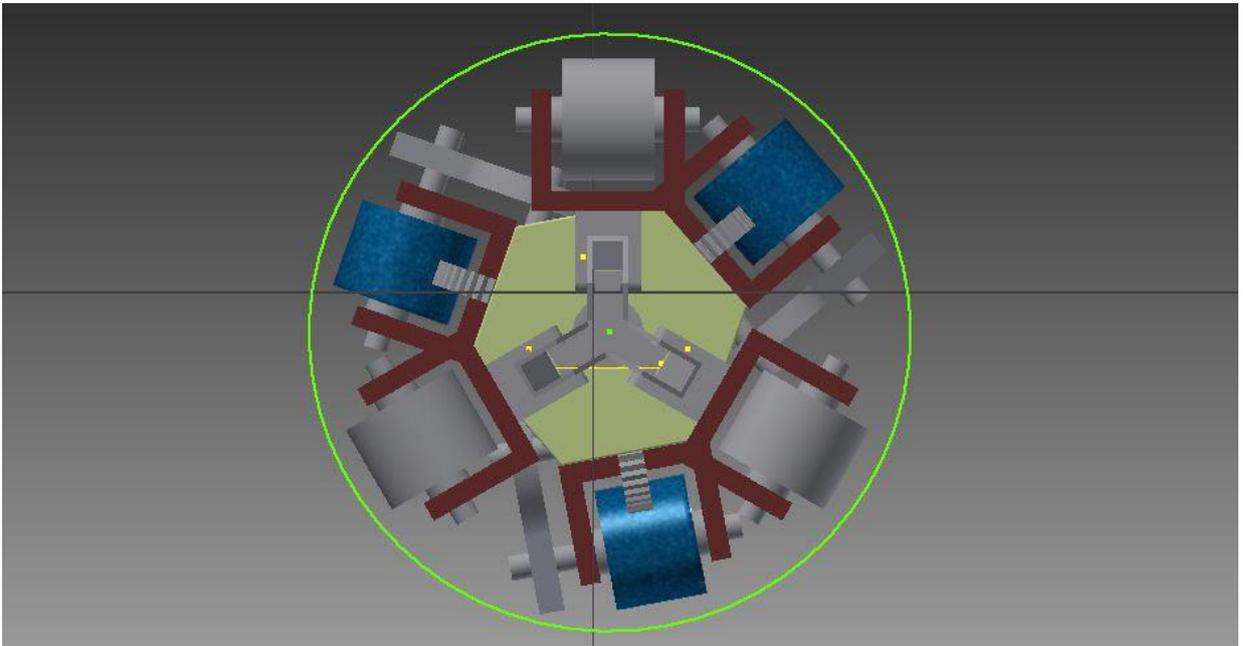
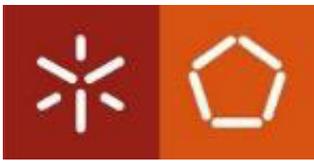


Figura 92 - Teste diametral: Traçado de circunferência com 110 mm de diâmetro

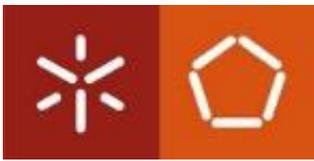
O teste diametral provou também que o intervalo de adequabilidade ultrapassou as expectativas em três milímetros, com o diâmetro mínimo a situar-se nos 107 mm e máximo nos 124 (assumiu-se 125 mm).

Identificam-se duas razões principais para tal:



INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

- O bom funcionamento do mecanismo de suspensão em que a porca de aperto do mesmo garante a compressão da mola helicoidal e conseqüente levantamento dos braços das lagartas devido à força aplicada, adaptando o dispositivo a diâmetros maiores. Ao invés, o desaperto da porca causa torção na mola, reduzindo a tensão nos braços das lagartas e permitindo uma adaptabilidade a menores diâmetros;
- Deslocação do tipo “comboio”. A utilização de dois conjuntos de locomoção um atrás e outro à frente, com 3 lagartas cada um, funcionando em termos práticos como duas carruagens de locomoção que não só aumentam a estabilidade do mecanismo, como permitem ainda um menor ângulo entre as lagartas e o corpo central, proporcionando maiores compacidade e facilidade de adaptação a menores diâmetros. No caso, o espectro diametral foi acrescido, como suprarreferido, em 3 mm.

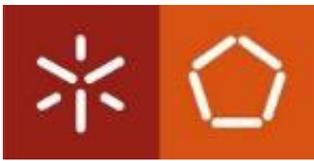


Conclusões

A execução deste trabalho tornou possível a elaboração dum plano de projecto e construção dum dispositivo capaz de viajar por dentro de qualquer tubagem horizontal com diâmetros compreendidos entre os 107 e os 125 mm. Este feito foi atingido com recurso a sistemas de tracção e de suspensão adaptados a partir de mecanismos já existentes, como uma mola helicoidal e um parafuso sem-fim e respectivas polias, disponíveis na Oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, recuperados de equipamentos obsoletos, com valor, pelo menos, de sucata.

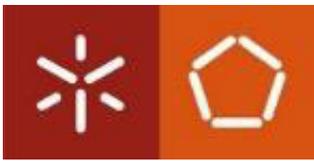
Os sistemas de tracção e transmissão de potência selecionados permitem uma locomoção intratubular do dispositivo numa forma independente, com recurso a um motor eléctrico e a um sistema de tracção que evita a necessidade de colocação de um desses motores em cada lagarta, diminuindo substancialmente o custo final do dispositivo aquando duma possível construção. O sistema de suspensão adoptado permite um comportamento mecânico condizente com possíveis desafios intratubulares ou acidentes no geral, tendo em consideração a capacidade de torção, compressão e tracção da mola, que não só é a responsável pela absorção de choques ao longo do deslocamento do dispositivo, como também é parte integrante do sistema que, não só conduz o dispositivo como torna possível a adaptabilidade diametral do conjunto. Fica assim demonstrado que pode ser construído um protótipo a baixo custo, que era objectivo base da dissertação e do trabalho.

No que toca a limitações ao projecto e propostas para o futuro, destacam-se o facto de a peça central ser relativamente complexa no que toca à sua construção, uma vez que esta implicaria o torneamento de duas peças de alumínio hexagonais e a junção das duas através, por exemplo, de soldadura. Além disso, a peça central não garante a estanqueidade do motor, elevando a necessidade de adaptação ou construção dum motor hidráulico encarregue de propulsionar de forma independente o dispositivo e a transmissão de potência às lagartas motoras. Ainda no que toca ao motor, não se contempla a capacidade de recuo do dispositivo, além do que o espaço possivelmente reservado a sensores é relativamente reduzido. Relativamente a este último tópico importa dizer que a partir de determinada altura no projecto, o objectivo focou-se num dispositivo que fosse projectado para mover-se dentro duma tubagem horizontal, e, desse



INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

ponto de vista, o objectivo foi claramente cumprido. No entanto, será importante projectar no futuro um dispositivo que possa ser propulsionado de forma independente ao longo duma conduta vertical, se atentarmos ao facto de as caleiras domésticas de escoamento de águas residuais adoptarem essa orientação. Também no futuro, o desenvolvimento de protótipos pode evoluir de forma modular, podendo ser estabelecidos módulos com diferentes funções conforme a aplicação a que se destinem que incluam, como suprarreferido, sistemas de inspecção, como por exemplo um sistema de circuito fechado de televisão e, futuramente, sistemas de reparação.



Bibliografia

Subterra - Effective solutions, Total capability. (2003). Obtido em Março de 2009, de <http://www.subterra.co.uk/>

ABB ROBOTICS. (2013). *ABB ROBOTICS: Industries and utilities.*

American Society of Civil Engineers. (1996). *Pipeline Crossings.* New York: ASCE.

B31.8S, A. /., & PHMSA. (2004).

Civil, L. -L. (10 de Janeiro de 2007). *Departamento de Hidráulica e Ambiente.* Obtido em Junho de 2009, de <http://www.dha.lnec.pt/nes/epanet/>

Dias, N. (2004). Diagnóstico de sistemas de abastecimento de água para diferentes condições de operacionalidade e segurança. *Trabalho Final de Curso de Engenharia Civil* . Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Gargade, A. D. (2013). Modelling and Analysis of Pipe Inspection Robot. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.*

Groover, M. P. (2008). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing, Third Edit.* Pearson Prentice Hall.

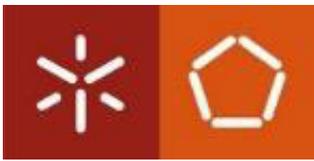
Lim, J. H.-S.-J. (2008). *One pneumatic line based inchworm-like micro robot for half-inch pipe inspection.*

LITZENBERGER, G. W. (2012). *World Robotics 2012 Service Robots, the IFR Press Conference 30 August 2012.* Taipei.

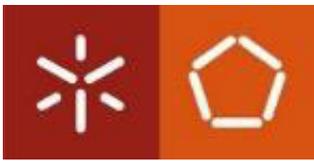
Liu. (2009).

Machado, C. (2005). Tese de doutoramento. *Reabilitação de pontes e viadutos.*

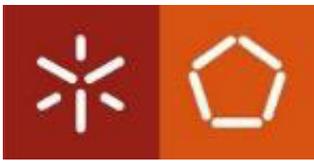
Martinson, E. (2004). The Pipe Crawler. *Implementing Current In-Line Inspection Technologies on Crawler Systems.*



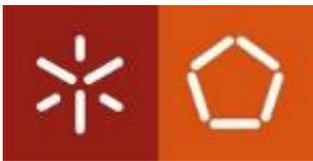
- Michael Baker Jr., Inc. (2010). *Mechanical Damage: Final report*. Washington : U.S. Department of Transportation - Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration.
- Nishijima, K. Y. (2010). Advanced pipe inspection robot using rotating probe 2010. *The Fifteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics*,.
- Ono, M. T. (2001). *Development of an In-pipe Inspection Robot Movable for a Long Distance*. Miyashiro: Nippon Institute of Technology,.
- PHMSA . (2009). *PHMSA*. New Jersey.
- Raposo, M. J. (2008). *Inspecção e Reparação de Tubagens: Desenvolvimento de dispositivos acessíveis*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Roslin, N. S. (2012). *Hybrid Locomotion of In-pipe Inspection Robot*, *Procedia Engineering*.
- Suppes. (2004). Wisconsin- Wisconsin-Eau Claire.
- Tătar, O. D. (2007). *Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks*, . *Mechanika*.
- U.S. Fire Administration . (2008). *Water Supply Systems and Evaluation Methods*. Washington .
- W. Kim, H. H. (2007). "DEVELOPMENT OF IMAGE PROCESSING METHOD FOR HIGH QUALITY PIPELINE INSPECTION," 24th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. . ISARC .
- Winkelman. (2008). *EU trans-port policy and seaport development*.
- Xi, G. L. (2009). "Image Processing Technology for Pipe Weld Visual Inspection," . *WASE Int. Conf. Inf. Eng. WASE* .
- Zhang, Y. Y. (2007). In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting, *Mechanism and Machine*.
- Zin, M. R. (2012). *Development of a Low Cost Small Sized In-Pipe Robot*, *Procedia Engineering* 41.
- Aerial Pipeline System. (1972).



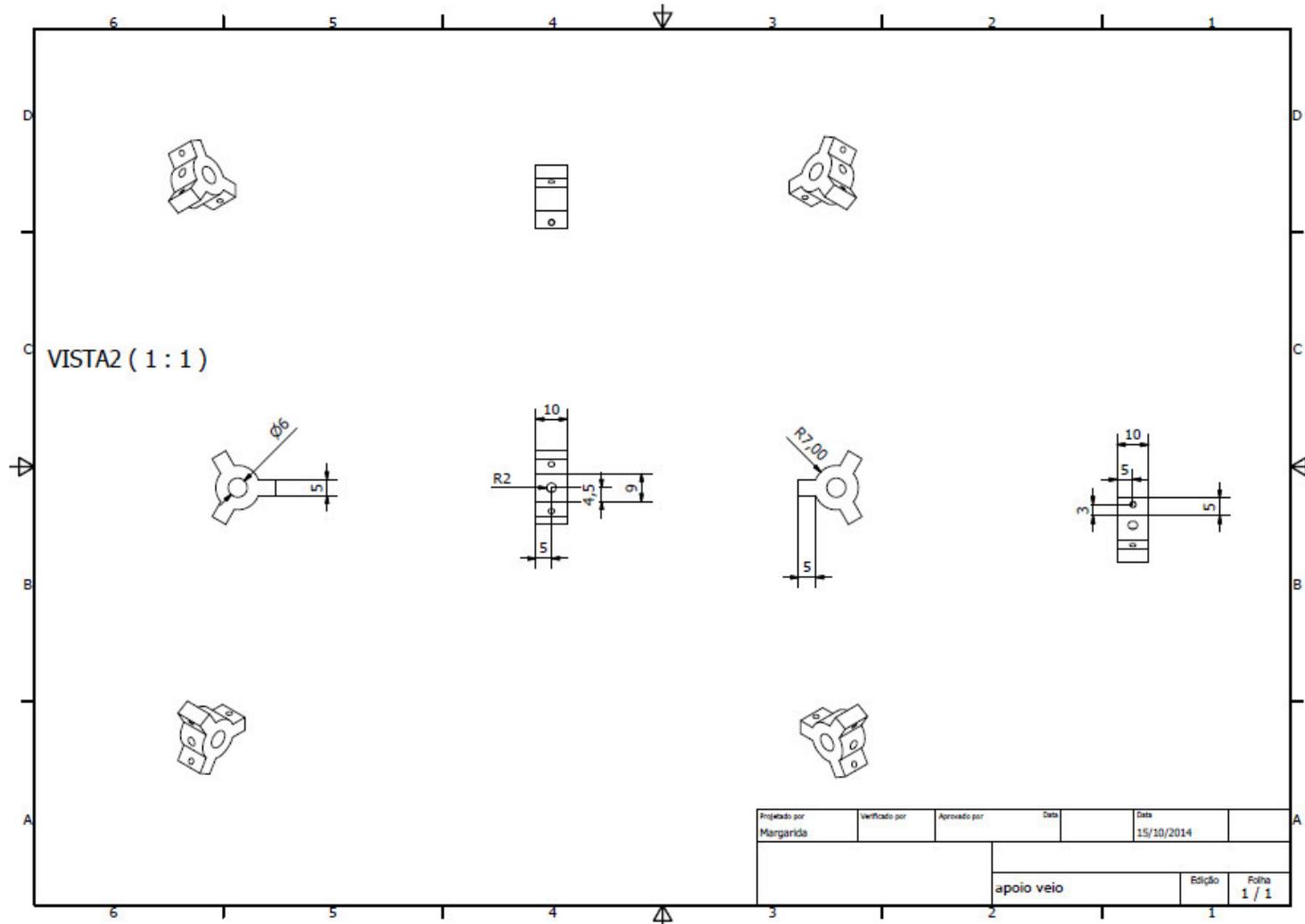
Anexos

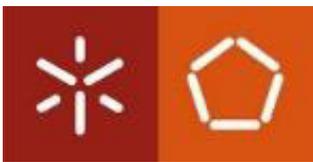


Anexo 1 – Desenhos Técnicos dos componentes do Dispositivo

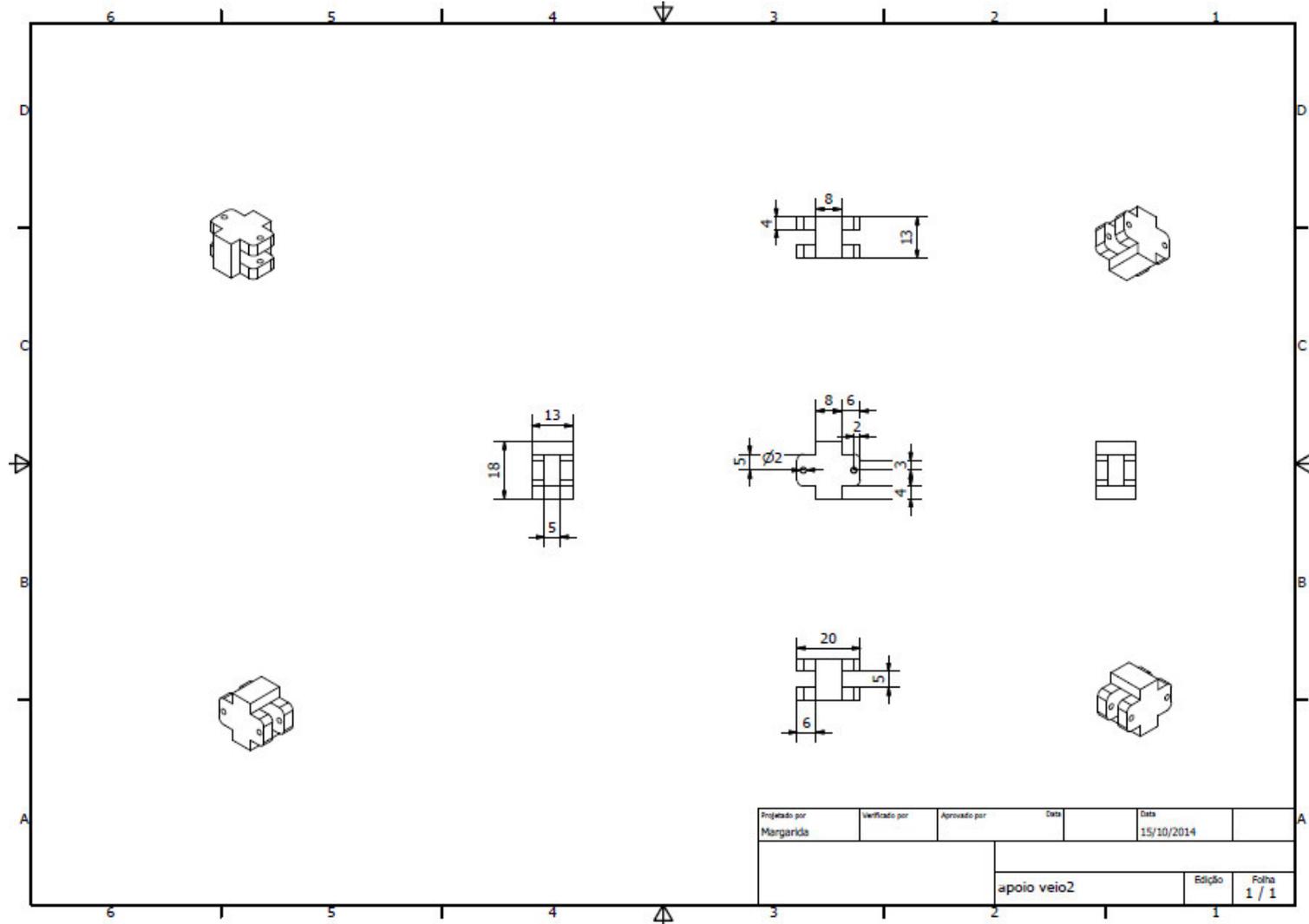


Apoio do Veio da Suspensão



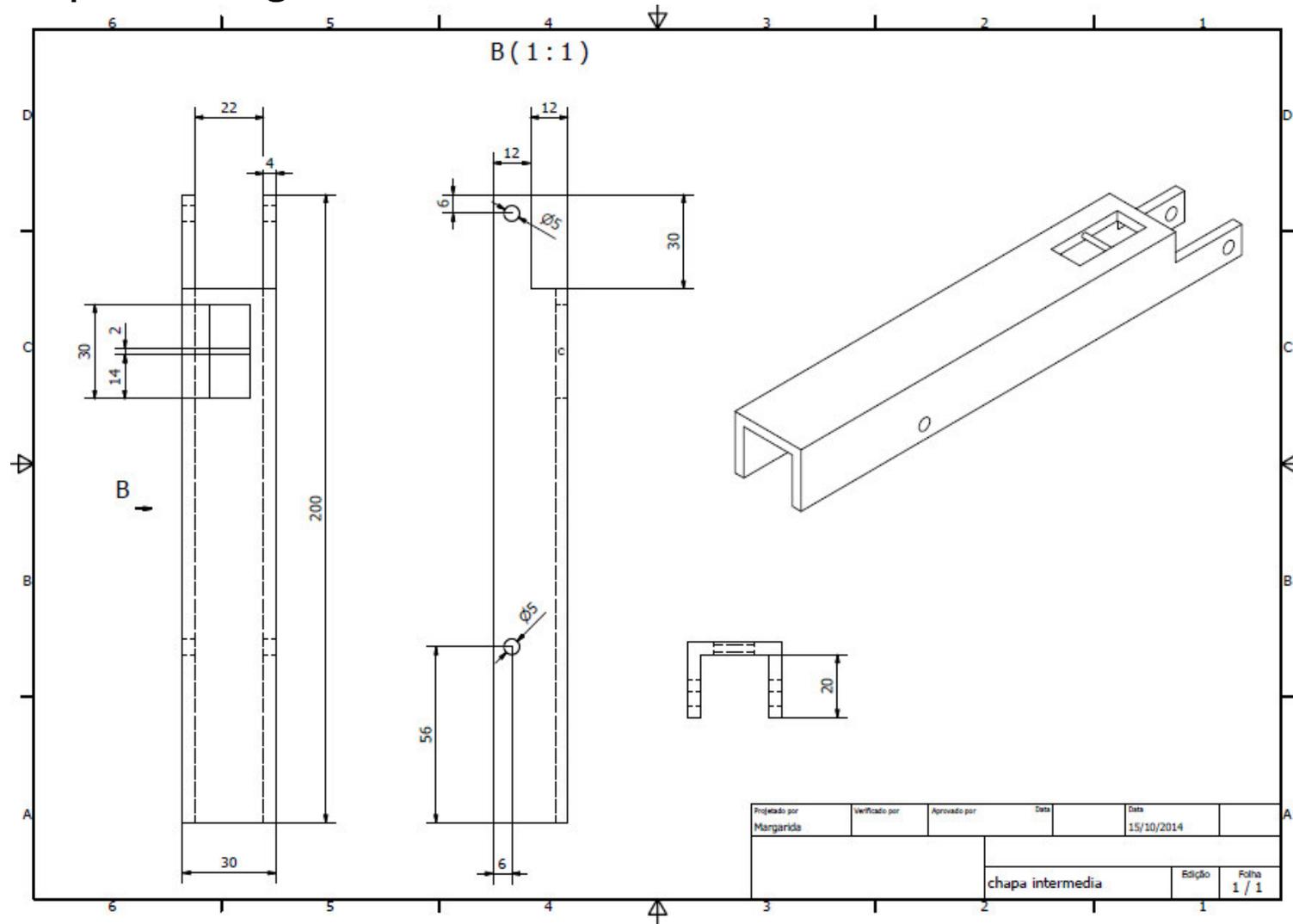


Segundo apoio – Encaixe de Distribuição angular



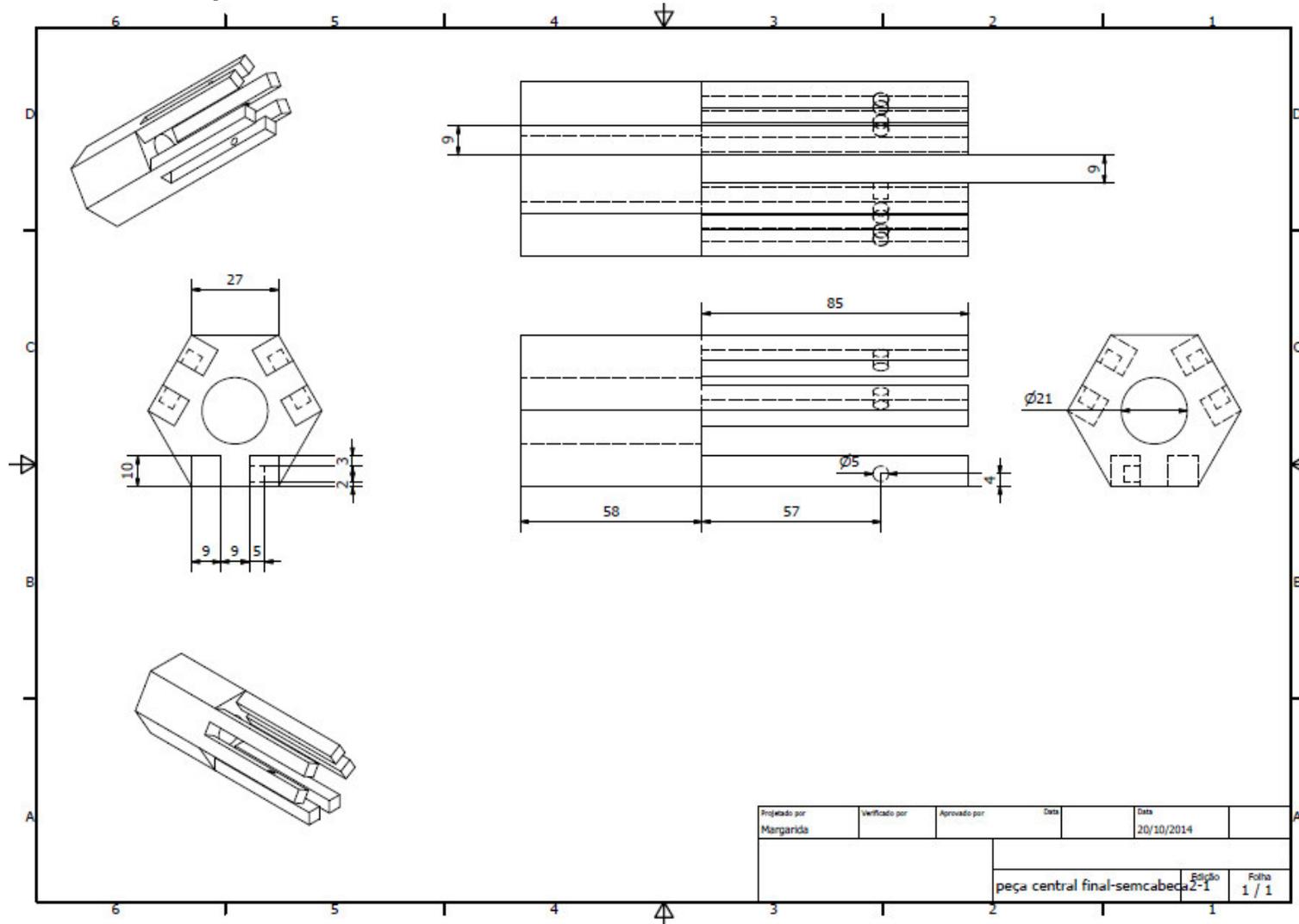


Chapa de suporte das lagartas



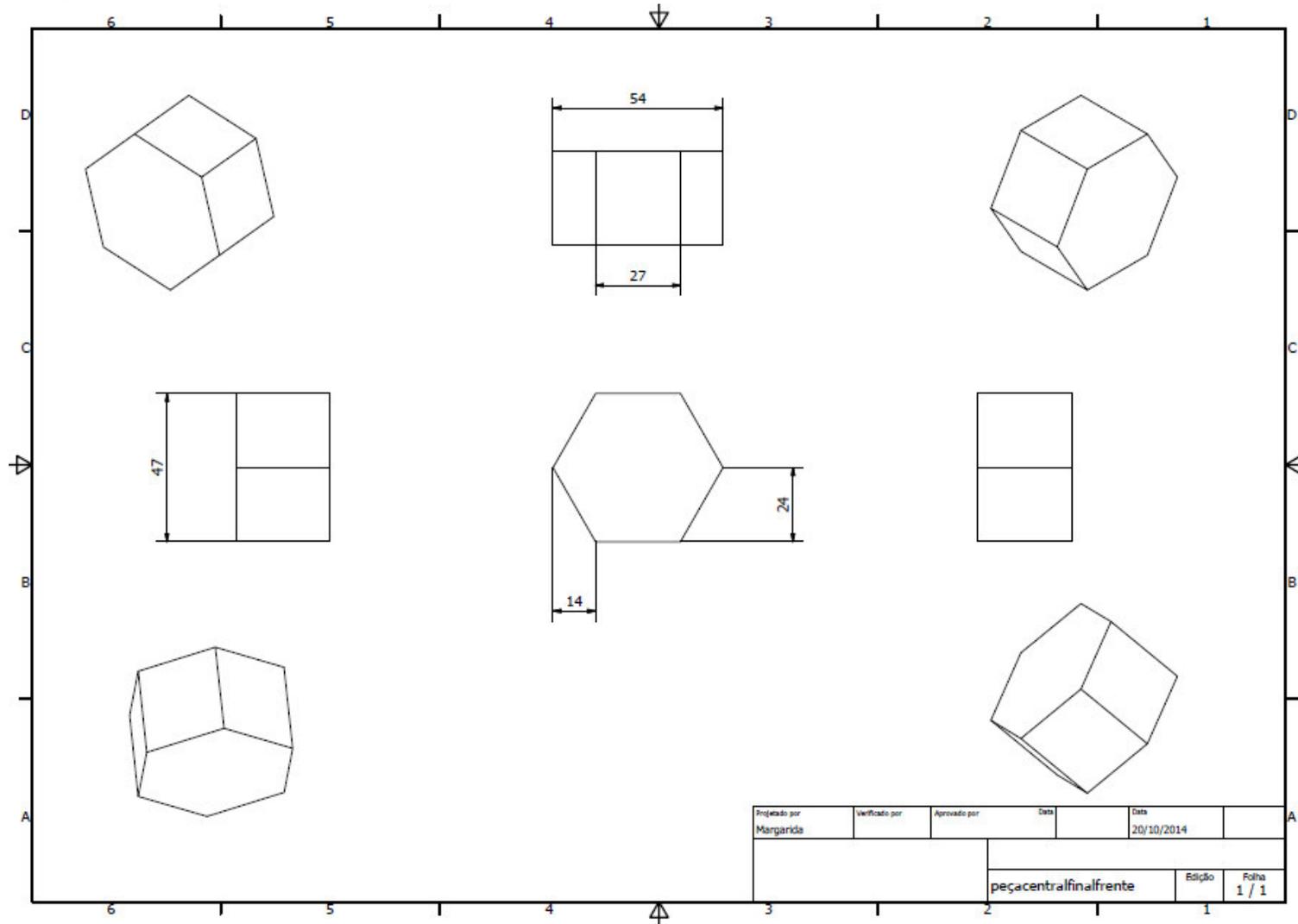


Peça central sem topo



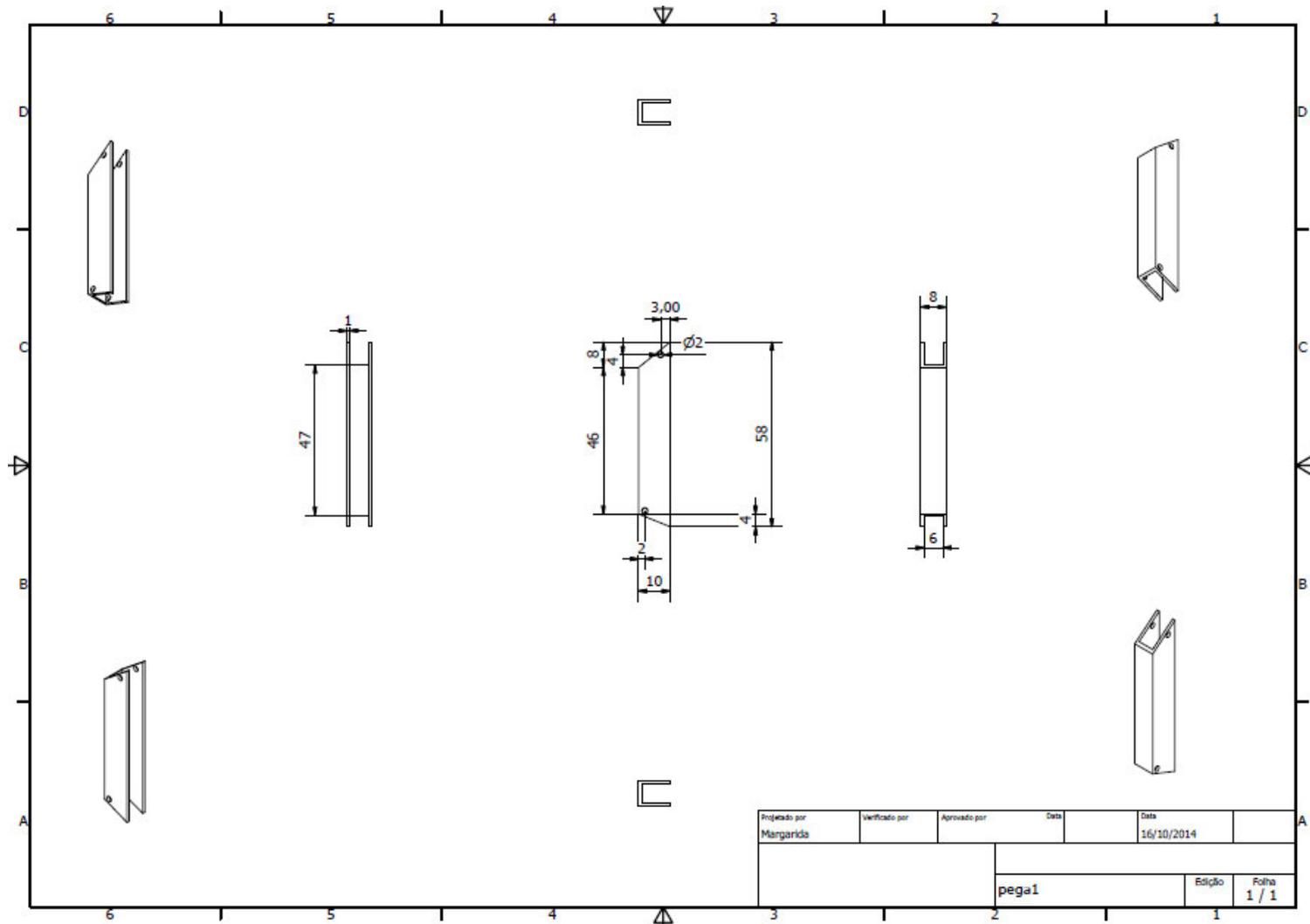


Topo da Peça Central



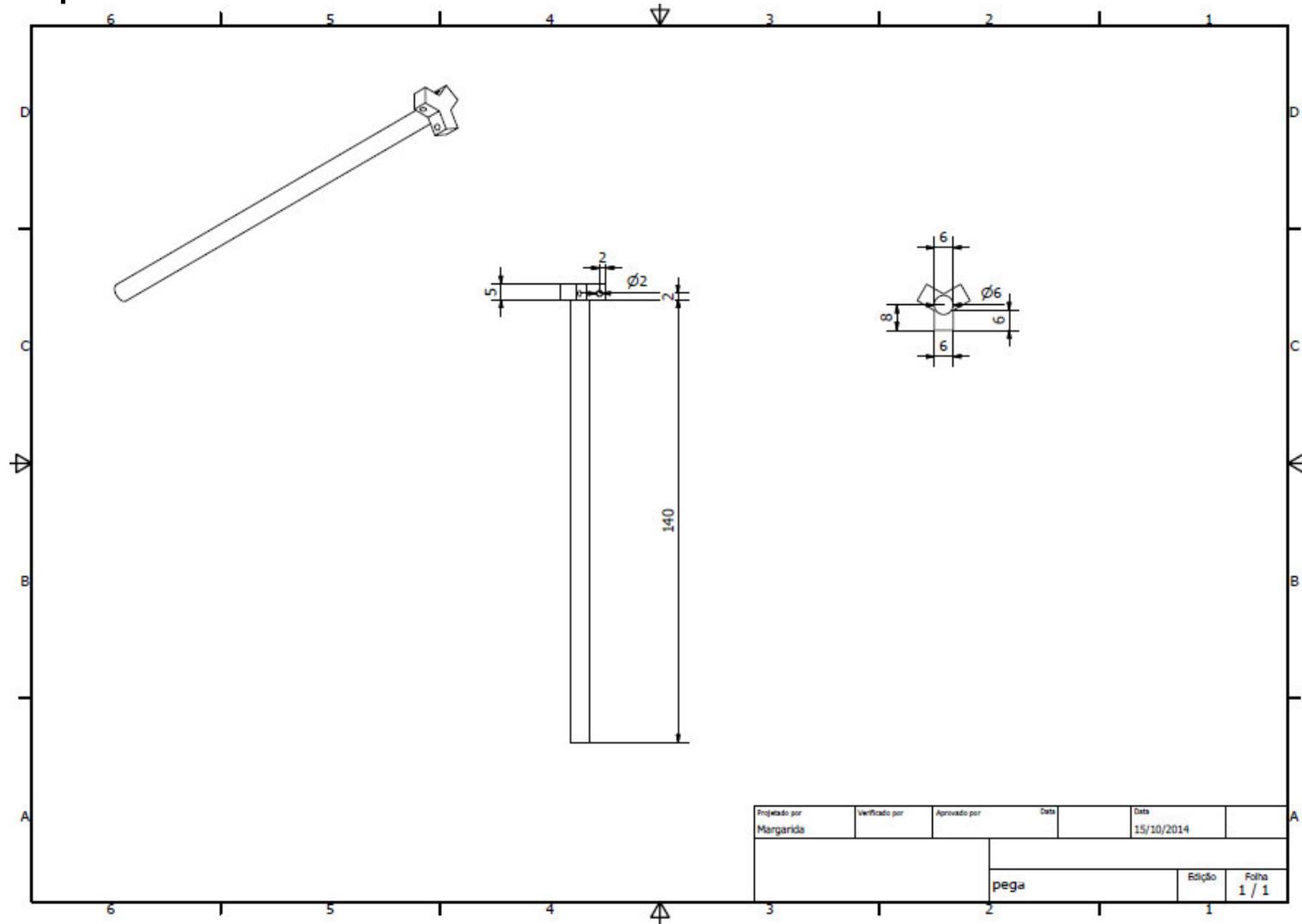


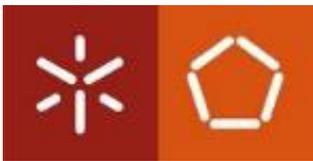
Braço de suspensão



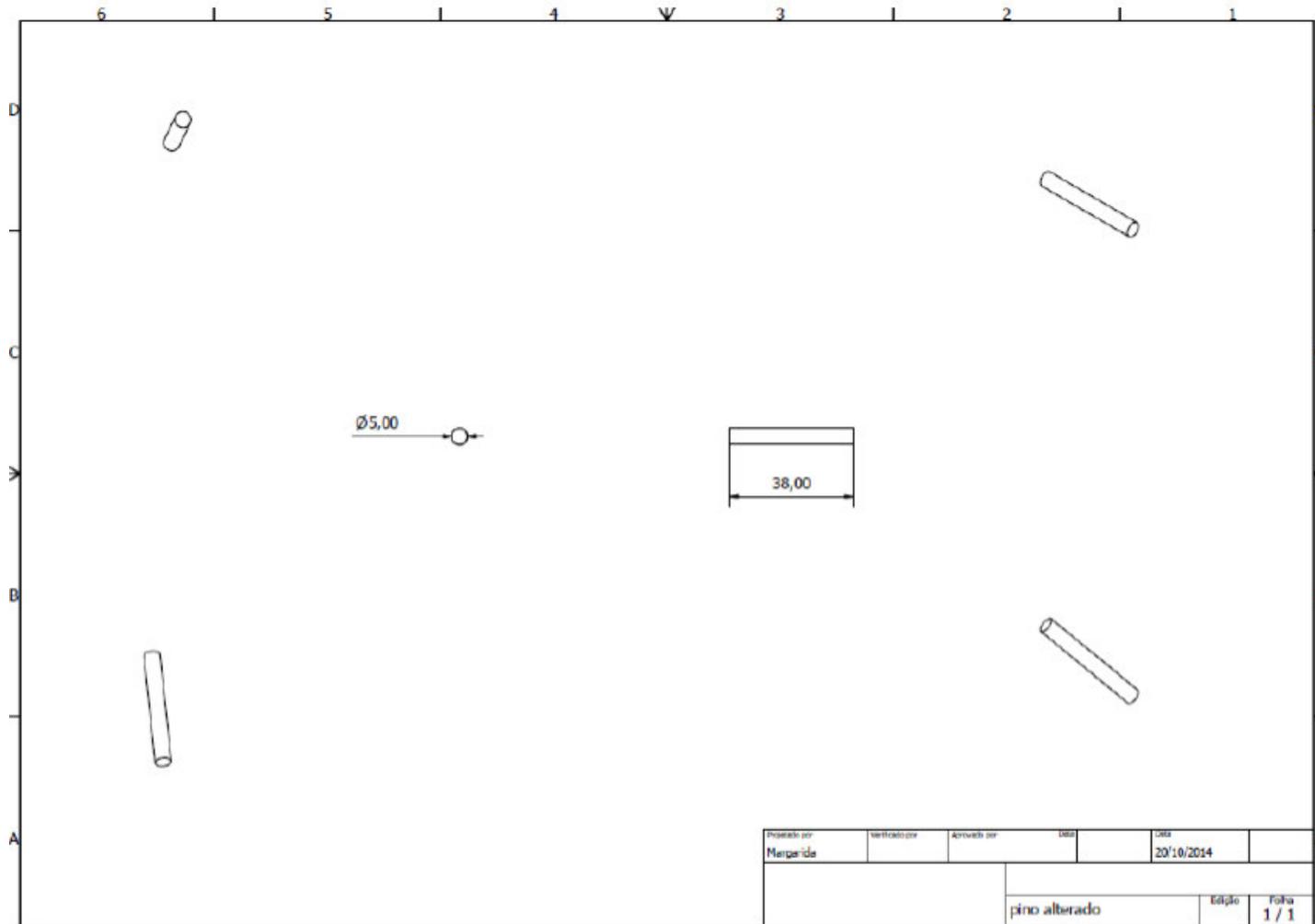


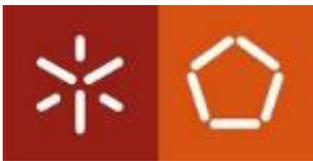
Eixo da suspensão



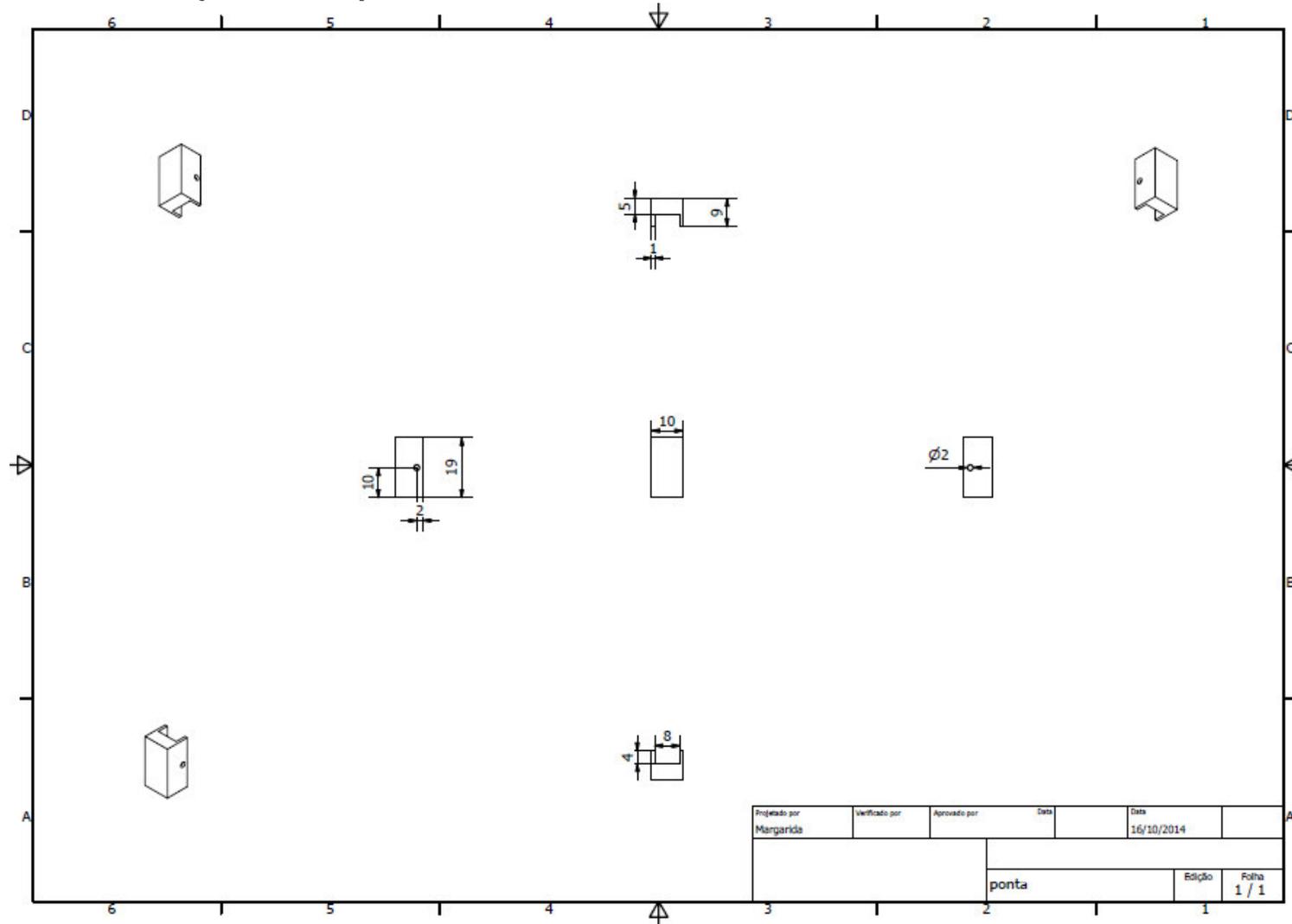


Pino de Ligação



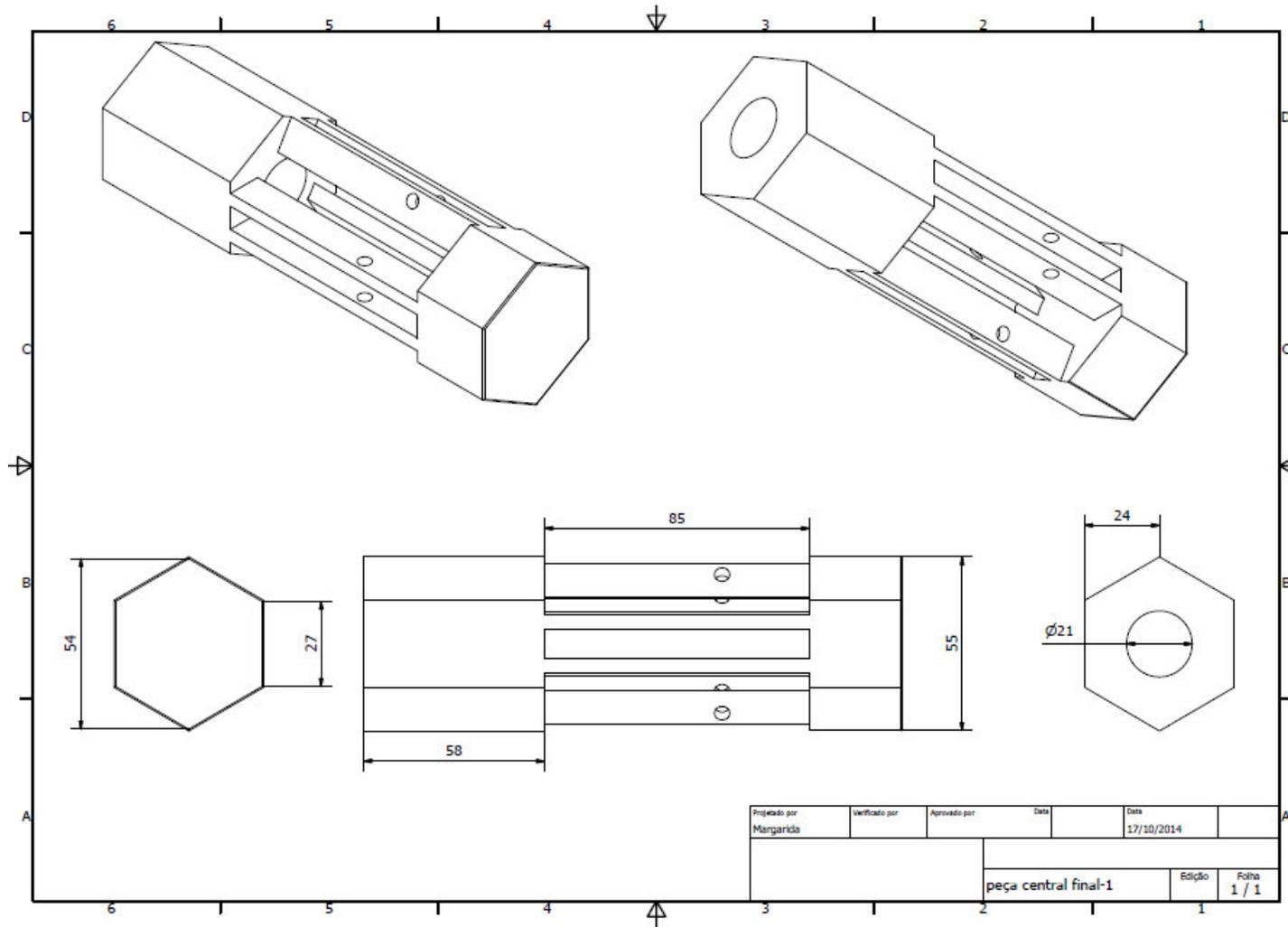


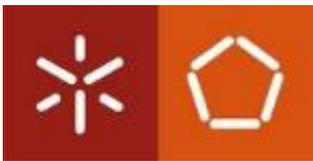
Extremidade do Braço de Suspensão



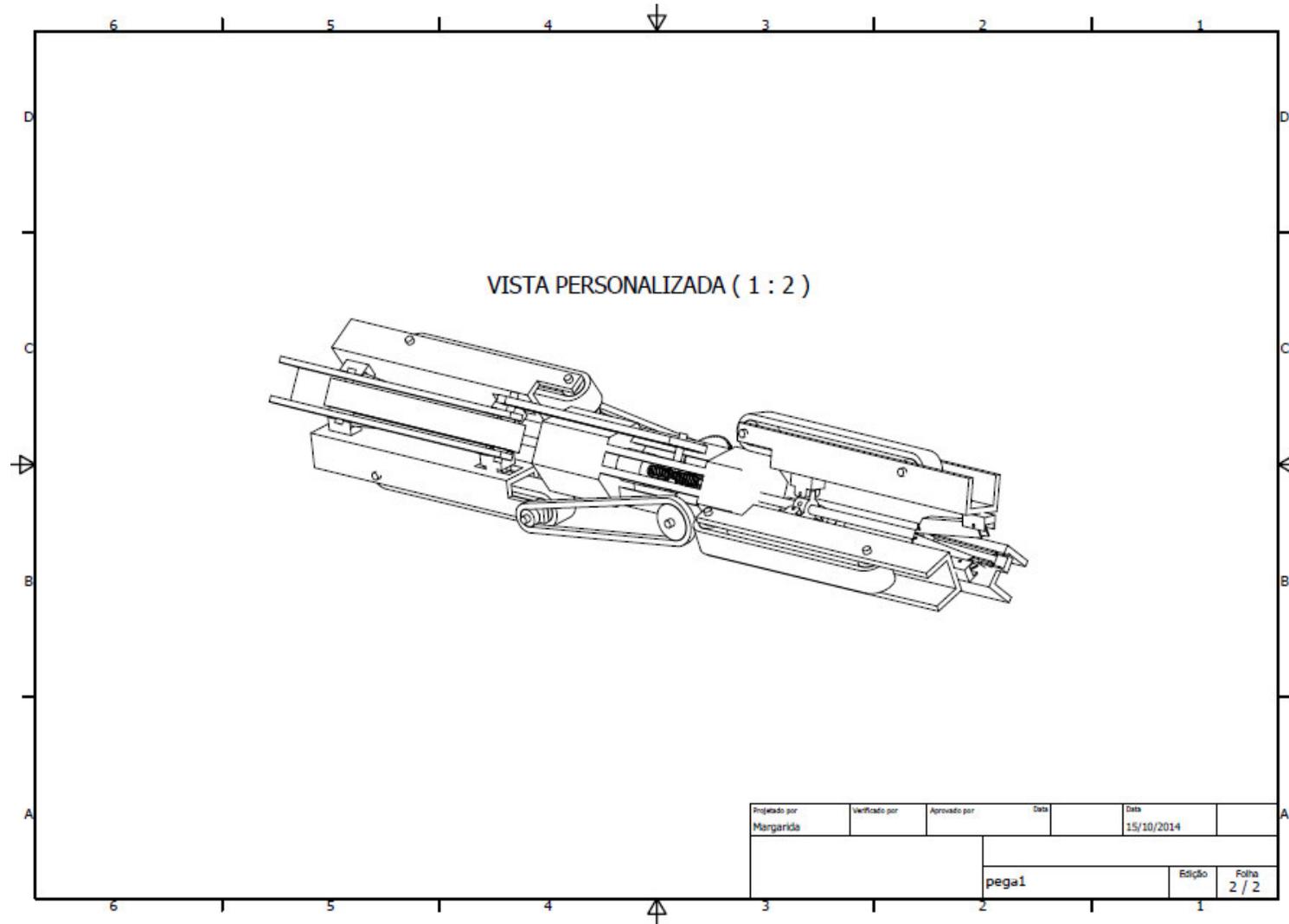


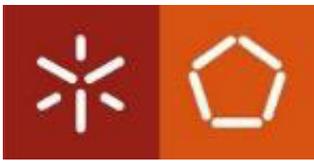
Corpo Central Final





Dispositivo Final





Anexo 2

Grampos de reparação

SCOPE OF DOCUMENT

The scope of this document involves the use of pipe repair clamps and connectors. This document also provides a review of the use of composite materials for the repair of pipework. This document does not, therefore, provide guidelines on other pipe repair methods, such as by-pass repairs using hot-taps and stopples, 'slip-lining' repairs using plastic liners, and repairs using weld overlays to re-instate the pipe wall.

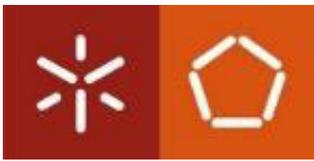
Pipe, piping, piping components, and pipework are all terms often used when describing pipework and piping systems. This guidance document is concerned with the repair of pipework the term pipework referring to an arrangement of pipes and pipe fittings (e.g. elbows, bends, tees, reducers, flanges). This guidance document does not, therefore, cover the repair of non-pipework items such as valves, filters etc.

Pipelines are specific examples of pipework and piping systems used to convey fluids over significant distances. Although these guidelines have been specifically produced to address above ground pipework and piping systems, they may equally be applicable to buried pipelines and submarine pipelines (buried or not). Some of the repair concepts discussed in these guidelines require consideration of the restraint of axial loadings which, in the case of buried pipelines, may be automatically accommodated (restraint afforded by pipe/soil friction etc.).

These guidelines apply to the repair of carbon steel pipe and pipework only. Other metallic pipe/pipework, such as stainless steel, duplex stainless steel, copper nickel etc., may present other factors for consideration (e.g. weldability, surface treatment/preparation agents for composite materials etc.), and are outwith the scope of this document.

1.2 LAYOUT OF DOCUMENT

This document is primarily concerned with metallic mechanical clamps and connectors as used



for the repair of damaged/deteriorated pipe components. As composite materials are finding increasing applications to pipe repair situations, a review of their use is presented in section 6 of this document. All other sections of this document, including the section presenting the results of the literature searches, are primarily concerned with the use of metallic mechanical clamps and connectors for the repair of damaged/deteriorated pipe components.

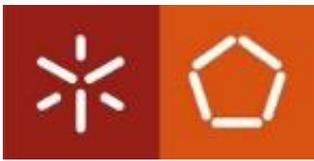
2. LITERATURE REVIEW

A number of sources of information have been accessed in order to glean information concerning the state-of-the-art of pipework repair systems/components. These sources of information consist of, in the main, known databases that hold references of publications (articles etc.), but are supplemented by other non-direct information sources, such as the Internet. Section 6 of this guidance document presents a review of the use of composite materials for the repair of pipework, and presents the work that is currently being carried out within the Working Group on pipe repairs using composite materials. The literature review presented in this section of the document, therefore, concentrates on metallic mechanical repair sleeves, clamps, and couplings/connectors, but also considers the use of un-reinforced composite materials (e.g. epoxy resin without any reinforcement material) used in conjunction with metallic repair components.

2.1 DATABASE SEARCHES

A number of database searches have been conducted in order to identify current and past activities relating to the use of pipework repair systems/components. The databases chosen were based on knowledge of their popularity and coverage of the subject matter – Engineering, Energy, Science and Technology. The following databases have been accessed:

- The Energy Technology Data Exchange (ETDE) – this database is hosted by the United State’s Department of Energy (USDOE) for the International Energy Agency (IEA) which is an international consortium that collects and exchanges research and technology information through the ‘Energy Database’. The Energy Database covers all aspects of energy technology and its environmental effects, covering all energy sources (including fossil fuels), energy conservation and energy policy.
- ‘COMPENDEX’ – this database is hosted by Energy Information Inc. (Ei). COMPENDEX is the world’s most comprehensive Inter-disciplinary Engineering Database, offering over five



million summaries of journal articles, technical reports, conference papers, and proceedings.

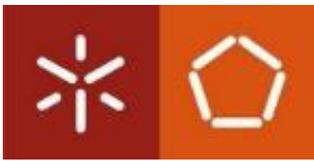
Ei recently acquired *API EnCompass* (the premier source of world-wide information for the downstream petroleum, petrochemical, natural gas, and energy industries) thus adding one of the premier online databases for the oil and gas industries to their portfolio: APILIT® - the Technical Literature database. Ei's internet address is <http://www.ei.org>

- 'APILIT2' – this is Ei's Technical Literature database for non-subscribers.
- 'TULSA2' – this database is hosted by the University of Tulsa and contains references to technical literature on the oil and gas exploration and production industry.

Each of the above databases was searched for relevant references using suitable KEYWORDS. The KEYWORDS used were; PIPE, PIPING, REPAIR, CLAMP, CONNECTOR, COMPOSITE, WRAP, REVIEW, OVERVIEW, STATE ART (2 words) and SURVEY. The databases are searched looking for these keywords, or combinations of the keywords, within the TITLE, ABSTRACT, and CONTROLLED TERM (CT) LISTING. Controlled Terms are Keywords, Indexing Terms (IT) or Subject Terms (ST) added by the database administrator.

In order to set a realistic limit on the number of references revealed by the searches, the date range for the searches was set at 1985 to present day – COMPENDEX holds records dating back to 1970. A large number of potentially relevant references was noted against the individual keywords and the combination of the main keywords of PIPE/PIPING and REPAIR (4760 references). By concentrating the searches on the Titles and Controlled Terms (i.e. ignoring the information contained within the Abstracts) this number was reduced to 763. Combining these results with the keywords of REVIEW, OVERVIEW, STATE ART (state-of-the-art), and SURVEY revealed a total of 86 references. This was particularly useful to check on the existence of any previously published reviews of pipe/pipeline repairs.

The Titles and associated Controlled Terms of the 763 and 86 references were studied to identify the relevance of the references. Study of the Abstracts of 6 relevant references revealed 4 papers to be of particular relevance, and copies of these were obtained through the British Library's



In addition to the above databases, AEA Technology's National Non-Destructive Testing Centre's database 'QUALTIS' was searched for technical literature pertaining to pipe/piping repair. Despite there being some 63,000 separate references in all, dating back to the 1960s, none of the database entries were found to be relevant to the subject of pipe repair components.

2.2 THE INTERNET

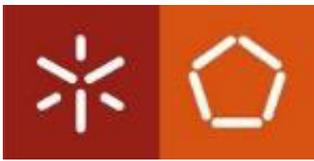
As a source of information on pipe repair clamps and connectors, the Internet's information base is vast. Various 'search engines' can be used which, when used with appropriate search words/phrases, guarantee that relevant information is captured. Review of the results of the various searches invariably identified individual companies that offer pipe repair products and services. The information contained within the various individual company web sites is usually of a general nature with little in the way of detailed technical information (e.g. pressure/temperature limitations of repair clamps). However, the individual company web sites invariably contained contact details and these details were used to obtain further information concerning the company's products and services.

2.3 OTHER SOURCES OF INFORMATION

A number of additional articles have been found indirectly from AEA Technology's library of technical periodicals (e.g. Offshore Engineer, Pipe Line & Gas Industry etc.), conference proceedings and through other connections. These articles tend to either supplement the information obtained through other sources, or tend to discuss specific applications of a particular repair solution that may not be directly associated with piping or piping components. For example, 1 particular article describes a repair that involved the helium purging of a special habitat placed over a leaking sub-sea pipeline check valve and the subsequent epoxy-resin injection into a sleeve placed over the check valve.

2.4 SUMMARY OF LITERATURE REVIEW RESULTS

A large amount of relevant information has been sourced and reviewed during the production of this guidance document. The vast majority of the existing pipe repair products and services have been available for some time now and various repair components, such as heavy duty repair clamps, are available as standard items (e.g. PLIDCO clamps, Furmanite clamps, IPSCO's split sleeve repair clamps etc.). These proprietary items are typically designed to comply with, or exceed, the requirements of Industry Standards, such as API 6H: Specification on End Closures, Connectors and Swivels which covers pipeline closures, connections, couplings, misalignment devices (swivels) and split mechanical fittings. These proprietary items, and other repair components, may also have obtained 'type approvals' from Certifying



Authorities, such as DNV and Lloyd's Register for use to perform pipe repairs or to perform pipe modifications/tie-ins etc. One particular repair solution that may be regarded as relatively new, and one which is regarded as being novel in its approach, is the epoxy-filled sleeve repair technique. This technique avoids the potential hazards of welding on an operational pipe/pipeline by using steel sleeves filled with epoxy grout (or resin). The technique, developed separately by a number of operators, such as British Gas¹, Battelle² in the USA and Gasunie³ in Holland, differ in their method of application, but all rely on the same principle – to provide a continuous radial load transfer between the epoxyresin and the steel sleeve. This repair technique is discussed further, based on British Gas' experiences, in section 4.2 of this document.

3. PIPE REPAIR SCENARIOS

There are three main repair scenarios considered in this guidance document; pipe subject to external metal loss (caused by corrosion or mechanical damage), pipe subject to internal metal loss (caused by corrosion, erosion or erosion/corrosion), and piping components that are leaking. In addition to these main repair scenarios, the extent of the deterioration or damage (i.e. localized or extensive) will also be considered when choosing the repair methods and repair components.

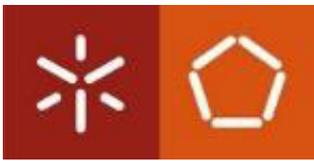
These repair scenarios are described further in the following sections.

3.1 PIPE SUBJECT TO EXTERNAL METAL LOSS

Many pipework failures have been caused by external corrosion. External corrosion may be present in many forms including simple environmental corrosion (e.g. coating breakdown and subsequent corrosion, corrosion under insulation etc.), crevice corrosion, and galvanic corrosion. Regardless of the actual corrosion mechanism that is active, the resulting damage is in the form of metal loss – loss of wall thickness. This metal loss may be localised (as in the case of corrosion underneath a pipe support) or may be extensive (in the case of corrosion under insulation). Mechanical damage to pipework may, or may not, be accompanied by metal loss. For example, an indentation may have simply deformed the pipe locally without any associated gouging or thinning of the pipe wall. Plain dents up to six percent of the diameter of the pipe do not need to be repaired. Deeper cause operational problems (e.g. interference with pigging). By virtue of their probable causes, dents are considered to be an example of localised damage.

Cracking (not strictly speaking, damage involving metal loss) of weldments or of the parent pipe itself, but which has not resulted in leakage of the piping system requires special consideration.

The repair of a cracked section of pipework would involve arresting any further propagation (providing that the crack itself is not threatening integrity) or removal/repair.



Whatever the cause of the external metal loss, it is assumed that the prevention of further deterioration will automatically be addressed by the combination of realising the presence of the damage/deterioration (measures taken to prevent re-occurrence) and the repair action itself.

3.2 PIPE SUBJECT TO INTERNAL METAL LOSS

Conveyed fluids within piping systems, especially in oil and gas and petrochemical applications, can present problems of internal corrosion, erosion, or a combination of corrosion and erosion. Dependent on the severity and extent of the internal damage/deterioration the pipework may be leaking or be in threat of leaking. The repair scenario considered here, however, is when internal metal loss has not resulted in leakage – the next section deals with pipework leaks.

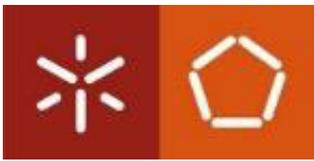
Unlike external corrosion, it may not be possible to arrest the metal loss mechanism and further time-dependant damage/deterioration will continue. Unless it is possible to arrest the metal loss mechanism, the chosen repair components will need to accommodate the effects of the eventual further deterioration. In these cases the reinstatement of pipe integrity may only be considered to be temporary, unless the design of the repair components specifically address the effects of further deterioration, at least up to the remaining life of the piping system.

Unlike external corrosion, internal corrosion, erosion or corrosion/erosion is more difficult to quantify, both in terms of the absolute metal loss and the extent of this metal loss. Inspection techniques are available, such as ultrasonics and radiography, to assist in this quantification.

What is important is to gain as much information as possible on the damage/deterioration to enable the correct repair method to be chosen. It is particularly important to obtain information regarding the ability of the sustained damage to accommodate the axial stresses which, in complex pipe systems, can be significant. Also, further deterioration of existing internal metal loss may result in the pipe wall being unable to carry these axial loads.

3.3 PIPE SUBJECT TO LEAKAGE

Leakage may be caused by internal or external metal loss (or, very rarely, a combination of the two). Leakage may also be caused by cracking of welded seams or joints or of the parent pipe itself. Depending on the extent of the discovered damage, repair may require the installation of a repair clamp (localised repair) or the replacement of a section of pipe utilising connectors or couplings. In all cases where the pipe contents are leaking, it will be necessary to consider the suitability of the repair component to not only accommodate the pressure containment requirements, but also to accommodate corrosivity and other effects of the fluids. For example, elastomeric seals utilised within certain repair clamps/connectors may be susceptible to deterioration in the presence of volatile hydrocarbons, aromatics etc. The issues of possible longterm seal



degradation/relaxation and any need to first stem/plug the leak need to be considered. In some cases it may be possible to install a repair clamp to an actual leaking pipe - the clamp that encloses the defective, leaking area is provided with a vent plug (as shown in Figure 5) which can be closed once the clamp has been correctly installed and tightened. The ability of the repair component(s) to accommodate the axial loadings of the pipe system, especially in the case of a repair employing connectors, also needs to be considered.

One other scenario that is considered within these guidelines is the case of a leaking flange. The leak will most probably have been caused by corrosion or relaxation of the flange face/gasket area. However, it is possible to experience leakage of the pipe to flange welds (fillet weld in the case of slip-on flanges, and circumferential butt weld in the case of welding neck flanges).

4. RANGE OF AVAILABLE REPAIR CLAMPS AND REPAIR CONNECTORS/COUPLINGS

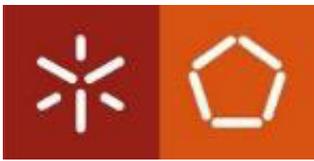
One of the fundamental aspects of a damaged/deteriorated pipe that dictates the type of repair component to be applied is the external pipe surface condition. If the external surface is damaged to the extent that an elastomeric seal cannot provide sufficient sealing forces in the immediate vicinity of the damage, or in the relatively unaffected areas adjacent to the major damage (these areas being used to effect the sealing of 'stand'-off repair clamps), the external pipe surface may need to be re-instated using some form of filler material. Developments using epoxy-filled steel sleeves have been shown to accommodate such areas of extensive damage and have applications for a whole range of defects, including corrosion, non-propagating cracks, dents or gouges in both axial and circumferential orientation, and girth weld associated anomalies. The epoxy-filled sleeve repair technique is discussed later within these guidelines.

4.1 REPAIR CLAMPS

The simplest form of repair component is a metallic patch which may be applied to cover a small, non-leaking defect. The repair involves the welding, by fillet welding to the pipe, of a suitably curved patch. The pipe wall in the weld regions, which are away from the defect area, must be of sufficient thickness and must be defect free. This type of repair is very rarely applied to high integrity applications and offers no major advantage over a simple patch clamp – a bolted clamp that holds a patch of elastomeric material adjacent to the defect area. An example of a patch clamp is shown below.

Elastomeric material

In the case of a small pin-hole leak on a section of pipe, a simple patch clamp may be used or a special pin-hole leak repair clamp may be used. The pin-hole leak repair clamp utilises a locator pin which guides



INSPECÇÃO E REPARAÇÃO DE TUBAGENS Desenvolvimento de dispositivos acessíveis

a pointed cone seal into the leaking hole. Pressure is then applied to the cone seal by a force screw and once the seal is compressed the pin may be removed thus completing the seal. This type of repair is capable of withstanding working pressures of up to 138 bar (2000 psi).

Pin-hole leak repair clamp

A defective section of pipe may be simply reinforced by the use of simple encircling sleeves. The sleeves are in the form of two halves and are a close fit to the outside diameter of the pipe. The two halves are welded together longitudinally (backing strips are used for the longitudinal welds to prevent weld induced damage, or mechanical property changes, at the pipe surface). For pressure containing applications, the sleeve must also be fully seal-welded to the pipe. An example of an encircling sleeve is shown below.

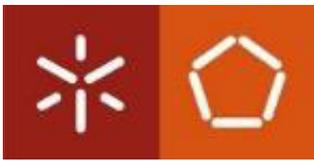
Encircling sleeve type repair

The most common form of pipe repair component is the 'stand-off' repair clamp. These repair clamps are usually cylindrical in shape and are formed in two half shells. Low pressure clamps, however, may be furnished in the form of a flexible one-piece assembly that can be 'sprung' over the defective pipe. Stand-off repair clamps are sometimes referred to as 'enclosures' by virtue of the fact that they totally enclose the defective area within a sealed pressure containment vessel. The sealing of the enclosure is typically by elastomeric seals at the longitudinal joints of the two half shells and seals at the ends of the 'cylinder'. These seals may be energised by the compression forces caused by the tightening of the two halves or can additionally be energised by any leakage of the pipe contents – acting on a lip-type seal.

Heavy duty pipe connector

A novel repair method, originally developed for cross-country pipeline applications, but now considered equally applicable to above ground pipe systems, is capable of withstanding high circumferential and axial stresses without the need to either directly seal weld a repair clamp (e.g. encircling sleeve) onto the pipe or to use a pipe connector with gripping devices.

The repair method, using split-sleeves in conjunction with an epoxy 'grout' filled annular gap, has also been shown to be capable of tolerating continuing internal metal loss – including subsequent metal loss growth through the pipe wall. The method itself is best described as a 'hybrid' – it is neither a conventional 'stand-off' repair clamp/connector, or a composite repair system (the epoxy is not used with any reinforcement material). The operating principle is to prevent the pipe damage bulging radially by providing a continuous transfer of load/stresses, through the epoxy grout, to the steel repair sleeve. The epoxy grout limits the applicability of the repair method to approximately 100 bar (1450 psi) operating pressure with a temperature range of between 3°C and 100°C. However, severe cold temperatures – as,



perhaps, experienced during blow-down of a pipe containing natural gas liquid – have been shown not to effect the fitted repair sleeve down to temperatures of -65°C (-85 °C).

The ability of the repair method to tolerate leaking, or future leaking, pipes is due to the careful adherence to the specified pipe and sleeve surface preparation by grit blasting to Swedish External pressure Standard SA3 – this provides the correct surface key and chemical cleanliness for good epoxy bonding. This repair method is, however, not a rapid repair method since the two half shells require welding longitudinally and the epoxy, once mixed and injected into the annular space, requires approximately 24 hours to cure to 90% of its ultimate strength. The epoxy-filled repair sleeve technique.

Epoxy-filled repair sleeve

This repair method can be applied with a wide range of annular space between the repair sleeve and the pipe outer diameter of between 3mm and 40mm. Repairs have been effected to longradius field bends using oversize-diameter pipe, bent to the relevant angle and sliced in half.

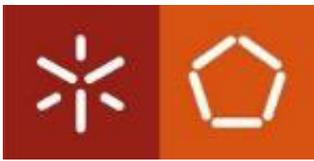
5. APPLICABILITY OF DIFFERENT REPAIR COMPONENTS

5.1 COMMON REPAIR SCENARIOS

As has been shown in the previous section, there is a large range of repair components that may be suitable to the more common repair scenarios. Each of the repair solutions will have advantages and disadvantages and, possibly, some of the repair components may not be suitable or applicable. Table 1 provides a simple overview of the applicability of the individual repair components against a range of repair scenarios. These repair scenarios are grouped into the three main repair scenarios considered in this guidance document; pipe subject to external metal loss

(caused by corrosion or mechanical damage), pipe subject to internal metal loss (caused by corrosion, erosion or erosion/corrosion), and piping components that are leaking. Within each of these repair scenarios groups, the extent of the damage/deterioration has been further categorized in terms of being localised (i.e. isolated pit, small crack) or extensive. The table concentrates on the repair of straight sections of pipe and assumes that further deterioration is avoided and that the remaining pipe wall is capable of accommodating the axial loadings/stresses.

It is important to consider the ability of the remaining wall thickness to accommodate the imposed axial loadings/stresses. It is assumed that in cases involving external metal loss the repair action itself will prevent any further deterioration. In situations where the



continuation of internal metal loss can not be prevented it will be necessary to consider the suitability of the repair component to accommodate these loadings/stresses should this continuing metal loss affect the pipe's ability to carry these loadings/stresses.

The case of leaking flanges has not been covered by the above table. The choice of using a 'outside diameter type' repair enclosure or an enclosure type repair component sealing on the adjacent pipe sections (totally enclosing the flange assembly), will depend on several factors.

These factors will include, for example, the ability to seal a large leak (sealing at the flange bolt holes) using an 'outside diameter' repair enclosure, and the amount of space that is available (the enclosure type flange repair component takes up a considerable amount of space).

5.2 APPLICABILITY TO REPAIRS ON SAFETY CRITICAL SYSTEMS

When considering the applicability of the different repair components to repair scenarios involving critical piping systems, high performance and reliability are of prime importance. For example, the Offshore Installations and Wells (Design and Construction, etc) Regulations 1996, are concerned with the integrity of an offshore installation including structures, wells and process plant. Any structure, plant, equipment, system (including computer software) or component part whose failure could cause or contribute substantially to a major accident is deemed to be 'safety critical'.

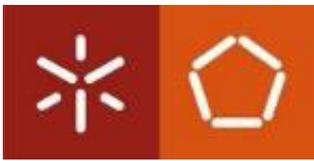
This may include hydrocarbon containment systems that must be demonstrated, through a written scheme of verification, to be suitable for their intended purpose and to remain in good repair and condition.

For safety critical piping systems the repair philosophy should, therefore, be:

- ☒ replace like-for-like;
- ☒ temporary repair until replacement can be carried out;
- ☒ permanent repair *only* where replacement is not practical.

This approach is in line with the principles of *prevention* as outlined in the Guidance to the Management of Health and Safety at Work Regulations 1999, SI No. 3242 – in particular the principle of “control risks at source, rather than taking palliative measures” is relevant.

On many offshore installations, safety critical systems may include hydrocarbon flow-lines or critical cooling pipework. Repairs afforded to such pipework, using repair clamps or connectors, need to be not only of sufficient integrity and reliability for the normal operating



conditions, but also need to be capable of withstanding other perceivable conditions, such as up-set conditions and emergencies. Some systems may need to retain their integrity under such threats as direct fire attack.

The most common form of mechanical pipe repair clamp or connector is the 'stand-off' clamp/connector. These repair components invariably utilise a set of elastomeric seals which, when subject to external fire loading, may fail. The epoxy-filled sleeve repair technique, discussed earlier in this document, should not be used in situations where external fire loading of the epoxy-filled sleeve could occur. Careful consideration would, therefore, need to be given to the selection of an appropriate repair solution for such piping systems.

For topside applications, the subject of pipework integrity under conditions of fire loading has been addressed by a number of pipe *connector* manufacturers. Many of the available designs incorporate high performance metal/graphite sealing systems thus providing a fire-safe pipe connector. These connectors have achieved full Type approvals from Certifying Authorities such as DNV and Lloyd's Register.