

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM MÉTODO DE
RESTAURAÇÃO DE DUTOS UTILIZANDO
MATERIAIS COMPOSTOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

GILSON SIMÕES PORCIÚNCULA

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM MÉTODO DE RESTAURAÇÃO
DE DUTOS UTILIZANDO MATERIAIS COMPOSTOS**

GILSON SIMÕES PORCIÚNCULA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ANÁLISE E PROJETO MECÂNICO

sendo aprovada em sua forma final.

**Prof. José Carlos Pereira, Dr. Eng.
Orientador**

**Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do Curso**

Banca Examinadora

**Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr. Eng.
Presidente**

Prof. Edison da Rosa, Dr. Eng.

Prof. Altamir Dias, Dr. Eng.

*Did you hear about the rose that grew from concrete?
Proving nature's law is wrong it learned to walk witho
Funny it seems, but by heeping it's dreams, it learned
Long live the rose that grew from concrete when no one.*

Tupac Amaru Shakur

*“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar. É melhor tentar,
ainda que em vão; que sentar-se fazendo nada até o final. Prefiro na chuva
caminhar que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz embora louco,
que em conformidade viver.”*

Martin Lutter King

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

Pedro Porciúncula e Francelina Simões Porciúncula;

A minha esposa Gislaine Mullet Andrades;

**Aos meus irmãos Maria Cleni, Santo Henrique, Sirlei, Cleuza,
Maria de Lourdes, Francisca Cleodir, Maria Elizabete, Pedro Roberto,
Ana Cristina e seus respectivos conjugues, filhos e netos**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que sempre me guiou, me proporcionando força e sabedoria durante toda minha vida, assim como, no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de aperfeiçoamento de meus conhecimentos.

A CAPES pela bolsa fornecida e incentivo ao desenvolvimento da pesquisa acadêmica.

Aos professores e ao orientador pelo ensinamento, ao bolsista Fabio Brasiliense pelo auxílio no desenvolvimento dos modelos.

Aos meus familiares e amigos de Pelotas e as novas amizades conquistadas em Florianópolis durante este período.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE TABELAS | xi |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | xii |
| RESUMO..... | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO | 1 |
| 1.1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.2 PROPOSTA DE TRABALHO..... | 5 |
| CAPÍTULO 2 - ASPECTOS GERAIS | 7 |
| 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.2 ESTADO DA ARTE..... | 12 |
| CAPÍTULO 3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MATERIAIS COMPOSTOS..... | 18 |
| 3.1 DEFINIÇÃO | 18 |
| 3.2 COMPONENTES CONSTITUINTES DE UM MATERIAL COMPOSTO..... | 18 |
| 3.2.1 FIBRAS | 18 |
| 3.2.2 MATRIZES | 18 |
| 3.3 INTERESSE NOS MATERIAIS COMPOSTOS | 19 |
| 3.4 APLICAÇÕES DOS MATERIAIS COMPOSTOS..... | 20 |
| 3.5 PROPRIEDADES DA MISTURA FIBRA/MATRIZ..... | 22 |
| 3.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS DE MATERIAIS COMPOSTOS | 23 |
| 3.6.1 BOBINAMENTO CIRCUNFERENCIAL..... | 25 |
| 3.6.2 BOBINAMENTO HELICOIDAL | 26 |

| | |
|---|----|
| 3.6.3 BOBINAMENTO POLAR..... | 27 |
| CAPÍTULO 4 - FASES DE PROJETO DO DRD..... | 28 |
| 4.1 INTRODUÇÃO..... | 28 |
| 4.2 PROJETO INFORMACIONAL..... | 29 |
| 4.2.1 ATRIBUTOS DE PROJETO..... | 29 |
| 4.2.2 NECESSIDADES DOS CLIENTES..... | 33 |
| 4.2.3 REQUISITOS DO USUÁRIO..... | 35 |
| 4.2.4 REQUISITOS DE PROJETO..... | 35 |
| 4.2.5 ESTABELECIMENTO DAS ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO – CASA DA QUALIDADE..... | 37 |
| 4.3 PROJETO CONCEITUAL..... | 42 |
| 4.3.1 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO PRODUTO..... | 42 |
| 4.3.2 GERAÇÃO DA CONCEPÇÃO – MATRIZ MORFOLÓGICA..... | 47 |
| 4.3.3 DEFINIÇÃO DOS SUBCONJUNTOS DO DRD..... | 54 |
| 4.3.4 CONCEPÇÃO DO PRODUTO..... | 57 |
| 4.4 PROJETO PRELIMINAR..... | 60 |
| 4.4.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO PROTÓTIPO DO DRD..... | 60 |
| CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO TÉCNICA DO DRD..... | 71 |
| 5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DO DRD..... | 71 |
| 5.1.1 AVALIAÇÃO DO SUBMODELO 1..... | 72 |
| 5.1.2 AVALIAÇÃO DO SUBMODELO 2..... | 75 |
| 5.1.3 AVALIAÇÃO DO SUBMODELO 3..... | 81 |
| 5.2 AVALIAÇÃO DO MECANISMO DO DRD..... | 85 |
| 5.3 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR DO DRD..... | 91 |
| 5.3.1 ANÁLISE DE TORQUE E POTÊNCIA DO DRD NA POSIÇÃO HORIZONTAL..... | 95 |
| 5.3.2 ANÁLISE DE TORQUE E POTÊNCIA DO DRD NA POSIÇÃO INCLINADA | 96 |
| 5.4 AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO FINAL DO DRD..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| 6 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS | 102 |
| 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 104 |
| ANEXOS | 115 |
| ANEXO I – QUESTIONÁRIO APLICADO PARA LEVANTAR AS NECESSIDADES DOS CLIENTES | 109 |
| ANEXO II – PROPRIEDADE FÍSICAS DOS MATERIAIS COMPOSTOS..... | 115 |
| ANEXO III – CÁLCULOS AUXILIARES NA AVALIAÇÃO TÉCNICA DO DRD..... | 117 |
| ANEXO IV – CÁLCULO DA MASSA DO MATERIAL COMPOSTO | 121 |
| ANEXO V – ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR..... | 122 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Aplicação automática da fibra de carbono em pilar de concreto, XXsys Technologies, Inc. (2000)..... | 12 |
| Figura 3.1 - Tecido padrão 1, Berthelot (1992)..... | 19 |
| Figura 3.2 - Manta (fibras contínuas ou cortadas), Berthelot (1992). | 19 |
| Figura 3.3 - Sistema de eixos de ortotropia, Gay (19987)..... | 22 |
| Figura 3.4 – Seqüência básica do processo de deposição do material composto, Gay (1987)..... | 24 |
| Figura 3.5 - Bobinamento circunferencial, Berthelot (1992). | 25 |
| Figura 3.6 - Bobinamento helicoidal, Berthelot (1992). | 26 |
| Figura 3.7 - Bobinamento helicoidal contínuo, Berthelot (1992)..... | 26 |
| Figura 3.8 - Bobinamento polar, Berthelot (1992). | 27 |
| Figura 4.1 – Esquema explicativo da Casa da Qualidade, Back e Forcellini (1999). 38 | |
| Figura 4.2 – Casa da Qualidade..... | 39 |
| Figura 4.3 – Função global do DRD | 43 |
| Figura 4.4 – Estrutura funcional alternativa I..... | 44 |
| Figura 4.5 – Estrutura funcional alternativa II..... | 45 |
| Figura 4.6 – Estrutura funcional alternativa III..... | 45 |
| Figura 4.7 – Concepção da alternativa I..... | 53 |
| Figura 4.8 – Concepção da alternativa IV | 54 |
| Figura 4.9 – Subconjunto sistema de fixação..... | 55 |
| Figura 4.10 – Representação do sistema de acionamento. | 55 |
| Figura 4.11 – Subconjunto carro bobinador. | 56 |
| Figura 4.12 – Subconjunto sistema de transformação de movimento..... | 57 |
| Figura 4.13 – Concepção do DRD – vista de frente. | 58 |
| Figura 4.14 – Concepção do DRD – vista de trás. | 58 |
| Figura 4.15 – Base dos eixos | 62 |
| Figura 4.16 – (a) Cremalheira circular aberta, (b) Cremalheira circular fechada..... | 63 |
| Figura 4.17 - Detalhe da articulação da cremalheira circular bipartida, (a) Detalhe da articulação, (b) Detalhe da abertura, (c) Detalhe do encaixe | 63 |
| Figura 4.18 – Eixo sincronizador | 64 |
| Figura 4.19 - Vista explodida esquerda do carro bobinador detalhado | 65 |
| Figura 4.20 - Detalhe do reservatório do carro bobinador..... | 66 |
| Figura 4.21 – (a) suporte de fixação, (b) suporte de fixação – vista explodida | 67 |
| Figura 4.22 – Roda guia..... | 68 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.23 – (a) base móvel do carro bobinador detalhada (b) vista explodida da base móvel do carro bobinador | 69 |
| Figura 4.24 - Detalhe do pino guia | 69 |
| Figura 4.25 – Base de suporte do motor | 70 |
| Figura 5.1 – Divisão do modelo do dispositivo em submodelos | 72 |
| Figura 5.2 – Submodelo 1 utilizado na aferição do modelo do DRD | 73 |
| Figura 5.3 – Submodelo 2 utilizado na aferição do modelo do DRD | 76 |
| Figura 5.4 – Diâmetros primitivos das engrenagens do submodelo 2 | 77 |
| Figura 5.5 – Representação dos torques atuantes no submodelo 2 | 78 |
| Figura 5.6 – Evolução do torque T_A no submodelo 2 | 78 |
| Figura 5.7 – Posições da engrenagem 1 nos diferentes estágios analisados | 79 |
| Figura 5.8 – Evolução do torque reativo T_A no submodelo 2 | 80 |
| Figura 5.9 – Evolução do torque reativo T_B no submodelo 2 | 81 |
| Figura 5.10 – Submodelo 3 utilizado na aferição do modelo do DRD | 82 |
| Figura 5.11 - Forças na superfície da parede da ranhura | 83 |
| Figura 5.12 - Evolução do torque T_e no eixo sincronizador | 84 |
| Figura 5.13 - Evolução do torque T_1 na engrenagem motora 1 | 85 |
| Figura 5.14 – Representação geométrica do raio livre | 86 |
| Figura 5.15 – Variação do ângulo de avanço no eixo sincronizador | 87 |
| Figura 5.16 – Representação das variáveis de análise | 88 |
| Figura 5.17 – Ângulo de avanço <i>versus</i> diâmetro da engrenagem do eixo sincronizador | 89 |
| Figura 5.18 – Raio livre <i>versus</i> diâmetro da engrenagem do eixo sincronizador | 90 |
| Figura 5.19 – Parâmetros geométricos do eixo sincronizador | 91 |
| Figura 5.20 – Evolução do torque na engrenagem motora (posição horizontal) | 95 |
| Figura 5.21 – Evolução da potência na engrenagem motora (posição horizontal) | 95 |
| Figura 5.22 - Evolução do torque na engrenagem motora (posição inclinada) | 96 |
| Figura 5.23 - Evolução da potência na engrenagem motora (posição inclinada) | 97 |
| Figura 5.24 – Dimensões limites do DRD | 99 |
| Figura 5.25 – Comprimento de bobinamento do DRD | 99 |
| Tabela 5.3 - Custo de fabricação do DRD | 100 |
| Figura 5.26 – DRD em posição de instalação | 101 |
| Figura 5.27 – DRD na posição de início de operação | 101 |
| Figura III.1 - Representação gráfica da transmissão de forças | 117 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1.1 – Utilização dos transportes, Revista Brasil Energia (2000)..... | 2 |
| Tabela 1.2 – Custo dos transporte, Revista Brasil Energia (2000)..... | 2 |
| Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas da fibra/matriz (matriz epóxi 60% de fibra), Gay (1987). | 23 |
| Tabela 4.1 – Características de fitas de fibras disponíveis no mercado, Texiglass (2001)..... | 31 |
| Tabela 4.2 – Lista de empresas consultadas para obtenção das necessidades..... | 35 |
| Tabela 4.3 - Lista de necessidades e requisitos do usuário..... | 36 |
| Tabela 4.4 – Definição dos requisitos de projeto..... | 37 |
| Tabela 4.5 – Especificações do projeto..... | 41 |
| Tabela 4.6 – Matriz de decisão de seleção da estrutura funcional..... | 46 |
| Tabela 4.7 – Tabela de listagem dos princípios de solução..... | 48 |
| Tabela 4.8 – Matriz morfológica para o DRD | 49 |
| Tabela 4.9 – Tabela da concepções alternativas | 51 |
| Tabela 4.10 – Matriz de decisão das alternativas de concepção..... | 52 |
| Tabela 5.1 – Ângulo de avanço do eixo sincronizador..... | 88 |
| Tabela 5.2 – Descrição das características dos componentes do DRD..... | 93 |
| Tabela 5.3 - Custo de fabricação do DRD..... | 100 |

LISTA DE SÍMBOLOS

- d – Diâmetro externo
 dc_1 - Distância entre centro da cremalheira circular e a engrenagem da cremalheira circular.
 dc_2 - Distância entre centro das engrenagens dos eixos sincronizador e propulsor
 d_{ec} - Diâmetro da engrenagem da cremalheira circular
 d_{es} – Diâmetro da engrenagem do eixo sincronizador
 F_a – Força de arrasto do carro bobinador
 F_c - Força centrífuga
 FE – Função elementar
 FG – Função global
 FP – Função parcial
 F_p - Força peso
 F_t - Força tangencial
 L – Comprimento
 M – Módulo
 n – Número da engrenagem
 N - Reação normal à parede do sulco
 P - Força do pino sobre a parede do sulco
 p_z - Passo da ranhura do eixo sincronizador
 R - Raio primitivo
 R_{es} - Raio da engrenagem do eixo sincronizador
 R_l - Raio livre
 T – Torque
 T_A - Torque em relação à A
 T_B - Torque em relação à B
 T_e - Torque no eixo sincronizador
 T_{Rn} - Torque reativo na engrenagem n
 W_n – Velocidade angular da engrenagem n
 W_{nm} – Velocidade angular da engrenagem n em relação à engrenagem m
 Z_n – Numero de dentes da engrenagem n
 β - Ângulo de hélice do eixo sincronizador
 λ - Ângulo de avanço do eixo sincronizador
 μ - Coeficiente de atrito

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade de um método de restauração de elementos tubulares utilizando materiais compostos, a partir da análise do comportamento mecânico de um equipamento concebido para esta finalidade. Este equipamento, denominado Dispositivo Restaurador de Dutos (DRD), emprega a técnica de bobinagem automática de fibras em material composto impregnadas em resina, de forma a resgatar a integridade estrutural e conseqüentemente aumentar a vida útil desses elementos.

O estudo da viabilidade desse método de restauração, a partir da análise do DRD, passa primeiramente por um levantamento de dados relacionados a problemas encontrados numa operação de manutenção de linhas de dutos, métodos de manutenção, regulamentações e novas tecnologias aplicadas à área de manutenção de dutos, para depois apresentar a proposta de projeto de um dispositivo para restauração de dutos utilizando materiais compostos. Em seguida, metodologias de projeto são aplicadas de forma a definir uma configuração do dispositivo que melhor atenda às necessidades dos potenciais clientes do DRD. Finalmente, modelos geométricos em 3D são construídos de forma a validar os mecanismos do DRD em termos de transmissão de velocidade de rotação, torque e aspectos geométricos do dispositivo eliminando interferências e obtendo o sincronismo entre os mecanismos do DRD e a deposição de fibra impregnada.

Definida as características geométricas e de comportamento mecânico do DRD foi possível verificar a viabilidade da utilização do método de reabilitação de dutos deteriorados através de deposição automática de fibra em material composto impregnada em resina.

Espera-se a partir desse estudo, poder evidenciar o potencial da aplicação dos materiais compostos em restauração de elementos tubulares, devido às suas propriedades mecânicas e à sua flexibilidade, o que pode tornar o processo de restauração automático e, conseqüentemente, mais rápido e menos caro. O campo de aplicação deste equipamento deverá compreender os oleodutos, gasodutos, adutoras, redes de incêndio, tubulações industriais enterradas, minerodutos e outros.

ABSTRACT

This work has the objective of study the viability of a method of restoration tubular elements using composite materials, by analyzing the mechanical behavior of an equipment specially conceived for this purpose. This equipment, so-called *Dispositivo Restaurador de Dutos* (DRD), make use of the technique of automatic winding of fibers in composite materials impregnated in resin, in order to rescue the structural integrity and consequently, to increase the useful life of these elements.

The study of the viability of this method of restoration, from the analysis of the DRD, firstly passes by a data-collecting of the problems found in a maintenance operation of lines of tubes, methods of maintenance, regulations and new technologies applied in the area of maintenance of tubes. After that, a preliminary project proposal of the device to restore tubes using composite materials, is presented and project methodologies are applied to define a configuration of the device that better fits the necessities of the potential customers of the DRD. Further, 3D geometric models of the mechanisms of subsystems of the DRD are constructed to validate torque transmissions and rotational speeds between its components and geometric aspects of the device eliminating interference and getting the synchronism enter the mechanisms of the DRD and the impregnated fiber deposition..

After the definition of the geometric characteristics and the mechanical behavior of the DRD it was possible to verify the viability of the use of the method of restoration of spoiled tubes by using automatic deposition of the composite material over the tube surface.

One expects through this study, to be able to evidence the potential of the application of the composite materials in restoration tubular elements, due to its mechanical properties and flexibility, that can make the process of restoration automatic and, consequently, faster and less expensive. The field of the application of this equipment include pipe-lines, gas-lines, embedded industrial tubing's, ore-lines, and others.

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 INTRODUÇÃO

Os dutos já eram utilizados como meio de transporte de fluidos desde a Antiguidade. Os chineses utilizavam os bambus, os egípcios e os astecas utilizavam os dutos em materiais cerâmicos e, os gregos e romanos utilizavam dutos de chumbo. Numa época mais recente, com o crescimento dos centros urbanos, principalmente após a revolução industrial, suscitou-se o desenvolvimento dos meios de comunicação e de redes de serviços, como de água, esgoto, e drenagem, obras que fazem uso intensivo de estruturas enterradas. Atualmente, outros tipos de serviços foram desenvolvidos, como a distribuição de gás, de petróleo, as redes telefônicas e de transmissão de dados.

O crescente desenvolvimento das cidades, a integração de países vizinhos e os acordos energéticos firmados entre os mesmos, caracterizam uma forte tendência de investimentos em obras de grande magnitude, como a do Gasoduto Bolívia - Brasil, impulsionando a busca de avaliações mais coerentes e precisas por parte da engenharia na área de transporte de energia percorrendo grandes distâncias. As redes de transporte de gás ou de óleo feitas através de dutos, normalmente atravessam grandes extensões, e por isso sua construção depara-se com diversos problemas como irregularidade dos terrenos, formação não homogênea do solo, travessia de rios, etc.

A utilização das técnicas modernas de projetos dutoviários iniciou efetivamente no Brasil por volta de 1964, com a construção do oleoduto Rio-Belo Horizonte (ORBEL), da PETROBRAS. A partir desta data, ocorreram no Brasil períodos de grande desenvolvimento nesta área de transporte, as técnicas de construção e proteção se alastraram para instalações metálicas enterradas ou submersas pelo país, tais como oleodutos, gasodutos, adutoras, redes de incêndio, tubulações industriais enterradas, minerodutos, emissários submarinos, plataformas de petróleo, tanques de armazenamento e outros.

Os rápidos avanços da informática também contribuíram para um grande impulso nos sistemas de controle e de aquisição de dados para projetos, instalação e recuperação de oleodutos e gasodutos, permitindo o acompanhamento e a

supervisão das operações em tempo real. A informática possibilitou ainda, a utilização de várias simulações de condições operacionais, concorrendo não só para uma melhor qualidade do projeto, mas também para a redução do prazo de sua execução.

Atualmente, em todo o mundo, a utilização de condutos enterrados tem crescido. Isso se deve, principalmente, ao menor custo das tubulações, às facilidades de transporte e de instalação. Ao lado desta crescente utilização, as técnicas construtivas, os critérios de projeto e os processos de fabricação e manutenção dos condutos vêm também sendo particularmente aperfeiçoados. No Brasil, no entanto, os dutos ainda são o meio de transporte de derivados menos utilizados, com cerca de 14% da movimentação. Mercados mais maduros tendem a usar cerca de três vezes mais o transporte dutoviário. Nos Estados Unidos, segundo o Departamento de Transporte, o transporte utilizado para a distribuição de produtos derivados são feitos de acordo com dados apresentados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Utilização dos transportes, Revista Brasil Energia (2000)

| Tipo de transporte | Utilização |
|---------------------------|-------------------|
| Polidutos | 58,6% |
| Hidrovia | 32,2% |
| Rodovia | 5,8% |
| Ferrovia | 3,3% |

Uma comparação feita entre custos de transporte dos diversos modais, a partir do mercado norte-americano, revela que, guardadas as devidas proporções, o transporte rodoviário é o mais caro, como apresentado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Custo dos transporte, Revista Brasil Energia (2000).

| Tipo de transporte | Custo (Índice de 100%) |
|---------------------------|-------------------------------|
| Rodovia | 100% |
| Ferrovia | 28% |
| Dutovia | 8% |
| Barcaças | 7,7% |
| Navios | 4,5% |

No Brasil, enquanto o livre acesso e sua tarifação ainda não forem regulamentados, a comparação tem níveis parecidos.

O aço tem sido tradicionalmente o material escolhido pela maioria dos operadores de linhas de duto por causa da sua alta resistência, da sua aplicação versátil e da facilidade de instalação em todos locais e em quaisquer condições. Frequentemente, o grande custo de um sistema de dutos não é o custo do duto, mas o custo da preparação, escavação, fundação, instalação da linha, aterro e restauração. A restauração *in loco*, tema deste trabalho, tem sido objeto de pesquisa nestes últimos anos, visando diminuir os custos agregados nas linhas de dutos. A restauração *in loco* tem algumas vantagens em relação a outros métodos utilizados para viabilizar o funcionamento das linhas, como:

- ✓ Redução do tempo de manutenção;
- ✓ Escavação limitada à área de assentamento do duto;
- ✓ Diminuição do tempo de interrupção do tráfego local;
- ✓ Ininterrupção do fluxo do produto durante a manutenção;
- ✓ Redução do custo de manutenção da linha.

A introdução dos materiais compostos em operações de reabilitação de dutos ressaltou ainda mais essas vantagens, tendo em vista suas características mecânicas e a facilidade de transporte e de instalação desses materiais. No entanto, a técnica de reabilitação de dutos *in loco* usando materiais compostos precisa ser aperfeiçoada para que seja totalmente viável. O aperfeiçoamento da técnica deve estar associado ao melhoramento dos materiais utilizados na reabilitação, assim como o desenvolvimento de equipamentos de deposição desses materiais, para que o processo de reabilitação seja o mais rápido possível e com maior segurança para a operação da linha, tornando a reabilitação *in loco*, uma solução segura e economicamente viável.

Assim sendo, este trabalho visa conceber e estudar a viabilidade técnica de um dispositivo para a reabilitação de dutos deteriorados que utiliza a técnica da bobinagem automática de fibras impregnadas em resina. A configuração de um dispositivo concebida para a mesma finalidade, foi patenteada pelo professor José Carlos Pereira do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, Pereira (2001).

A apresentação deste trabalho é feita em cinco capítulos. Nos dois primeiros capítulos, faz-se uma introdução do assunto a ser abordado e apresenta-se o objetivo do trabalho, para em seguida, através de uma revisão bibliográfica e de

um estudo sobre o estado da arte, levantar todos os aspectos sobre a reabilitação de dutos: métodos, materiais, novas técnicas, perspectivas, etc.

No Capítulo 3, são apresentadas algumas definições sobre materiais compostos, evidenciando suas características e vantagens sobre os materiais convencionais, além de citar os diferentes campos de aplicação desses materiais. São apresentados também nesse capítulo, alguns processos de fabricação de peças de revolução em material composto, através dos quais pode-se identificar o processo utilizado no dispositivo em questão.

No Capítulo 4, a partir de um estudo sistemático feito junto às empresas envolvidas de alguma forma na reabilitação de dutos, propõe-se aplicar metodologias de projeto, de maneira a estabelecer uma configuração do dispositivo restaurador de dutos, compatível com o que foi proposta em Pereira (2001).

No Capítulo 5, pretende-se avaliar o mecanismo da configuração do dispositivo, proposta anteriormente através de modelos geométricos, de forma a verificar a sua funcionalidade, observando aspectos como sincronismo, transmissão de velocidades angulares e torques, para a partir desses dados, poder-se especificar alguns de seus componentes.

O trabalho é concluído com considerações sobre os resultados obtidos da análise funcional do DRD e com as perspectivas do emprego deste novo método em processos de restauração de dutos.

1.2 PROPOSTA DE TRABALHO

As vantagens técnicas dos materiais compostos sob os materiais convencionais, demonstram que esses materiais tendem a ganhar mais espaço em projetos de reabilitação de dutos, devido a sua capacidade de utilização, seu desempenho e sua flexibilidade. No entanto, para que a técnica de reabilitação de dutos, através da deposição de material composto sobre a superfície do duto seja totalmente viável, é necessário que o equipamento de deposição *in loco* desempenhe sua função adequadamente e que conseqüentemente, as operações de reabilitação de dutos sejam cada vez mais rápidas, menos custosas, tenham maior segurança e que ofereçam maior garantia de serviço com relação aos métodos tradicionais.

Assim, a proposta deste trabalho é estudar a viabilidade de um novo método de reparos de dutos deteriorados utilizando materiais compostos bobinados, através da análise de funcionalidade de um dispositivo concebido para essa finalidade. Este dispositivo, que será chamado de Dispositivo Restaurador de Dutos (DRD), deverá efetuar a deposição automática de fibra em material composto impregnada em resina no duto deteriorado, de maneira a garantir a integridade estrutural e conseqüentemente aumentar a vida útil do duto. O DRD deverá ter fácil manuseio e ter rápida montagem, de forma a reduzir o tempo de reabilitação dos dutos e conseqüentemente, reduzir os custos de manutenção dos mesmos.

Numa abordagem inicial, pretende-se através de uma revisão bibliográfica e de uma pesquisa realizada com empresas envolvidas com reparos de dutos, levantar informações que sirvam como balizadores para a concepção de um dispositivo que atenda às necessidades dos seus usuários. Para chegar-se a uma configuração do dispositivo, pretende-se aplicar uma metodologia de projeto, a qual é dividida em três fases clássicas: projeto informacional, projeto conceitual e projeto preliminar, dentro das quais são utilizadas ferramentas da área de desenvolvimento de produto tais como Casa da Qualidade, matrizes de decisão, matriz morfológica, etc.

Uma vez definido a configuração final do dispositivo, será gerado um modelo geométrico do dispositivo, modelo esse que será validado através de submodelos geométricos semelhantes aos subsistemas do modelo completo. Os submodelos serão simulados em um software de simulação de mecanismos, de

forma a validar o modelo completo do dispositivo. Uma vez validado o modelo completo do dispositivo será analisada a funcionalidade do dispositivo em termos de interferência, sincronismos entre seus componentes, transmissão de torques e de velocidades de rotação, para finalmente poder-se obter as características dos seus acionadores.

A conclusão do trabalho será feita através da avaliação dos resultados obtidos com relação aos objetivos traçados nas especificações de projeto.

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS GERAIS

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os maiores problemas enfrentados por companhias de transporte de fluidos (óleo cru, gás, produtos refinados, água salgada, água potável, etc.) estão relacionados à reabilitação de suas linhas de dutos. A corrosão e a flambagem da parede do duto são fatores importantes a serem considerados quando da elaboração de planos de reabilitação de uma linha de dutos. A corrosão externa de um duto está principalmente relacionada às características físico-químicas do local de instalação do duto, como a baixa resistência e a alta alcalinidade do solo, enquanto que, a corrosão interna do duto está relacionada às características do fluido transportado, Toutanji e Dempsey (2001). A flambagem da parede do duto ocorre devido a ação de cargas externas, causadas pelo aumento da pressão do solo (movimentação do solo, tráfego sobre os dutos), bem como pela diminuição repentina da pressão interna do duto, e devido ao tráfego sobre os dutos enterrados, Chunduru et al. (1996). Outros fatores como a armazenagem, o transporte e a instalação podem também causar danos em dutos.

Um revestimento aplicado à superfície do duto ajuda a controlar a corrosão do duto, de maneira a formar uma barreira entre a superfície do duto e o ambiente, interno ou externo. Internamente, pode-se aplicar camadas protetoras, chamadas *liners*, podendo ser em polietileno ou em poliamida, Churundu et al. (1996), Slack (1992) e Lebsack and Dorwin (1998). Externamente, é necessária também uma proteção catódica (CP), a qual protege o duto pelo fornecimento de um potencial negativo à sua superfície, Kuruvila (1993), pelo fato de que todos os revestimentos orgânicos serem semipermeáveis ao oxigênio e a água. Sendo assim, apenas esse tipo de proteção não pode prevenir a corrosão de dutos enterrados.

A perda local de espessura e o vazamento de fluido são problemas comumente encontrados em dutos enterrados, geralmente devido à corrosão externa. Uma maneira muito utilizada para reparar vazamentos era substituir o trecho danificado do duto. A substituição do trecho danificado do duto exige a parada do fluxo do produto, o que pode provocar o desabastecimento dos usuários em linhas onde o fluxo não pode ser desviado. Um método alternativo bastante

utilizado para evitar a interrupção do fluxo do produto é o encamisamento, seja como uma reparação temporária, seja como permanente, Otegui et al. (2000). Este método que reabilita o duto no local de sua instalação, por isso chamado *in loco*, consiste em superpor duas luvas metálicas, que são soldadas longitudinalmente e circunferencialmente, dependendo do tipo de problema constatado.

Métodos de reabilitação de dutos *in loco*, têm se tornado cada vez mais interessantes, uma vez que são mais econômicos que a substituição do duto, Kuruvila (1993). Porém, no método por encamisamento com luvas metálicas, a soldagem em campo é uma tarefa difícil de ser realizada. Geralmente, em solos deficientes e em condições climáticas desfavoráveis, manipular e soldar as luvas em dutos enterrados requer equipamentos e pessoas treinadas. Por esse motivo, falhas como fissura e fratura no cordão de solda longitudinal e, vazamento de gás no cordão de solda circunferencial, são freqüentemente encontrados.

Devido às incertezas dos métodos de reabilitação existentes atualmente, há uma necessidade em desenvolver métodos mais rápidos e menos custosos para reparar dutos. Esta necessidade faz ressaltar a potencialidade do uso dos materiais compostos, devido principalmente a seu peso, durabilidade, resistência à ruptura e à corrosão. Além disso, o fato dos materiais compostos não serem eletricamente condutores e serem resistentes ao impacto, pode ser relevante em algumas aplicações, Toutanji (1999).

Dois técnicas podem ser utilizadas para a aplicação do material composto sobre a área da superfície deteriorada do duto. Na primeira, aplica-se uma seção de material composto pré-impregnado (tecido ou placa laminada), para o caso de áreas pequenas e com uma forma simples. No segundo, indicado para áreas maiores e mais complexas, ou onde se exige uma alta adesão entre o revestimento e o duto, usa-se técnicas de processamento *in loco*. Ambas as técnicas exigem uma superfície limpa, seca e com uma temperatura de aproximadamente 18 °C (ver Fortner 1999). As máquinas para reabilitação de dutos utilizando materiais compostos se inserem nesta segunda técnica, as quais empregam o mesmo princípio de fabricação de peças de revolução, com a diferença que, o eixo sobre o qual seriam bobinadas as fibras impregnadas ficaria fixo, enquanto que o reservatório de resina e o carretel de fibra seria rotativo (ver § 3.3). Estas máquinas podem aplicar uma pré-tensão na fibra de até 1500 N e podem depositar a fibra na superfície do duto a uma velocidade de até 60 m/min (ver Frassine 1997).

Com relação ao material de fabricação dos dutos, o aço tem sido tradicionalmente o material mais usado pelos operadores de linhas de dutos por causa de sua resistência mecânica, aplicação versátil e pela sua fácil instalação em, teoricamente, quaisquer condições do local. A necessidade de materiais mais resistentes à corrosão que o aço para dutos que transportam óleos, já tinha sido detectada há muito tempo, no entanto, poucos materiais combinavam propriedades como resistência à ruptura e à corrosão, com custo razoavelmente baixo para substituí-lo nesta aplicação. Neste contexto, os dutos em fibra de vidro (fiberglass piping – FRP) mostraram ser uma solução bastante interessante e muito econômica para resolver problemas de corrosão em oleodutos, Oswald (1996).

Os primeiros FRP começaram a ser produzidos comercialmente a partir da década de 40, mas somente a partir de 1964 é que este tipo de duto começou a ser usado em larga escala. Naquele momento, os dutos em FRP eram produzidos com diâmetros de no máximo 150 mm e trabalhavam a uma pressão de até 3 MPa. Para dutos com diâmetro acima deste valor, os dutos eram em aço revestido. Naquela época, processos de bobinamento foram desenvolvidos para tornar mais eficiente o uso das fibras de vidro. Os dutos podiam ser produzidos com as fibras tensionadas e orientados de forma a combinar a resistência a esforços circunferenciais e longitudinais em dutos pressurizados e flexionados.

Na instalação das linhas de dutos em fibra de vidro, alguns problemas podiam ocorrer nas uniões entre um trecho e outro de duto. A cura do material adesivo nestas regiões nem sempre era muito perfeita, pois um superaquecimento podia queimar o duto e um subaquecimento podia não completar o processo de cura. Este processo era portanto, muito dependente das condições climáticas do local de instalação do duto. Para contornar este tipo de problema, soluções do tipo cobertores elétricos colocados sobre as uniões foram desenvolvidas, de forma a haver um melhor controle sobre o processo de cura, Oswald (1996).

Atualmente, dutos em FRP podem ser encontrados na seguinte forma: diâmetro de até 100 mm para uma pressão de até 28 MPa, diâmetro de até 150 mm para uma pressão de até 20 MPa e diâmetro de até 200 mm a uma pressão de até 10 MPa. Dutos em FRP com diâmetros de 350 mm e 500 mm podem também ser encontrados, Oswald (1996).

Prevê-se que haverá uma tendência cada vez maior do uso de FRP para aplicações em linhas de duto onde se exige altíssimas pressões e grandes diâmetros, de forma que os problemas de corrosão em dutos sejam minimizados.

Linhas de dutos em FRP podem ser encontradas em várias partes do mundo: Malásia, Brunei, Emirados Árabes Unidos, Arábia Saudita, Canadá, Alaska, Texas, México e Brasil.

Outras aplicações mais recentes têm sido dada aos materiais compostos, como por exemplo, na restauração de obras na construção civil: lajes, pilares de pontes, tubulações, etc, Seible *et al.* (1996) e Karbhari *et al* (1998). Esta idéia surgiu na Califórnia, EUA, em meados da década de 90, onde sobre os elementos estruturais deteriorados por causa da corrosão, do desgaste e pela ação do meio-ambiente, eram adicionadas camadas de fibras unidirecionais impregnadas em resina. Esta solução garante uma sobre-vida ao elemento estrutural sem a interrupção prolongada da estrutura, reduzindo consideravelmente o custo e o tempo de manutenção.

Nos EUA, e mais especificamente na Universidade da Califórnia, San Diego (UCSD), têm-se pesquisado muito o desenvolvimento e a aplicação de materiais compostos avançados na recuperação e em novas construções a serem usadas na renovação da infra-estrutura de transporte como, Burgueño (1999):

- ✓ Desenvolvimento de técnicas de reforços para colunas de pontes de concreto;
- ✓ Telas laminadas de polímeros armados com fibras de carbono (FRP – Fiber Reinforced Polymers) para recuperação de tubulações de água;
- ✓ Desenvolvimento de novos sistemas estruturais avançados.

Os materiais compostos avançados desenvolvidos e utilizados até hoje, primordialmente na indústria aeroespacial e militar, oferecem características mecânicas e químicas únicas em termos de resistência mecânica, rigidez, durabilidade e aderência aos materiais estruturais convencionais, apresentando um grande potencial de aplicação em diversas técnicas de recuperação de infra-estruturas.

Apesar das tentativas passadas de introdução dos materiais compostos avançados, tais como materiais poliméricos armados com fibras de carbono, vidro ou aramida, ou materiais compostos poliméricos na recuperação de estruturas terem sido fracassadas devido a questões econômicas, os avanços recentes em processos novos e automatizados de fabricação, aliados à redução do custo dos materiais utilizados, podem tornar os materiais compostos avançados mais acessíveis, além de possibilitar o desenvolvimento de sistemas de recuperação competitivos em comparação com os de materiais convencionais.

A renovação da infra-estrutura, através da substituição de elementos ou sistemas estruturais completos, pode beneficiar-se com o uso destes novos materiais, desde que os seus custos elevados sejam compensados por inovações no projeto e nos processos construtivos, desenvolvidos especificamente para estes materiais. Vários desenvolvimentos têm favorecido este quadro nos últimos anos, Burgueño (1999):

- ✓ Os avanços na fabricação de materiais compostos poliméricos (PMC) por pultrusão, moldagem com transferência de resina e infusão de resina, fios em bobina e o processo automatizado ou semi-automatizado de fabricação de grandes componentes a custos bastante reduzidos;
- ✓ A demanda reduzida de materiais compostos reforçados com fibras de carbono ou aramida na indústria militar, a expansão do uso de fibras no mercado altamente competitivo da indústria de artigos esportivos e as perspectivas de utilização no setor civil levaram a uma redução no custo de fabricação;
- ✓ Projeto de sistemas estruturais constituídos destes novos materiais, juntamente com materiais estruturais convencionais, ao invés da substituição individual dos componentes ou projetos completos em materiais compostos avançados, demonstraram que estes novos materiais podem ser tecnicamente eficientes e, ao mesmo tempo, economicamente competitivos.

Na Universidade da Califórnia, San Diego (UCSD), foram feitos ensaios experimentais em colunas de ponte de concreto utilizando a técnica do encamisamento com fibras de carbono. Ensaios experimentais em colunas de pontes em escala 1:25 mostraram que o reforço com encamisamento de fibra de carbono pode ser tão eficaz quanto o reforço com encamisamento metálico, método mais freqüentemente utilizado. Neste método, no entanto, é necessária uma grande mobilização de mão de obra, assim como de equipamentos robustos para movimentar o pesado reforço metálico, necessitando freqüentemente da interrupção do tráfego por várias horas. A camisa de carbono, por sua vez, é instalada usando-se uma máquina de bobinamento automática que coloca 6 fios de carbono *prepreg* a uma velocidade de até 40 rpm sobre a coluna, Figura 1.1. As vantagens da instalação automática com encamisamento de carbono são a velocidade de aplicação, incluindo a cura controlada, chegando a ser aproximadamente um quarto do tempo de instalação para encamisamento metálico equivalente, e a confecção da camisa quanto à sua espessura e orientação das fibras, o que permite explorar o potencial de utilização do material de fibra de carbono.



Figura 1.1 – Aplicação automática da fibra de carbono em pilar de concreto, XXsys Technologies, Inc. (2000)

Com o processo automático de aplicação das camadas de fibras, que pode ser até mesmo aplicado em colunas retangulares, o encamisamento com fibras de carbono pode tornar-se economicamente competitivo em relação ao do aço.

O desenvolvimento de novos conceitos estruturais e sistemas, que combinam as características mecânicas superiores de resistência à tração na direção das fibras do composto, com as características dominantes dos materiais convencionais, tais como a resistência à compressão do concreto, demonstra o grande potencial na recuperação de estruturas, tanto na engenharia civil como nas outras engenharias.

As vantagens técnicas demonstradas até o momento, mostram claramente que os materiais compostos avançados serão aplicados nos projetos futuros e na recuperação de estruturas de engenharia de uma forma geral. A extensão destas aplicações dependerá principalmente da automação continuada do processo de manufatura e do desenvolvimento e uso de materiais e processos construtivos com custos adequados, reduzindo assim o custo do produto final para um nível que seja competitivo em relação ao custo dos materiais convencionais.

2.2 ESTADO DA ARTE

Para se decidir se há ou não a necessidade de se reabilitar uma linha de dutos, dados sobre a integridade estrutural, as condições do revestimento e as condições da proteção catódica são necessários. Estes dados são importantes para

que o operador da linha de dutos decida sobre quando fazer a reparação e de que forma faze-la com a melhor relação custo/benefício.

A integridade estrutural deve ser normalmente o primeiro item a ser considerado num projeto de reabilitação de dutos. Se o duto não está estruturalmente perfeito, a aplicação do revestimento ou da proteção catódica não será uma solução de longo prazo. Se a reabilitação estrutural não é economicamente viável para a operação corrente, ela deverá ser substituída ou retirada. Essa decisão deve ser tomada não só do ponto de vista econômico como também do ponto de vista da segurança.

Os testes que são realizados para determinar a integridade estrutural incluem, Marshal (1998):

- ✓ Inspeção da linha (Smart Pig);
- ✓ Exame Bellhole;
- ✓ Hydrotesting.

O Smart Pig é uma ferramenta de inspeção interna da linha que identifica deformidades, amassamentos, degradação da parede do duto, etc. O exame Bellhole é uma inspeção visual das condições externas do duto. Os resultados de um Smart Pig podem indicar a melhor localização para o exame Bellhole. Somente as condições exteriores do duto são visíveis para a avaliação. O Hydrotesting revela todos pontos que podem falhar numa certa pressão teste, pressão essa que será a pressão final suportada pelo duto. Esse teste é útil para determinar qual a pressão suportada pelo duto antes da sua falha, informação esta que deve ser utilizada para avaliação da integridade global da estrutura, mas que no entanto, não detectará nenhuma possibilidade de falha futura.

O revestimento externo aumenta a resistência contra a corrosão e serve como uma barreira contra reagentes como o oxigênio e a água. Reduzindo o contato do metal com os reagentes, reduz-se a quantidade de proteção catódica necessária dada o aumento da resistência contra corrosão. Um revestimento deve ser unido ao duto e ser livre de vazios, já que uma união imperfeita do revestimento pode causar corrosão localizada.

O terceiro item a ser investigado é a adequação do sistema de proteção catódica. O método mais comum para a avaliação do sistema de proteção catódica adequado é a realização de um exame de intervalo fechado. Esse exame estima continuamente o potencial entre o duto e o solo, e fornece resultados que detalham o efeito da proteção catódica.

O método de reabilitação a ser aplicado numa linha de dutos é escolhido segundo o tipo de problema constatado numa inspeção. Parâmetros como material do duto, características de operação da linha de duto, configuração e localização da linha do duto e, natureza e extensão do defeito, devem também ser considerados na elaboração de um plano de reabilitação de dutos.

Vários são os métodos utilizados para reabilitar uma linha de dutos, Marshal (1998). Estes métodos vão desde a recuperação do sistema “proteção catódica-revestimento”, passando pelo encamisamento por luvas metálicas ou em material composto, indo até a substituição do trecho danificado do duto.

O sucesso de uma operação de recuperação do sistema “proteção catódica-revestimento” de dutos depende, da capacidade de fornecer os elétrons, onde e quando requerido. Existem alguns obstáculos para trabalhar com este método tais como, revestimentos frouxos e rochas submersas, os quais impedem o alcance dos elétrons à superfície do duto, podendo resultar em uma falha catastrófica do duto. Experiências nessa área confirmam que o mais econômico e seguro método de proteção contra corrosão de dutos enterrados é uma combinação de revestimento e proteção catódica. Mas o sucesso desse método depende principalmente da capacidade do revestimento vir a ser uma parte integrante do sistema “proteção catódica - revestimento”.

Historicamente pode-se citar uma grande variedade de métodos de reabilitação de dutos, estes podem ser definidos a partir do plano de manutenção que é gerenciado na linha em questão, assim como o tipo de defeito e produto que esta linha transporta. Entre os métodos mais utilizados pode se citar alguns mais utilizados, tais como:

- ✓ Remoção e substituição do segmento com defeito,
- ✓ Deposição de solda metal,
- ✓ Reforço através do encamisamento metálico,
- ✓ Aplicação de uma braçadeira ou luva sobre o defeito,
- ✓ Aplicação de um remendo parcial sobre o defeito,
- ✓ Remoção do defeito por *Hot Tapping*.

A) Remoção e substituição do segmento com defeito,

Neste método, a parte defeituosa do duto é removida e substituída. Nesse caso é necessário que a linha seja bloqueada e despressurizada, afetando o fluxo

do produto em seu seguimento e em suas derivações à jusante. O segmento com defeito é removido totalmente como um cilindro.

B) Deposição de solda metal

Este método de reparo em serviço é atrativo porque ele é simples e direto, e porque pode ser aplicado onde é impossível fazer um encamisamento metálico, como nos encaixes e em curvaturas da linha. No entanto, neste método deve ser considerado o perigo de explosão no caso de vazamento no defeito.

C) Aplicação de uma braçadeira ou luva sobre o defeito

Vários tipos de braçadeiras são oferecidos pelo mercado, e são normalmente projetadas para suportar pressão radial do duto. Essas braçadeiras são utilizadas largamente em linhas de dutos, mas são geralmente usadas para reparos temporários, até que o segmento com defeito possa ser removido.

D) Remoção do defeito por *hot tapping*.

Um defeito pode ser removido de uma linha em serviço por *hot tapping*. As restrições para esse tipo de reparo são as seguintes: primeiramente quando não se sabe a extensão do defeito, a pressão da linha deve ser reduzida para inspeção e reparo; segundo, no círculo de material a ser removido pela serra corte furo, deve estar contido todo o defeito; terceiro, o *hot tap* deverá ser propriamente projetado de forma a suportar todas as tensões que serão impostas.

E) Aplicação de um remendo parcial sobre o defeito

Antigamente, este método era muito utilizado para reparos de vazamento, mas pesquisas anteriores mostraram que esses tipos de reparos são muito sensíveis aos defeitos de fabricação e não deveriam ser aplicados em reparos com vazamento e em dutos linhas com altas pressões. Este remendo geralmente era fabricado para cobrir a metade da circunferência do duto e poderiam ter até 3m de comprimento

F) Reforço através do encamisamento metálico

O encamisamento metálico é um dos métodos mais utilizados para a restauração de linhas de dutos. Este método ainda é classificado em vários tipos diferentes de encamisamento, variando entre o tipo de defeito a ser restaurado e o tipo de fixação da luva sobre o duto. O mais utilizado é o encamisamento completo, com duas luvas metálicas soldadas no sentido longitudinal e circunferencial do duto.

Atualmente, se o grau de degradação da superfície do duto é intenso, havendo grande perda de espessura da parede do duto causada pela corrosão externa ou interna, a reabilitação do duto é feita por encamisamento metálico soldado longitudinalmente. Em casos onde houver vazamento de gás, a solda deve ser feita tanto longitudinalmente como circunferencialmente.

A possibilidade de reparar vazamento de gás através do reforço por encamisamento soldado, é provavelmente o mais importante avanço entre todos os outros métodos utilizados. Este método exige no entanto, equipamentos pesados e operadores treinados, e que, quando associados com condições climáticas desfavoráveis, podem gerar falhas de reparo com soldas, acarretando incidentes como fissura e fratura no cordão de solda longitudinal e vazamento de gás no cordão de solda circunferencial da camisa com o duto.

Com a necessidade constante do desenvolvimento de métodos para reabilitar dutos mais eficientes, mais rápidos e com baixo custo, os materiais compostos aparecem neste contexto como sendo uma boa opção, haja visto suas boas propriedades mecânicas e químicas, assim como sua flexibilidade em termos de transporte e aplicação. Atualmente, a reabilitação de dutos utilizando materiais compostos é bastante incipiente, pois não há ainda normas que regulamentam o seu uso.

O Departamento de Transporte dos USA (Department of Transportation's - DOT) e a Administração de Programas Especiais de Pesquisa (Research and Special Programs Administration – RSPA) fizeram mudanças nos padrões de segurança para reabilitação de dutos corroídos ou danificados utilizados em gasodutos de aço, e dutos que transportam líquidos perigosos. Essas mudanças permitiram uma maior flexibilidade dos métodos de reabilitação de dutos, de forma a baixar os custos e diminuir os desperdícios numa operação de reabilitação, oferecendo oportunidades para o desenvolvimento de novas tecnologias de reparos e, conseqüentemente, um mercado altamente competitivo em tecnologias de reabilitação poderá surgir. As regulamentações anteriores exigiam que um duto com imperfeições ou qualquer tipo de dano no duto que altere a capacidade de serviço da linha, deveria ser substituído ou reabilitado com o encamisamento em todo o seu diâmetro com uma luva metálica bipartida, e que, um duto que tenha sofrido corrosão generalizada, deveria ser substituído em vez de ser reabilitado, a menos que a corrosão estivesse limitada a uma pequena área.

Em pesquisa realizada pela Associação Americana de Gas (American Gas Association – AGA), estima-se que poderiam ser economizados 6,5 milhões de dólares por ano usando a técnica do recobrimento com materiais compostos para reparar dutos corroídos ou danificados, em vez de substituí-los ou encamisá-los. Já, o Instituto de Pesquisa em Gás (Gas Research Institute – GRI) estimou que o uso de materiais compostos na reparação de dutos economizaria de 8,5 a 11,5 milhões de dólares anuais para as indústrias de gás, Santon (1999).

CAPÍTULO 3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MATERIAIS COMPOSTOS

3.1 DEFINIÇÃO

Um material composto é formado pela união de dois materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de performance superior àquela de seus componentes tomados separadamente. O material resultante é um arranjo de fibras contínuas ou não, de um material resistente (reforço) que são unidos em uma matriz de resistência mecânica inferior às fibras.

3.2 COMPONENTES CONSTITUINTES DE UM MATERIAL COMPOSTO

3.2.1 Fibras

A fibra é o elemento constituinte que confere ao material composto suas características mecânicas: rigidez, resistência à ruptura, etc. As fibras podem ser curtas, injetadas no momento da moldagem da peça, ou longas e que são cortadas após a fabricação da peça.

Os tipos mais comuns de fibras são: vidro, aramida (kevlar), carbono, boro, etc. As fibras podem ser definidas como sendo unidirecionais, quando orientadas segundo uma mesma direção; bidimensionais, com as fibras orientadas segundo duas direções ortogonais (tecidos), Figura 3.1, ou com as fibras orientadas aleatoriamente (manta), Figura 3.2; e tridimensionais, quando as fibras são orientadas no espaço tridimensional (tecidos multidimensionais).

3.2.2 Matrizes

As matrizes têm como função principal, transferir as solicitações mecânicas às fibras e protegê-las do ambiente externo. As matrizes podem ser resinosas (poliéster, epóxi, etc), minerais (carbono) e metálicas (ligas de alumínio).

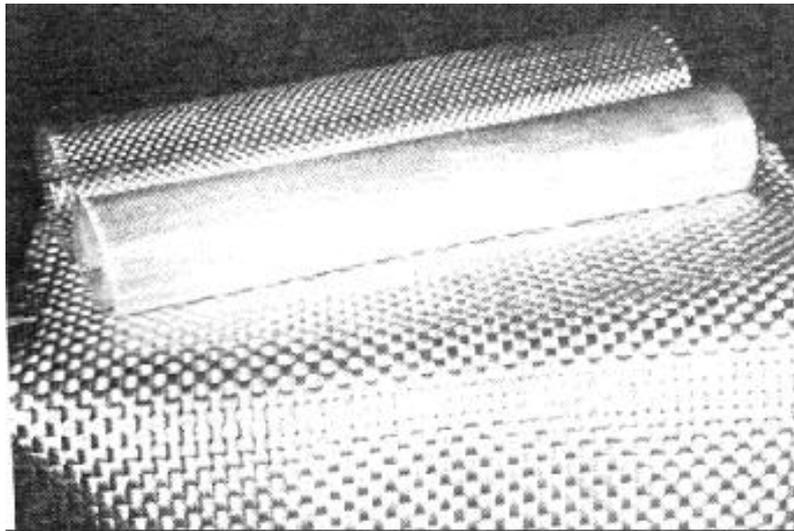


Figura 3.1 - Tecido padrão 1, Berthelot (1992).

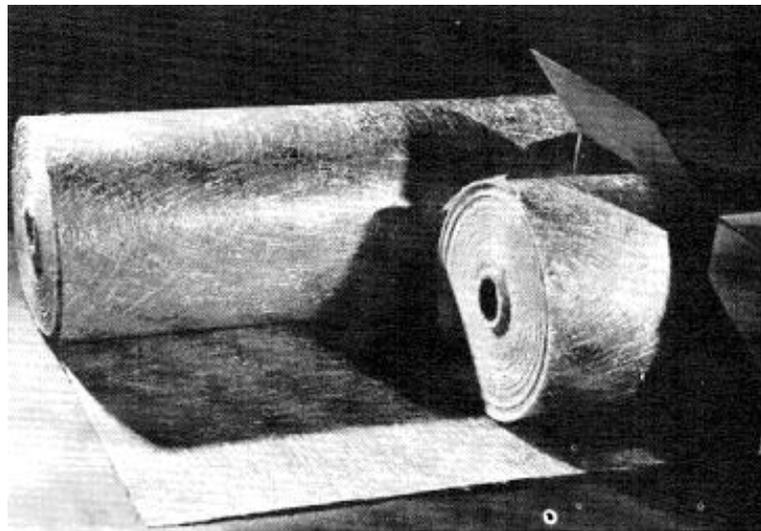


Figura 3.2 - Manta (fibras contínuas ou cortadas), Berthelot (1992).

A escolha entre um tipo de fibra e uma matriz depende fundamentalmente da aplicação ao qual será dado o material composto: características mecânicas elevadas, resistência à alta temperatura, resistência à corrosão, etc. O custo em muitos casos pode também ser um fator de escolha entre um ou outro componente. Deve ser observada também a compatibilidade entre as fibras e as matrizes.

3.3 INTERESSE NOS MATERIAIS COMPOSTOS

O interesse nos materiais compostos pode ser ligado basicamente a dois fatores: econômico e performance. O fator econômico vem do fato do material composto ser muito mais leve que os materiais metálicos, o que implica numa

economia de combustível e conseqüentemente, num aumento de carga útil (aeronáutica e aeroespacial). A redução na massa total do produto será tão maior quanto maior for o número de componentes fabricados em material composto. O custo de fabricação de algumas peças em material composto pode ser também sensivelmente menor se comparado com os materiais metálicos.

O fator performance está ligado a procura por um melhor desempenho de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito à características como:

- ✓ Rigidez,
- ✓ Resistência à ruptura e à fadiga,
- ✓ Resistência à corrosão,
- ✓ Resistência à abrasão,
- ✓ Amortecimento,
- ✓ Capacidade de trabalho à alta e baixa temperatura, etc.

O caráter anisotrópico dos materiais compostos é o fator primordial para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente.

A leveza associada às excelentes características mecânicas faz com que os materiais compostos sejam cada vez mais utilizados dentro de atividades esportivas.

3.4 APLICAÇÕES DOS MATERIAIS COMPOSTOS

A aplicação dos materiais compostos surgiu inicialmente na área aeronáutica devido à necessidade de diminuição de peso, preservando a robustez dos componentes estruturais. Atualmente, uma grande variedade de peças em materiais compostos podem ser encontradas nos aviões em substituição aos materiais metálicos:

- ✓ Fuselagem,
- ✓ Spoilers,
- ✓ Portas de trem de aterrissagem,
- ✓ Portas internas, etc.

Em muitos destes componentes, sua concepção foge da definição dada inicialmente para materiais compostos, pois nestes casos os componentes são fabricados normalmente em placas de baixa densidade, contra-placadas por placas

finas de alta resistência. Esta configuração normalmente é dita sanduíche. De uma forma mais ampla, estas configurações são também consideradas “materiais compostos”, pois combinam diferentes materiais.

Dentro também da área aeronáutica, os helicópteros possuem vários componentes que podem ser fabricados em material composto:

- ✓ Pás da hélice principal,
- ✓ Hélice traseira,
- ✓ Árvore de transmissão,
- ✓ Fuselagem, etc.

Os materiais compostos estão também na área aeroespacial, onde são fabricados:

- ✓ Painéis solares de satélites,
- ✓ Motores de último estágio dos lançadores de satélites, etc.

A utilização dos materiais compostos dentro da indústria automobilística é bem mais recente do que na área aeronáutica. Inicialmente, eram produzidos somente pára-choques, carrocerias e tetos de automóveis. Atualmente, o material composto é utilizado para a fabricação de:

- ✓ Capots,
- ✓ Carters de óleo,
- ✓ Colunas de direção,
- ✓ Árvores de transmissão,
- ✓ Molas laminadas,
- ✓ Painéis, etc.

Uma das grandes vantagens trazidas para o meio automobilístico pelos materiais compostos é, além da redução do peso, a facilidade em confeccionar peças com superfícies complexas.

O esporte também incorporou os materiais compostos na fabricação de alguns de seus instrumentos, pois a redução do peso está diretamente ligada a redução do tempo de execução de uma prova esportiva, assim como na agilidade, e na perfeição de alguns golpes. Como exemplo disto, podemos citar:

- ✓ Barcos a vela,
- ✓ Skis,
- ✓ Bicicletas,

- ✓ Tacos de golfe,
- ✓ Raquetes de tênis,
- ✓ Pranchas de surf, etc.

3.5 PROPRIEDADES DA MISTURA FIBRA/MATRIZ

Para os materiais compostos, pode-se definir um sistema de eixos ortogonais, dentro do qual as suas propriedades mecânicas podem ser identificadas. Um eixo designado 1 (ou l) é colocado longitudinalmente as fibras, um outro designado 2 (ou t) é colocado transversalmente as fibras e um outro designado 3 (ou t') é colocado ortogonalmente aos dois anteriores, Figura 3.3. De uma forma geral, 9 constantes elásticas independentes são necessárias para a determinação do comportamento do material composto ($E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$). Esses valores podem ser obtidos, experimentalmente ou estimados através de expressões analíticas, Gay (1987).

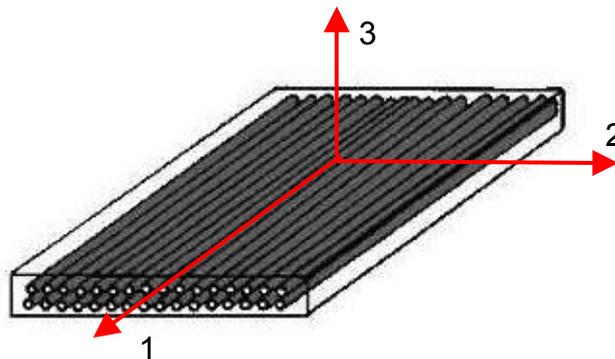


Figura 3.3 - Sistema de eixos de ortotropia, Gay (19987).

Em alguns casos, as propriedades da mistura nas direções 2 e 3 podem ser consideradas idênticas, sendo necessário somente 5 constantes elásticas independentes para a sua identificação ($E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13}, G_{12} = G_{13}$ e $G_{23} = E_2 / (2(1 + \nu_{23}))$). Os materiais compostos neste caso são chamados isotrópicos transversos.

Para estruturas do tipo placa e casca multicamadas (ou multilaminares) somente 4 constantes elásticas independentes são necessárias para a sua identificação (E_1, E_2, ν_{12} e G_{12}).

A título de ilustração, são apresentadas na Tabela 3.1, as propriedades de misturas de fibras impregnadas em resina epóxi com 60 % do volume em fibras.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas da fibra/matriz (matriz epóxi 60% de fibra), Gay (1987).

| Propriedades | vidro | kevlar | carbono |
|--|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Massa específica (kg/m ³) | 2080 | 1350 | 1530 |
| $\sigma_{ruptura}$ em tração na direção 1 (X_t) (MPa) | 1250 | 1410 | 1270 |
| $\sigma_{ruptura}$ em compressão na direção 1 (X_c) (MPa) | 600 | 280 | 1130 |
| $\sigma_{ruptura}$ em tração na direção 2 (Y_t) (MPa) | 35 | 28 | 42 |
| $\sigma_{ruptura}$ em compressão na direção 2 (Y_c) (MPa) | 141 | 141 | 141 |
| τ_{12} ruptura em cisalhamento (S_{12}) (MPa) | 63 | 45 | 63 |
| $\tau_{ruptura}$ em cisalhamento interlaminar (MPa) | 80 | 60 | 90 |
| módulo de elasticidade longitudinal E_1 (MPa) | 45000 | 85000 | 134000 |
| módulo de elasticidade transversal E_2 (MPa) | 12000 | 5600 | 7000 |
| módulo de cisalhamento G_{12} (MPa) | 4500 | 2100 | 4200 |
| Coefficiente de Poisson ν_{12} | 0,3 | 0,34 | 0,25 |
| Coef. de dilatação térmica longitudinal α_1 (°C ⁻¹) | 0,4 a $0,7 \cdot 10^{-5}$ | $-0,4 \cdot 10^{-5}$ | $-0,12 \cdot 10^{-5}$ |
| Coef. de dilatação térmica transversal α_2 (°C ⁻¹) | 1,6 a $2 \cdot 10^{-5}$ | $5,8 \cdot 10^{-5}$ | $3,4 \cdot 10^{-5}$ |

3.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS DE MATERIAIS COMPOSTOS

Muitas peças ou estruturas em material composto são geralmente produzidas por uma composição de lâminas sucessivas, chamadas de estruturas laminadas, multicamadas ou estratificadas. Os processos de fabricação são inúmeros e devem ser selecionados segundo requisitos como: dimensões, forma, qualidade, produtividade (capacidade de produção), etc.

As operações básicas para a obtenção da peça final têm a seguinte seqüência:

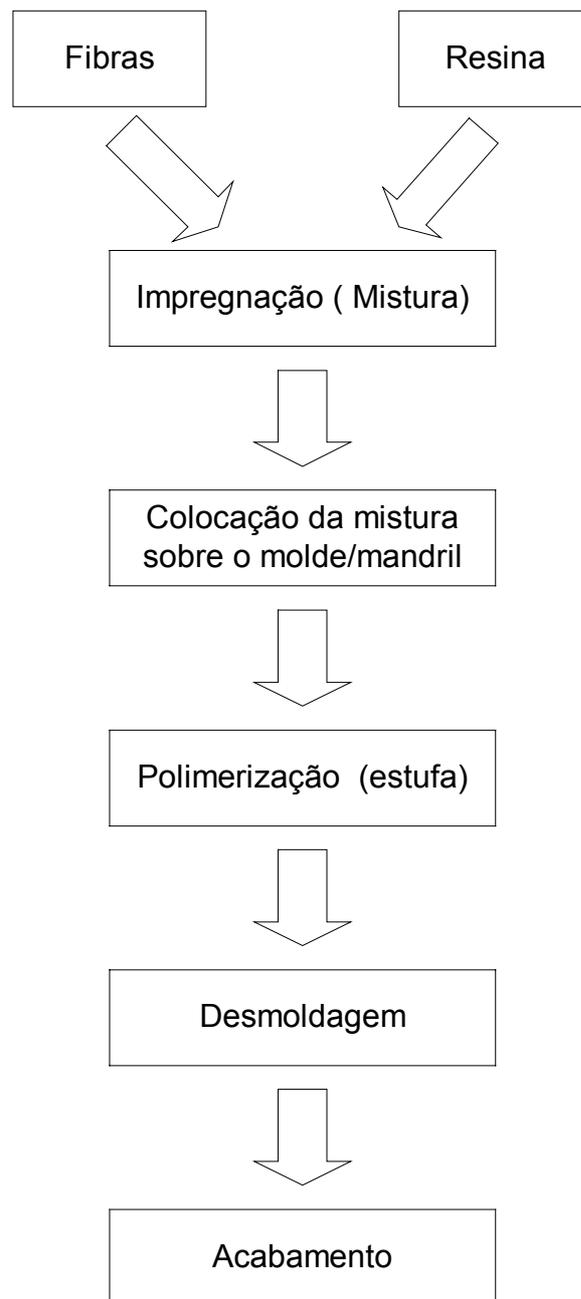


Figura 3.4 – Seqüência básica do processo de deposição do material composto, Gay (1987).

Podemos citar alguns processos de fabricação onde não há exigência de homogeneidade das propriedades mecânicas na peça, Berthelot (1992):

- ✓ Moldagem sem pressão,
- ✓ Moldagem por projeção simultânea,
- ✓ Moldagem a vácuo,
- ✓ Moldagem por compressão a frio,
- ✓ Moldagem por injeção,
- ✓ Moldagem contínua,

✓ Moldagem por centrifugação.

Diferentemente desses processos citados anteriormente, outros processos de fabricação de peças de revolução podem ser empregados onde se exige homogeneidade das propriedades mecânicas da peça. Nestes processos, as fibras são enroladas (bobinadas) sobre um mandril que dará a forma final da peça. Este processo permite a fabricação industrial de tubos de diversos diâmetros e grandes comprimentos, como também vasos de pressão de alta performance.

Para atender à necessidades do tipo: deposição de fibra em toda a geometria da peça e orienta-las segundo os esforços aos quais a peça é submetida, o bobinamento das fibras pode ser feito da seguinte forma: bobinamento circunferencial, bobinamento helicoidal e bobinamento polar. A escolha entre um desses processos depende da geometria da peça, assim como das solicitações mecânicas nas direções circunferencial e longitudinal da peça de revolução.

3.6.1 Bobinamento circunferencial

No bobinamento circunferencial, as fibras são depositadas em um mandril rotativo, com um ângulo de deposição de 90° em relação ao eixo de rotação, Figura 3.5. Este tipo de bobinamento resiste aos esforços circunferenciais.

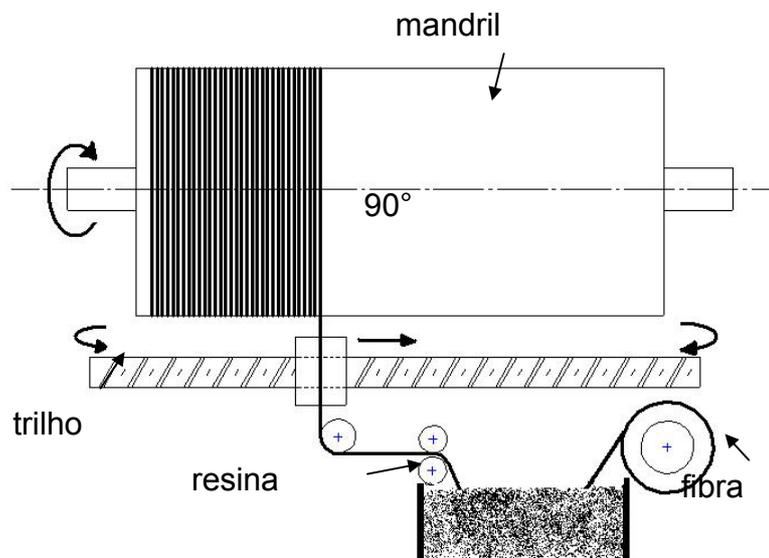


Figura 3.5 - Bobinamento circunferencial, Berthelot (1992).

3.6.2 Bobinamento helicoidal

No bobinamento helicoidal, as fibras são depositadas em um mandril rotativo com um ângulo de deposição α em relação ao eixo de rotação, Figura 3.6 e Figura 3.7. Este tipo de bobinamento resiste aos esforços circunferenciais e longitudinais.

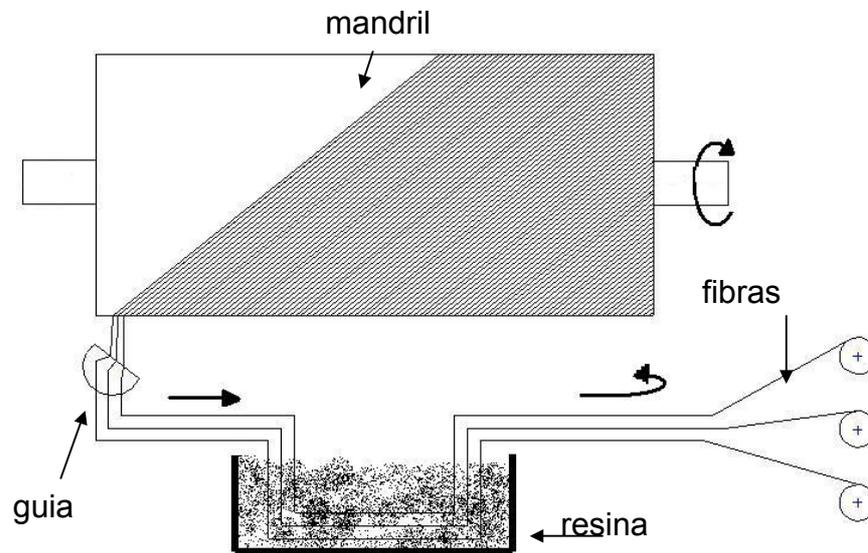


Figura 3.6 - Bobinamento helicoidal, Berthelot (1992).

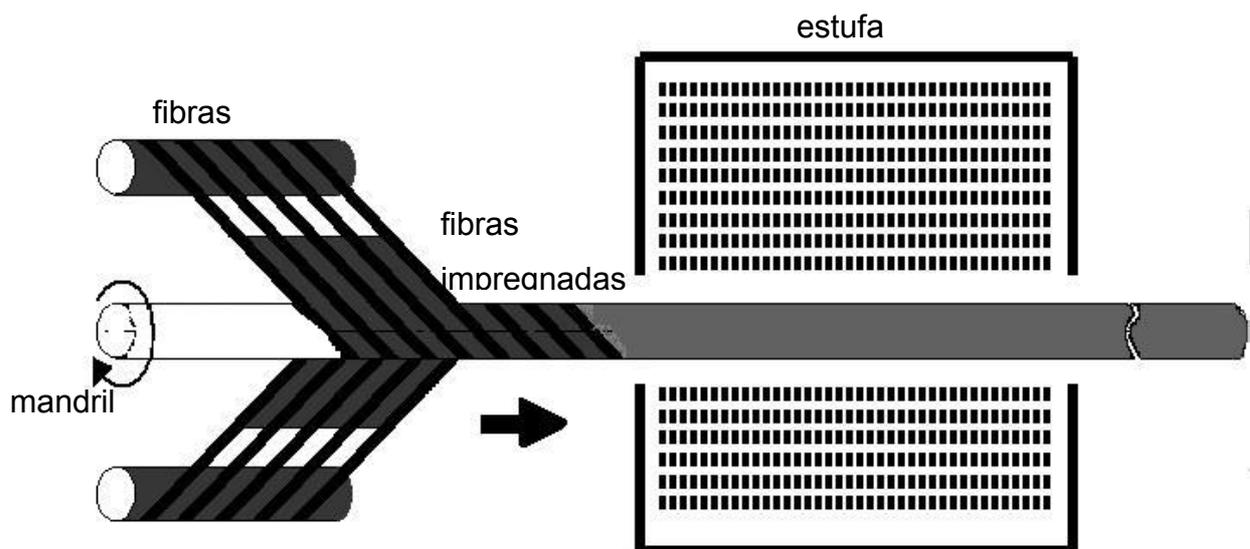


Figura 3.7 - Bobinamento helicoidal contínuo, Berthelot (1992).

3.6.3 Bobinamento polar

No bobinamento polar, o reforço é depositado no mandril de forma a tangenciar as duas aberturas dos domos, traseiro e dianteiro. O ângulo de deposição varia de α_0 , constante na região cilíndrica, até 90° nas duas aberturas dos domos. O bobinamento polar resiste preferencialmente aos esforços longitudinais.

A fabricação de vasos de pressão bobinados consiste de dois tipos de bobinamento. Nos domos traseiro e dianteiro, o bobinamento é do tipo polar ($\pm\alpha$), enquanto que na região cilíndrica, os bobinamentos circunferencial e polar se intercalam ($90^\circ/\pm\alpha$).

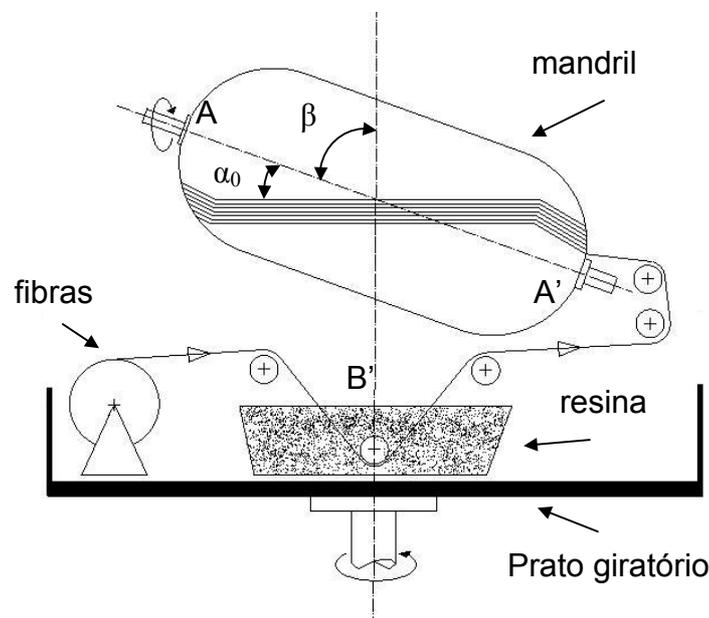


Figura 3.8 - Bobinamento polar, Berthelot (1992).

Nos dutos enterrados as maiores solicitações ocorrem no sentido circunferencial e transversal da parede do duto, sendo que os esforços longitudinais podem ser desconsiderados devido a grande extensão das tubulações. Sendo assim, o método que se adapta para a restauração de dutos é o método de bobinamento circunferencial, o qual resiste esforços circunferenciais.

Uma analogia pode ser feita através da comparação da Figura 3.5 com a Figura 1.1, através da semelhança do método aplicado no dispositivo usado para a restauração de pilares de pontes com o método de bobinamento circunferencial, com a diferença óbvia que, no dispositivo, a parte girante contém a fibra impregnada.

CAPÍTULO 4 - FASES DE PROJETO DO DRD

4.1 INTRODUÇÃO

O projeto do DRD foi desenvolvido com base em uma metodologia de projeto formada pelo projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. O projeto informacional teve como objetivo neste trabalho fazer a análise do problema proposto, reabilitação de dutos *in loco*, levantando os atributos do projeto e necessidades dos clientes, a fim de definir as especificações de projeto do DRD.

No projeto conceitual, foram desenvolvidas estruturas funcionais alternativas do problema, as quais foram avaliadas e escolhida a que melhor atendia aos requisitos de projeto, para em seguida, a partir de princípios de solução, desenvolver concepções alternativas para o projeto do DRD, as quais foram também avaliadas, e assim escolhida a concepção mais adequada. Nesta avaliação também foi considerada a hipótese de se chegar a uma concepção que mais se aproximasse da configuração desenvolvida em Pereira (2001).

No projeto preliminar, foi definido o *layout* preliminar de um protótipo do DRD, sendo descritas as peças que o compõem, com suas respectivas características construtivas. A partir desse *layout* preliminar são analisados os mecanismos do DRD. A análise dessa configuração preliminar foi desenvolvida através de uma avaliação técnica do dispositivo, apresentada no capítulo 5. Ainda neste capítulo, será apresentada a configuração final do DRD, através da verificação dos objetivos traçados no projeto informacional.

O processo de projeto do DRD nesse trabalho, foi desenvolvido até a fase de projeto preliminar na qual se deve alcançar o objetivo do trabalho. Sendo que para um detalhamento do dispositivo seria necessário também aplicar um projeto orientado a fabricação, com o intuito de melhor definir os detalhes geométricos, de fabricação, montagem do dispositivo e de alguns componentes do DRD, que não foram totalmente detalhados nesse trabalho.

4.2 PROJETO INFORMACIONAL

O projeto informacional do DRD parte primeiramente do estudo dos atributos de projeto. Esses atributos são baseados nas informações obtidas na revisão bibliográfica, os quais podem influenciar no desenvolvimento do projeto e que também trazem subsídios para o levantamento das necessidades dos clientes. Posteriormente, procurou-se identificar os clientes envolvidos direta ou indiretamente no processo de restauração de dutos, assim como, levantou-se suas necessidades na restauração de dutos.

Posteriormente, foram definidos os requisitos do usuário de acordo com Fonseca (2000), para a seguir, definir os requisitos de projeto baseados nos atributos de projeto e nos requisitos do usuário. Em seguida, foi utilizada a Casa da Qualidade para relacionar os requisitos do usuário e os requisitos de projeto, de forma a obter a classificação dos requisitos de projeto por ordem de importância. Finalmente, foi elaborada a tabela com as especificações do projeto do DRD, definindo os principais objetivos, saídas indesejadas e observações do projeto do DRD.

4.2.1 Atributos de projeto

Os atributos de projeto baseados nos estudos realizados na revisão bibliográfica visaram levantar aspectos relevantes no desenvolvimento do projeto do DRD. Esses atributos contribuem para o levantamento de informações que servirão como subsídio para formular um questionário utilizado na coleta de informações das necessidades dos clientes e para definir os requisitos de projeto.

4.2.1.1 Atributos do material de deposição

Os atributos físico-químicos do material de deposição são características apresentadas pelo material composto, que podem influenciar nas restrições e nos requisitos apresentados durante o desenvolvimento do projeto do DRD.

O material composto usado como revestimento, deve ser aplicado em uma superfície limpa (eliminar impurezas, como graxas, óleos, poeira, etc.) e seca e a uma temperatura média de 18°C (facilitar a impregnação da resina na superfície

do duto). A cura do material depositado poderá ocorrer à temperatura ambiente durando aproximadamente 24 horas, ou ser acelerada por catalisadores ou utilizando cobertores térmicos. Cada camada do composto a ser depositada no duto deverá estar ainda úmida, de forma que todas elas se tornem uma parte única do revestimento.

As propriedades mecânicas e as características do composto dependem da constituição do mesmo, levando em conta a disposição das fibras (tecido, manta, fita ou fio) e a percentagem de cada componente no composto, Gay (1991). Os atributos relacionados aos materiais compostos podem ser relacionados como tipo de material, densidade, forma, etc. Os atributos dos componentes do material composto serão representados em seguida.

Fibras

A reabilitação de dutos deteriorados utilizando material composto pode ser realizada de diferentes formas devido a variação de configuração (manta, tecido, fita ou fio) e de tipo de fibra. Atualmente, o material composto é utilizado na forma de manta ou tecido, pois a sua aplicação pode ser feita manualmente. Já o material composto na forma de fita ou de fio, deve ser aplicado automaticamente, de maneira a garantir a homogeneidade da deposição do material sobre o duto.

As fibras mais utilizadas na reabilitação de dutos são as fibras de vidro devido ao seu baixo custo. Entretanto, avalia-se atualmente o emprego de fibras de carbono em dutos altamente solicitados mecanicamente. Em contra partida, o aço pode corroer na presença do material, fibra de carbono. Estudos anteriores, no entanto, não mostraram qualquer degradação visível quando o material polimérico entra em contato com o aço, Toutanji e Dempsey (2001). Portanto, na escolha entre o uso de fibra de vidro ou fibra de carbono, deve ser considerado a relação custo/benefício.

As principais propriedades físicas das fibras são apresentadas em Berthelot (1992). Algumas características das formas de fita que são encontradas no mercado estão representadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características de fitas de fibras disponíveis no mercado, Texiglass (2001)

| Tipo de fibra | Representação gráfica | Densidade (g/m ²) | Largura (mm) | Espessura (mm) | Comprimento ¹ (m) | Diâmetro do rolo (mm) |
|---------------|---|-------------------------------|--------------|----------------|------------------------------|-----------------------|
| carbono |  | 200 – 360 | 50 | 0,5 | 50 | 180 |
| vidro |  | 150 – 500 | 10 – 100 | 0,08 – 0,5 | 50 | 75 - 180 |

Matrizes

As matrizes têm a função de unir as fibras e transmitir os esforços entre elas, assim como servem de proteção das fibras contra ataques químicos ou danos devido ao desgaste. As matrizes mais utilizadas na reabilitação de estruturas são as resinas poliméricas, pois apresentam vantagens como: a facilidade de fabricação, baixa densidade, resistência à ataques químicos, isolante térmico e elétrico e amortecimento mecânico, Gay (1991).

As principais propriedades físicas das matrizes estão apresentadas em Berthelot (1992).

4.2.1.2 Atributos do dispositivo

Os atributos do dispositivo foram definidos não só a partir da revisão bibliográfica mas principalmente a partir de informações obtidas com os clientes, onde se levantou alguns aspectos da reabilitação de dutos *in loco*.

Peso

O peso do dispositivo restaurador de dutos é um atributo relevante para a reabilitação de dutos *in loco*. Seu peso deve ser leve o suficiente, de forma que o seu transporte até o local de sua utilização e a sua instalação sobre o duto demandem pouco esforço.

¹ Em contato com um fabricante, verificou-se que o comprimento pode ser adequado à necessidade do cliente.

Dimensões

As dimensões do dispositivo têm uma importância fundamental, já que este parâmetro pode afetar o seu transporte e a sua manipulação, assim como podem exigir um elevado volume de escavação, o que não seria interessante para a reabilitação *in loco*.

Adaptação

Seria interessante que o dispositivo tivesse um sistema de fixação variável, de maneira que ele pudesse ser acoplado à dutos de diferentes diâmetros.

Custo

O desenvolvimento de um dispositivo para reabilitação de dutos *in loco*, tem como um dos objetivos principais a redução do custo de manutenção. Sendo assim, um dispositivo com custo alto, inviabilizaria o projeto. Além de não despertar o interesse de empresas do ramo em investir no desenvolvimento de um protótipo. No entanto, este atributo não deve comprometer o desempenho do dispositivo, assim como, deixar de atender às necessidades essenciais dos clientes.

4.2.1.3 Atributos de usabilidade

Transporte

Para atender à função de restauração de dutos *in loco*, o dispositivo, obviamente, deve ser transportado até o local onde está assentado o duto para realizar a manutenção do mesmo. Sendo assim, a possibilidade de transportá-lo facilmente é de grande relevância nas definições do projeto. Vários fatores podem interferir na viabilidade deste parâmetro: peso, dimensões e estabilidade do dispositivo.

Instalação

A possibilidade de utilizar o duto como base de sustentação do dispositivo pode ser um fator relevante para a concepção do produto. No entanto, a facilidade de instalação do dispositivo deve ser também considerada. Um outro fator a ser considerado é, evitar escavações além da área de assentamento do duto.

Fonte de energia

Devido a grande possibilidade de não se disponibilizar de energia elétrica no local de reabilitação do duto, deve-se estudar uma fonte alternativa de energia para impulsionar o mecanismo do dispositivo. Uma fonte portátil e recarregável deve ser levada em questão no momento de avaliar este atributo. Com isso, o dispositivo deve exigir um motor de baixa potência, de maneira a não haver a necessidade de uma fonte de energia muito robusta.

Operação

A facilidade de operação de um equipamento é sempre necessária, pois evita um treinamento rigoroso dos operadores e reduz a probabilidade da ocorrência de acidentes de operação. Este parâmetro pode ser avaliado através de funções como: alimentação da fibra e da resina, acionamento e desacionamento e, deposição do composto.

Uma das vantagens de reabilitar dutos deteriorados *in loco* é o fato de não interromper o fluxo do produto que está sendo transportado. Portanto, o processo de deposição do material deve ocorrer de forma que esse atributo seja respeitado para que este método tenha vantagem em relação aos outros métodos. O controle de deposição do material no duto é também um fator relevante na operação do dispositivo, já que o seu tempo de operação deve ser ajustado de acordo com o grau de deterioração do duto.

Velocidade de funcionamento

A velocidade de funcionamento do dispositivo é um atributo importante, pois ele deve estar associado a uma boa deposição do material e de forma homogênea, sem que no entanto, a cura da resina seja feita de forma intermitente, camada a camada. Isso garantirá uma unicidade do reparo.

4.2.2 Necessidades dos clientes

O desenvolvimento de um produto se caracteriza por uma necessidade a ser atendida, por isso, um passo importante para o desenvolvimento desse produto é a identificação das necessidades dos clientes. Estas necessidades devem partir dos usuários que serão beneficiados pelo produto, de forma que, o projeto do produto deve se desenvolver de acordo com as informações obtidas dos usuários.

Os principais clientes interessados no DRD são pessoas jurídicas, empresas que atuam na área de reabilitação de dutos deteriorados ou que necessitam desse tipo de serviço, como empresas de transporte de produtos por linhas de dutos.

Os clientes diretamente interessados no projeto do DRD são empresas nacionais de engenharia que desenvolvem e executam projetos de restauração de linhas de dutos, devido à necessidade dessas empresas expandir na utilização de materiais compostos e conquistar um mercado que atualmente é de dominado por empresas internacionais.

Os clientes que se beneficiam indiretamente com o desenvolvimento desse projeto são as empresas que utilizam as linhas de dutos para a distribuição do seu produto, pois, como visto nos estudos da revisão bibliográfica, este método diminui o tempo de restauração da linha, não necessita interromper o fornecimento ao seu cliente e evita maiores transtornos para a sociedade preservando o nome da empresa. Outros clientes que podem se beneficiar indiretamente com esse dispositivo, são as empresas de fabricação de dutos e as empresas que comercializam as matérias primas para os materiais compostos, pois com um método rápido e eficiente, incentivaria a utilização de linhas de dutos no transporte de produtos derivados. Além dessa concepção de utilizar materiais compostos na restauração de dutos, podem proporcionar o desenvolvimento de novos processos de fabricação de dutos com diferentes materiais, abrindo um novo mercado para as empresas de comercialização de dutos.

Sendo assim as necessidades dos clientes para este projeto foram identificadas a partir de uma revisão bibliográfica, de uma pesquisa realizada com empresas que fazem manutenção em dutos, empresas distribuidoras de produtos por linhas de dutos, empresas de comercialização de dutos de aço e empresas de reabilitação de estruturas utilizando materiais compostos. Para levantar as necessidades dos clientes foi feita uma pesquisa através do encaminhamento de um questionário, (ver anexo I), para as empresas apresentadas na Tabela 4.2. As informações obtidas nesta pesquisa foram muito válidas para o desenvolvimento do projeto, mas no entanto, não se conseguiu um número de informações suficientes para trabalhar com referencial estatístico para a sistematização das informações, visto que vários questionários foram respondidos parcialmente devido à falta de conhecimento da tecnologia em questão.

Tabela 4.2 – Lista de empresas consultadas para obtenção das necessidades

| Empresa | Cidade | Área de atuação |
|----------------------------------|------------------------|---|
| Confab Industrial | Pindamonhangaba - SP | Empresa de dutos |
| Jatocret S.A. | Rio de Janeiro - RJ | Empresa de restauração de linhas de dutos |
| Geral - Damulakis Engenharia S.A | Rio de Janeiro | Empresa de restauração de linhas de dutos |
| | São Paulo | |
| Blumeterra | Blumenau - SC | Empresa de restauração de linhas de dutos |
| Conduto Nacional | Duque de Caxias - R J | Empresa de restauração de linhas de dutos |
| Protubo | Rio de Janeiro - RJ | Empresa de dutos |
| Rust Engenharia | Diadema - SP | Empresa de restauração de linhas de dutos |
| | Joinville - SC | |
| | Camaçari - BA | |
| Sika S. A. | Osasco - SP | Empresa de comer.de material composto |
| | Rio de Janeiro - RJ | |
| MBT Brasil | São Paulo – SP | Empresa de comer.de material composto |
| Techint | SÃO PAULO, S.P | Empresa de restauração de linhas de dutos |
| Tubos Ipiranga | Sertãozinho – SP | Empresa de dutos |
| | Bernardo do Campo - SP | |
| Brastubo | São Paulo | Empresa de dutos |
| Petrobrás | Rio de Janeiro | Empresa distribuidora de petróleo e derivados |
| IEC Engenharia | Rio de Janeiro - RJ | Empresa de restauração de linhas de dutos |
| Industref | Pq Bristol - SP | Empresa de dutos |
| SCgás | Florianópolis - SC | Empresa distribuidora de gás natural |

4.2.3 Requisitos do usuário

Com as informações obtidas através das formas descritas anteriormente, foi possível listar um grande número de necessidades a serem atendidas pelo dispositivo restaurador de dutos, DRD.

Depois de relacionadas as necessidades dos clientes que estavam expressas em uma linguagem livre de cada cliente, foram aplicadas as orientações disponíveis em Fonseca (2000), para transformar essas necessidades dos clientes em requisitos do usuário, Tabela 4.3.

4.2.4 Requisitos de projeto

A definição dos requisitos de projeto para atender os requisitos do usuário, os quais poderão ser mensuráveis por algum sensor, foram obtidos através da análise dos atributos de projeto e com base nos requisitos dos usuários. Os requisitos de projeto estão representados na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Lista de necessidades e requisitos do usuário

| Necessidades do cliente | Requisitos do usuário |
|--|---|
| Dispositivo com possibilidade de reabilitar uma extensão linear de em média 2m para dutos de 42.” | Ter uma boa área de deposição |
| Dispositivo que possibilite o uso de fita de material composto | Possibilitar o uso de fita de material composto |
| O dispositivo deve ser de fácil instalação | Ser de fácil instalação |
| O dispositivo deve ser de fácil operação | Ser de fácil operação |
| O dispositivo deve melhorar o procedimento de deposição do material composto no duto | Depositar o material adequadamente |
| Velocidade de reabilitação de dutos em torno de 0,5 m/h é razoável para uma espessura requerida | Ter uma boa velocidade de deposição |
| O dispositivo deve estar acoplado ao duto durante a reabilitação | Estar acoplado ao duto |
| A fonte de energia deve ser a gasolina | Ter fonte de energia independente da energia elétrica |
| O comprimento desejado do dispositivo deve ser de 1 m | Ter dimensão que facilite seu transporte |
| O dispositivo deve ser leve (em torno de 60 kg) para ser de fácil deslocamento ao campo | Ser leve |
| A potência do dispositivo deve ficar entre 0,5 e 1,0 cv | Exigir baixa potência |
| A impregnação da fita deve ser automatizada | Impregnar fita automaticamente |
| O tempo de vida útil do dispositivo deve ser de 3 a 5 anos | Ter uma boa vida útil |
| O dispositivo deverá ser flexível a dutos de diâmetros diferentes | Possibilitar a instalação em dutos com diferentes diâmetros |
| O dispositivo deverá trabalhar na direção horizontal e ocasionalmente numa direção inclinada (menor que 45°) | Possibilitar a deposição numa inclinação de no máximo 45° |

Tabela 4.4 – Definição dos requisitos de projeto

| | Requisitos do usuário | Requisitos de projeto | Unidades |
|------------|---|--|----------------|
| Transporte | Ter dimensões que facilite seu transporte | Volume do dispositivo | m ³ |
| | Ser leve | Baixo peso | kg |
| Instalação | Ser de fácil instalação | Tempo de instalação | min |
| | Estar acoplado ao duto | Capacidade de fixações | % |
| | Possibilitar a instalação em dutos com diferentes diâmetros | Faixa de diâmetros de dutos a serem reabilitados | mm |
| | Possibilitar a deposição numa inclinação de no máximo 45° | Grau de inclinação do dispositivo | ° |
| Operação | Ter uma boa área de deposição | Área de deposição do material | m ² |
| | Possibilitar o uso da fita de fibra de vidro | Largura de fita a ser depositada | mm |
| | Depositar o material adequadamente | Capacidade de controle de deposição | % |
| | Ter uma boa velocidade de deposição | Velocidade de deposição do material | m/h |
| | Ter fonte de energia independente da energia elétrica | Fonte de energia portátil | % |
| | Exigir baixa potência | Potência requerida | W |
| | Fácil operação | N° de comandos | unidades |
| | Impregnar fita automaticamente | Impregnação automática | % |
| Custo | Ter uma boa vida útil | Equipamento durável | anos |
| | Ser de baixo custo | Valor de aquisição | R\$ |

4.2.5 Estabelecimento das especificações de projeto – Casa da Qualidade

As especificações de projeto são definidas a partir do relacionamento dos requisitos de projeto com os requisitos do usuário. Este relacionamento é feito através da Casa da Qualidade, utilizando a técnica QFD (Quality Function Development – Desdobramento da Função Qualidade). O QFD é uma técnica

bastante eficiente para transladar as vontades dos clientes em metas de projeto e é uma ferramenta que assegura a qualidade ainda na fase de projeto, Back e Forcellini (1999).

A ferramenta Casa da Qualidade auxilia na classificação dos requisitos de projeto por ordem de importância, de acordo com uma valoração fornecida através dessa ferramenta. A representação esquemática da Casa da Qualidade, assim como a identificação de seus campos de preenchimento estão representadas na Figura 4.1.

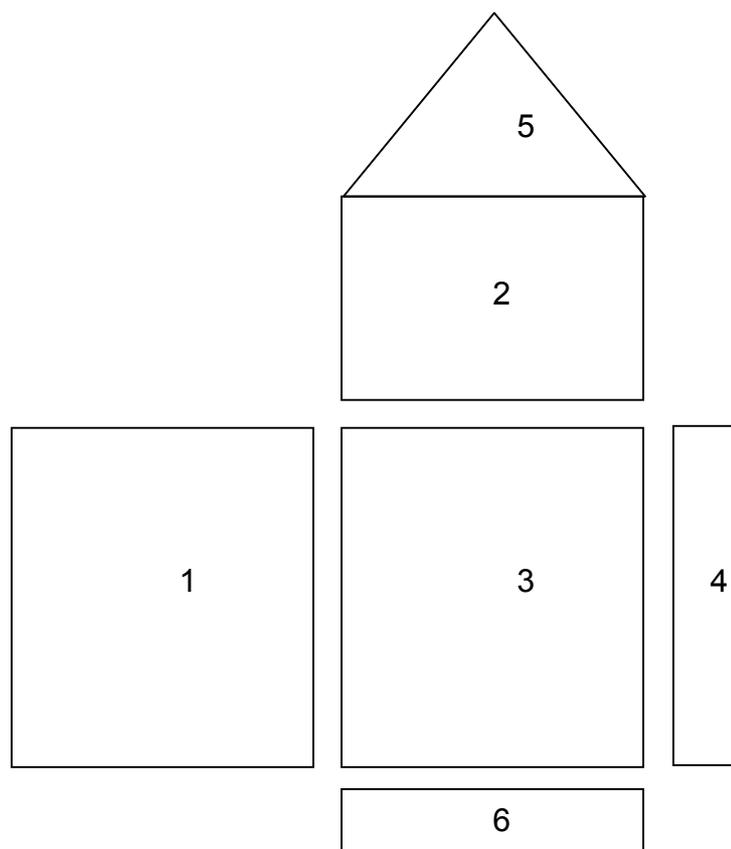


Figura 4.1 – Esquema explicativo da Casa da Qualidade, Back e Forcellini (1999).

1. Relação dos requisitos do usuário;
2. Relação dos requisitos de projeto que irão atender aos requisitos do usuário;
3. Grau de relacionamento entre os requisitos do usuário e os requisitos de projeto, que pode ser: fraco, médio ou forte, conforme Figura 4.2;
4. Valor do consumidor, obtido pela valoração dos requisitos do usuário;

Para o preenchimento da Casa da Qualidade utilizou-se o programa QFD for Windows 1.0 (1999), e a escala para o valor do consumidor foi utilizada de 1 à 5, a qual se apresentou requisitos de projeto com diferentes importâncias.

Sendo assim, com os requisitos de projetos classificados na Casa da Qualidade, esses são listados em ordem de importância e melhor detalhado, formando assim as especificações de projetos, com seus objetivos, restrições e observações, conforme observado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Especificações do projeto

| | Requisitos | Objetivos | Saídas indesejadas/Observações |
|----|--|--|--|
| 1 | Volume do dispositivo | 2,5 m ³ (máximo) | Dispositivo com dimensões exageradas. Dificultando o transporte até o local de manutenção. Grande volume de escavação no local de manutenção |
| 2 | Faixa de diâmetros de dutos a serem reabilitados | 100 a 250 mm | Limitado a um único diâmetro de duto. Dificultando a continuidade do processo em derivações da linha |
| 3 | Capacidade de controle de deposição | Homogeneidade na deposição | Passo de deposição maior que a largura da fita |
| 4 | Área de deposição do material | 0,80 m ² (mínima) | Pequena área de reabilitação/Com uma área de acordo com os objetivos evita a instalação do dispositivo em seqüência) |
| 5 | Velocidade de deposição do material | 0,5 m/h (mínima) | Baixa velocidade de deposição inviabiliza o processo de manutenção |
| 6 | Largura da fita a ser depositada | De acordo com a disponibilidade do mercado (50 mm até 100 mm) | Largura de fita não disponível no mercado aumentaria o custo do processo |
| 7 | Baixo peso | 60 kg (máximo) | Peso excessivo dificulta o transporte e a instalação. |
| 8 | Impregnação automática | 100% automática | A impregnação manual dificultaria o processo |
| 9 | Tempo de instalação | 20 min (máximo) | Tempo elevado traduz-se num equipamento de difícil instalação |
| 10 | Fonte de energia portátil | Estudar uma fonte portátil de energia compatível | No local de manutenção geralmente a energia elétrica não está a disposição |
| 11 | Capacidade de fixação | Fixação suficiente para o dispositivo se manter estável durante a operação | A operação do dispositivo pode depender da estabilidade do dispositivo. |
| 12 | Custo de fabricação | R\$ 15.000,00 | Custo excessivo pode tornar o dispositivo inviável financeiramente |
| 13 | Potência requerida | 100 W (máximo) | Evitar motores de grande porte devido ao transporte, a instalação e a operação do dispositivo |
| 14 | Grau de inclinação do dispositivo | 45° (máximo) | Nas linhas de oleodutos e gasodutos a inclinação máxima dos dutos é de 45° |
| 15 | Número de comandos | Mínimo possível para facilitar a operação | Muitos comandos dificultam a operação |
| 16 | Equipamento durável | Mínimo 3 anos | Caso contrário, há o comprometimento do investimento. |

4.3 PROJETO CONCEITUAL

No projeto conceitual é desenvolvida a estrutura funcional e uma concepção para o produto, a qual representa uma forma básica, dando uma idéia geral da forma do produto final. A estrutura funcional de um produto parte de sua função global, a qual é desdobrada em funções mais simples, identificadas como funções parciais, que seriam as funções intermediárias em termos de complexidade, e as funções elementares, que representam as funções mais básicas do problema. A junção dessas funções deve satisfazer a função global do produto. Para isso, foram desenvolvidas estruturas funcionais alternativas do produto, as quais foram avaliadas através de uma matriz de decisão, que como resultado fornece a alternativa que melhor atende aos requisitos de projeto.

Posteriormente, com a estrutura funcional do produto já definida, foram escolhidos os princípios de solução que atendessem às funções elementares da estrutura funcional definida. A partir desses princípios de solução, foram desenvolvidas concepções alternativas do produto, as quais foram avaliadas através de outra matriz de decisão, que como resultado fornece a concepção mais adequada. Neste trabalho, como pretende-se avaliar um dispositivo já concebido em uma patente, Pereira (2001), a concepção de referência utilizada na matriz de decisão será aquela que mais se aproxima da concepção dessa patente.

Com a concepção do produto definida, foram caracterizados alguns subconjuntos da concepção, para em seguida identificar as peças e componentes da concepção escolhida, para finalmente se fazer uma breve descrição do mecanismo de funcionamento do DRD.

4.3.1 Características funcionais do produto

4.3.1.1 Função global

As características funcionais de projeto do DRD foram desenvolvidas através de uma análise da função global do produto, Figura 4.3, que foi definida como: *bobinar fita de material composto impregnada com resina sobre dutos deteriorados*. A função global processa a solução do problema, transformando as entradas, representadas no lado esquerdo, em saídas desejadas, representadas no lado direito.

A função global é elaborada a partir das especificações de projeto e serve como ponto de partida para a elaboração das estruturas funcionais alternativas do produto, Da Veiga (1999).

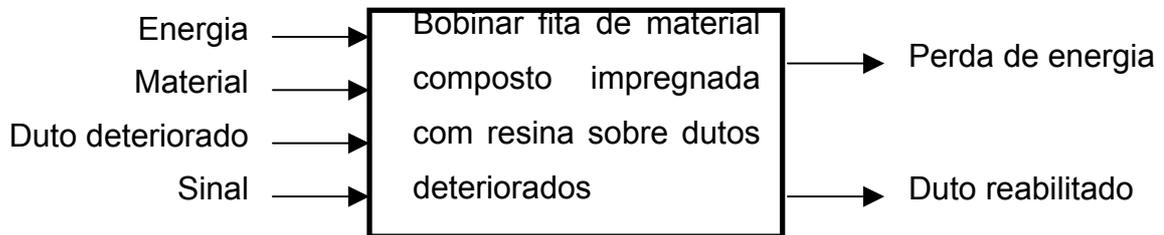


Figura 4.3 – Função global do DRD

4.3.1.2 Estruturas de funções alternativas

A função global foi desdobrada em funções parciais e funções elementares, com o intuito de facilitar a descoberta de soluções adequadas para cada função elementar, e que, com a combinação dessas soluções, se atenda a função global. As funções parciais e elementares estão baseadas nas necessidades do cliente, nos requisitos de projeto e nos atributos de projeto. Para determinar uma estrutura funcional ótima para o dispositivo, foram desenvolvidas 3 estruturas funcionais alternativas, onde cada estrutura atende à função global do DRD.

A primeira estrutura funcional, Figura 4.4, foi estruturada de forma que a função global fosse dividida em 5 funções parciais: FP 1.1 – Acoplar dispositivo no duto, FP 1.2 – Acionar o mecanismo, FP 1.3 – Alimentar o dispositivo com resina, FP 1.4 – Alimentar o dispositivo com a fita e FP 1.5 – transmitir movimento. Essas funções parciais são desdobradas em funções elementares de acordo com a complexidade da função. Essas funções elementares podem ser observadas na representação da estrutura funcional alternativa I, Figura 4.4.

Na segunda estrutura funcional, Figura 4.5, a função global está dividida em apenas 4 funções parciais: FP 1.1 – Acoplar dispositivo no duto, FP 1.2 – Acionar o mecanismo, FP 1.3 – Alimentar material de revestimento, FP 1.4 – transmitir movimento. Nesta alternativa, a fita é depositada no duto já impregnada, enquanto que, na alternativa I, a deposição da fita seria uma operação posterior à deposição da resina. A impregnação da fita na resina passa então nesta alternativa a ser uma das funções elementares da função parcial FP 1.3.

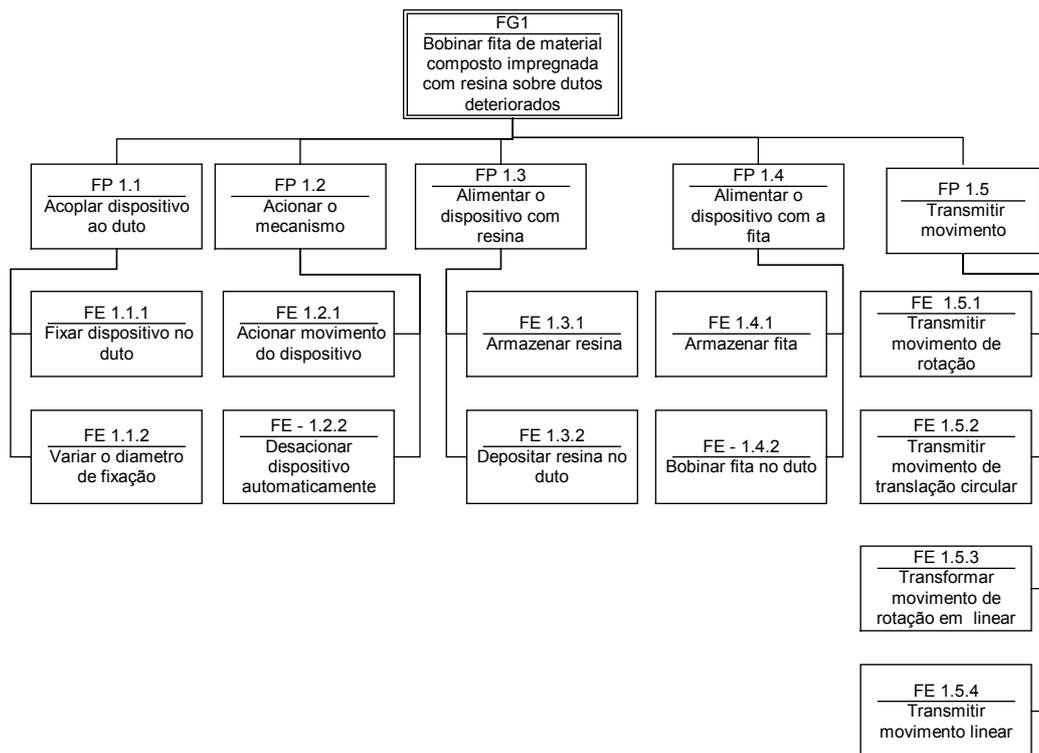


Figura 4.4 – Estrutura funcional alternativa I

A função parcial FP 1.4 – transmitir movimento, na alternativa II, foi desdobrada em apenas duas funções elementares. Dessa forma, a transmissão de movimento está definida em apenas movimento rotacional, o que significa que, para desenvolver o bobinamento do duto com essa configuração, toda a estrutura do dispositivo deverá se mover no sentido longitudinal do duto.

Na terceira estrutura funcional, Figura 4.6, a função global também está dividida em apenas 4 funções parciais: FP 1.1 - Acoplar dispositivo no duto, FP 1.2 - Acionar o mecanismo, FP 1.3 – Alimentar material de revestimento, FP 1.4 – transmitir movimento. Aqui, a função parcial FP 1.4 – transmitir movimento, foi desdobrada em quatro funções elementares. Dessa forma, a transmissão de movimento está definida em movimento de rotação e movimento de translação. Isso significa que, para desenvolver o bobinamento do duto com essa configuração, o dispositivo não terá que se mover totalmente no sentido longitudinal do duto, assim como na alternativa II. Esse movimento será feito apenas por subsistemas do dispositivo.

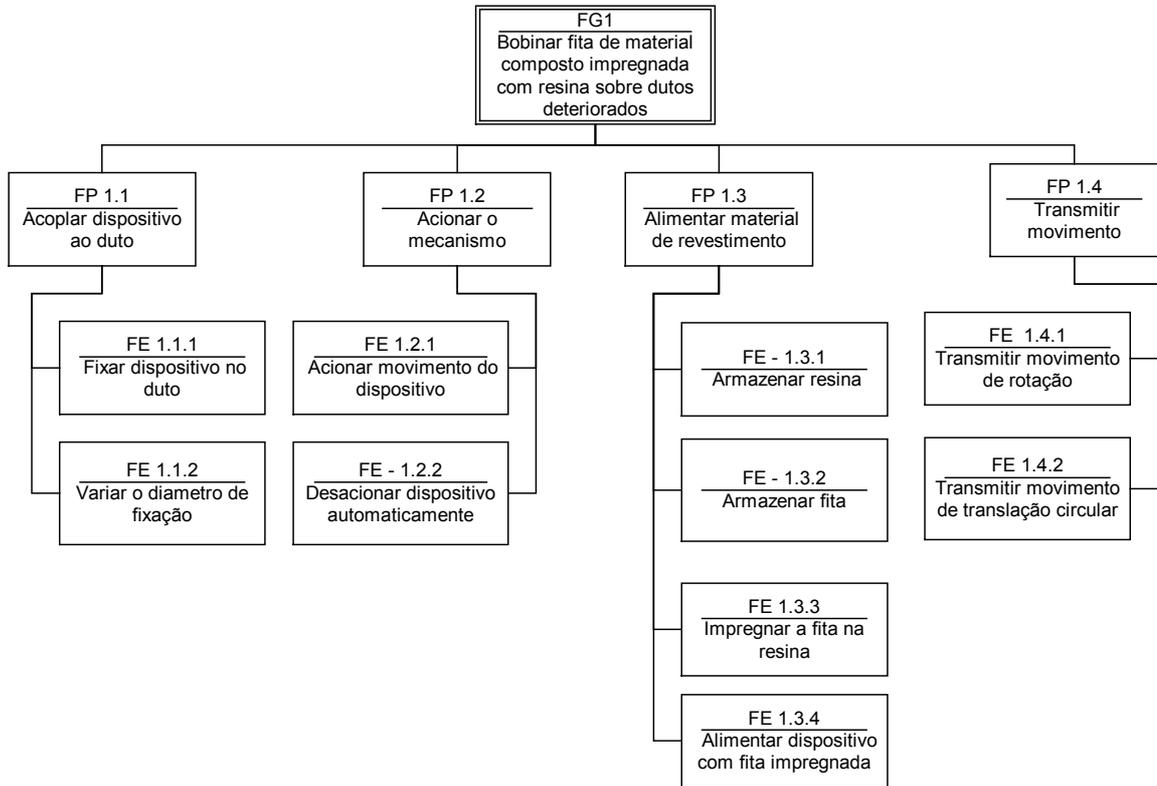


Figura 4.5 – Estrutura funcional alternativa II

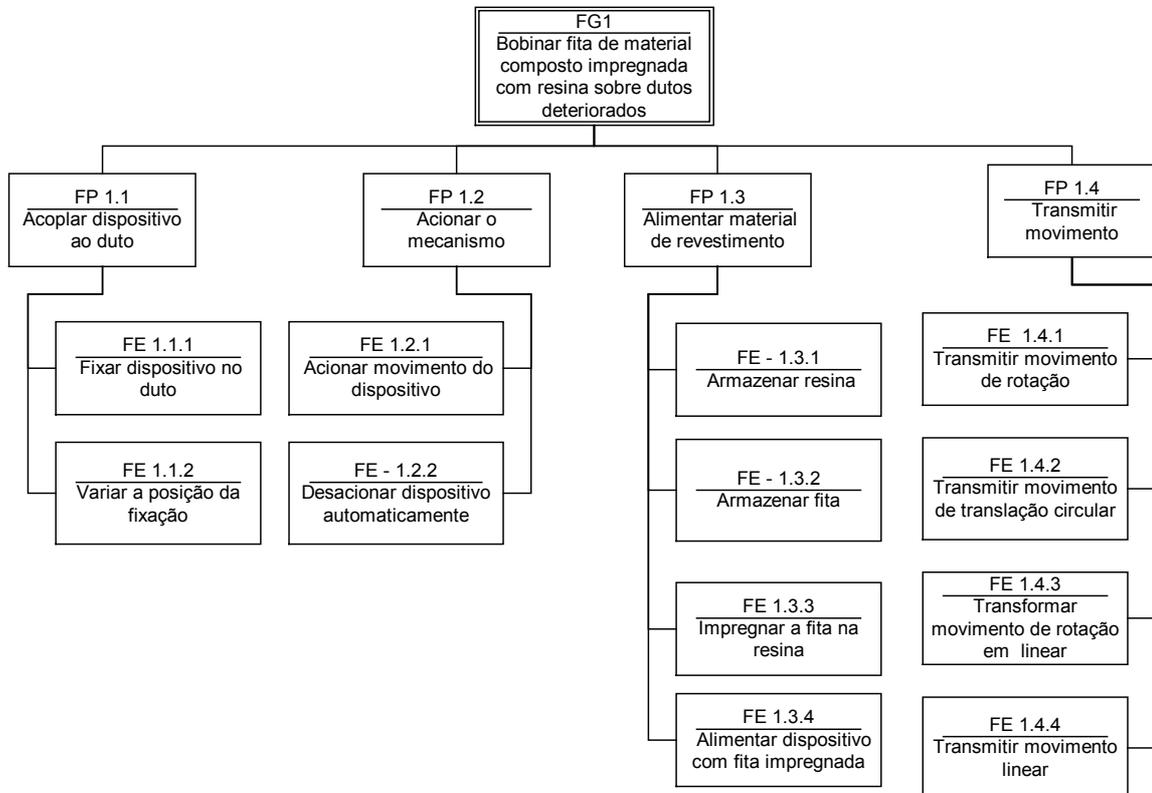


Figura 4.6 – Estrutura funcional alternativa III

4.3.1.3 Seleção da estrutura funcional mais adequada

Para a escolha da estrutura funcional que melhor atenda aos requisitos do projeto e as necessidades dos clientes, ou seja, aquela que apresente a melhor viabilidade técnica, foi utilizada uma matriz de decisão, Back e Forcellini (1999), onde confronta-se as especificações de projeto com as alternativas propostas, Tabela 4.6. Considerou-se a estrutura funcional alternativa III como padrão para referência.

Tabela 4.6 – Matriz de decisão de seleção da estrutura funcional

| Especificações de Projeto | PR (%) | Estruturas Funcionais | | |
|--|------------|-----------------------|---------------|---------------|
| | | I | II | III |
| Volume do dispositivo | 9,07 | ↓ | ↑ | ○ |
| Faixa de diâmetros de dutos a serem reabilitados | 8,66 | ○ | ○ | ○ |
| Capacidade de controle de deposição | 8,45 | ↓ | ↓ | ↑ |
| Área de deposição do material | 8,36 | ↓ | ○ | ○ |
| Velocidade de deposição do material | 8,3 | ↓ | ↑ | ○ |
| Largura da fita a ser depositada | 7,56 | ↑ | ○ | ○ |
| Baixo peso | 7,41 | ↓ | ↑ | ↑ |
| Impregnação automática | 6,63 | ↓ | ↑ | ↑ |
| Tempo de instalação | 6,42 | ↓ | ↑ | ○ |
| Fonte de energia portátil | 6,16 | ○ | ○ | ○ |
| Capacidade de fixação | 6,06 | ○ | ↓ | ○ |
| Valor de fabricação | 5,54 | ↓ | ↑ | ○ |
| Potência requerida | 5,33 | ↓ | ○ | ↑ |
| Grau de inclinação do dispositivo | 3,31 | ○ | ↓ | ○ |
| Número de comandos | 1,50 | ↓ | ○ | ○ |
| Equipamento durável | 1,24 | ○ | ↓ | ↑ |
| Índice de Desempenho Técnico | 100 | 303,63 | 445,76 | 593,77 |

Legenda: ↑ desempenho muito bom = 10
 ↑ desempenho bom = 7,5
 ○ desempenho satisfatório = 5
 ↓ desempenho fraco = 2,5
 ↓ desempenho muito fraco = 1

As especificações de projeto estão colocadas na primeira coluna da matriz de decisão de acordo com a valoração dada pela Casa da Qualidade, Figura 4.2. Na segunda coluna estão representados os pesos relativos (PR) de cada

especificação dada pela Casa da Qualidade. Nas outras três colunas estão representados os símbolos de desempenho técnico (DT), que estão valorados na legenda da Tabela 4.6.

O Índice de Desempenho Técnico (IDT) de cada estrutural funcional alternativa, calcula-se através da seguinte equação, Da Veiga (1999):

$$IDT = \sum_{i=1}^m (PR_i \cdot DT_{ij}) \quad (4.1)$$

Da análise da matriz de decisão, Tabela 4.6, escolhe-se a melhor estrutura funcional, buscando uma estrutura com elevados índices de desempenho técnico para satisfazer as necessidades dos clientes. Com base nisso, foi escolhida a estrutura funcional da alternativa III para seguir o desenvolvimento do projeto do DRD.

4.3.2 Geração da concepção – matriz morfológica

Com a estrutura funcional do projeto definida, pode-se utilizar o método da matriz morfológica, Back (1983). Esta metodologia consiste numa pesquisa sistemática de diferentes combinações de princípios de solução que satisfazem as funções elementares da estrutura funcional do projeto, com o objetivo de encontrar uma solução para o problema. Esses princípios de solução foram definidos através de um levantamento na literatura técnica sobre sistemas mecânicos que atendiam às funções similares já existentes. Definições estas, baseadas nos atributos de projeto do DRD vistos anteriormente.

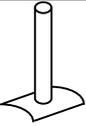
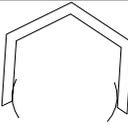
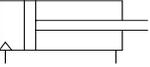
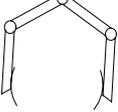
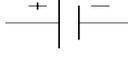
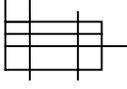
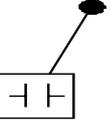
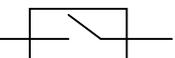
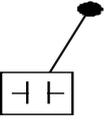
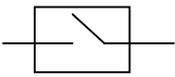
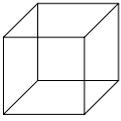
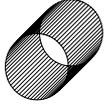
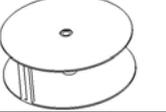
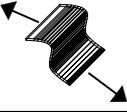
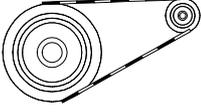
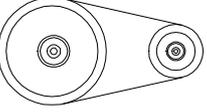
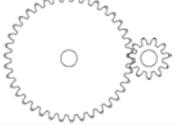
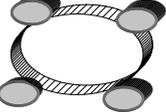
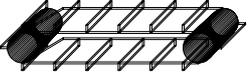
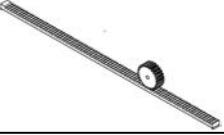
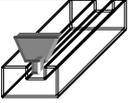
A estrutura funcional escolhida apresenta 12 funções elementares que se deve atender com diferentes alternativas de princípios de solução. As funções podem sofrer desdobramentos quanto à forma como são feitas e quanto aos tipos de dispositivos ou princípios que poderão ser utilizados, Da Veiga (1999). A lista de princípios de solução e suas respectivas funções elementares estão representadas na Tabela 4.7.

Depois de listados os princípios de solução, estes são organizados de forma gráfica na matriz morfológica, Tabela 4.8. De acordo com essas formas apresentadas, avalia-se diferentes combinações de concepções alternativas do dispositivo.

Tabela 4.7 – Tabela de listagem dos princípios de solução

| Funções Elementares | | Princípios de Solução |
|---|----------------------|--|
| FE 1.1.1 - Fixar dispositivo no duto | | Hastes de fixação Braços de fixação |
| FE 1.1.2 - Variar a posição da fixação | | Pistão pneumático Hastes de comprimento variável Braços articulados |
| FE 1.2.1 - Acionar movimento do dispositivo | Fonte de energia | Gasolina Bateria Energia solar |
| | Motor de acionamento | Motor de corrente contínua Motor de combustão Motor de passo |
| | Tipo de acionamento | Dispositivo de acionamento manual Dispositivo de acionamento automático |
| FE - 1.2.2 - Desacionar dispositivo automaticamente | | Desacionamento manual Desacionamento automático Temporizador |
| FE - 1.3.1 - Armazenar resina | | Recipiente com formato retangular Recipiente com formato Cilíndrico Recipiente com formato de cone invertido |
| FE - 1.3.2 - Armazenar fita | | Rolo com eixo no sentido horizontal Rolo com eixo no sentido vertical |
| FE 1.3.3 - Impregnar a fita na resina | | Banho de resina com um rolo Banho de resina com dois rolos |
| FE 1.3.4 - Alimentar dispositivo com fita impregnada | | Deposição da fita por gravidade Deposição da fita tencionada |
| FE 1.4.1 - Transmitir movimento de rotação | | Correntes e rodas dentadas Correias e polias Trem de engrenagens |
| FE 1.4.2 - Transmitir movimento de translação circular | | Trem de engrenagens planetário Roletes |
| FE 1.4.3 - Transformar movimento de rotação em movimento linear | | Esteira dentada Eixo de acionamento Cremalheira |
| FE 1.4.4 - Transmitir movimento linear | | Ranhura e guia Trilhos e guia |

Tabela 4.8 – Matriz morfológica para o DRD

| Funções Elementares | | Princípios de solução | | |
|---|----------------------|---|---|---|
| FE 1.1.1 - Fixar dispositivo no duto | |  |  | |
| FE 1.1.2 - Variar a posição da fixação | |  |  |  |
| FE 1.2.1 - Acionar movimento do dispositivo | Fonte de energia |  |  |  |
| | Motor de acionamento |  |  |  |
| | Tipo de acionamento |  |  | |
| FE - 1.2.2 - Desacionar dispositivo automaticamente | |  |  |  |
| FE - 1.3.1 - Armazenar resina | |  |  |  |
| FE - 1.3.2 - Armazenar fita | |  |  | |
| FE 1.3.3 - Impregnar a fita na resina | |  |  | |
| FE 1.3.4 - Alimentar dispositivo com fita impregnada | |  |  | |
| FE 1.4.1 - Transmitir movimento de rotação | |  |  |  |
| FE 1.4.2 - Transmitir movimento de translação circular | |  |  | |
| FE 1.4.3 - Transformar movimento de rotação em movimento linear | |  |  |  |
| FE 1.4.4 - Transmitir movimento linear | |  |  | |

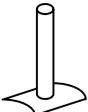
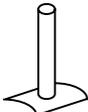
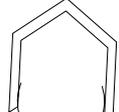
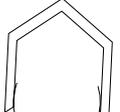
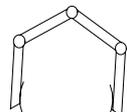
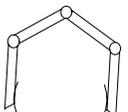
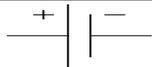
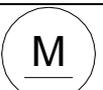
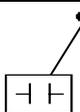
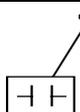
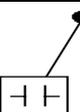
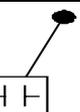
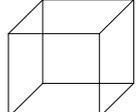
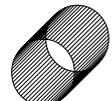
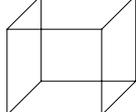
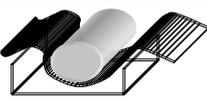
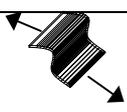
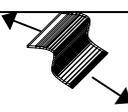
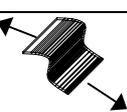
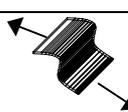
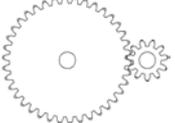
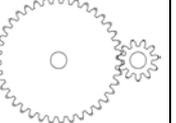
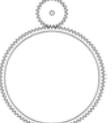
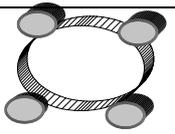
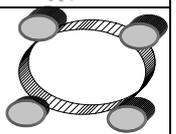
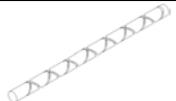
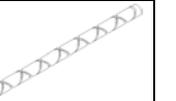
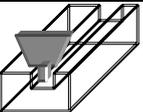
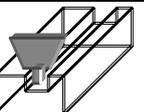
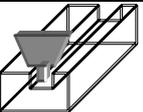
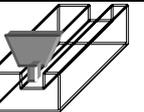
4.3.2.1 Geração das concepções alternativas

De acordo com os princípios de solução apresentados na Tabela 4.8, definiu-se quatro combinações dos princípios de solução para definir as concepções alternativas, Tabela 4.9. Definiu-se as concepções alternativas de acordo com a avaliação da combinação dos princípios de solução, baseando-se nas necessidades do cliente, requisitos de projeto, e sua compatibilidade geométrica.

As quatro concepções propostas diferem basicamente no tipo de impregnação utilizado e no tipo de fixação do dispositivo no duto. Este último, modifica conseqüentemente os elementos que desenvolvem o movimento de translação circular do dispositivo.

- ✓ Concepção alternativa I – Nessa concepção, o dispositivo encontra-se fixo ao duto e apenas um subsistema móvel do dispositivo desenvolve movimento de translação circular e translação longitudinal em torno do duto. A impregnação da fita é feita em um recipiente de formato retangular utilizando apenas um rolo para impregnação.
- ✓ Concepção alternativa II – Nessa concepção, o dispositivo é fixado no duto da mesma forma que na concepção alternativa I, no entanto, a impregnação da fita é feita em um recipiente de formato cilíndrico utilizando dois rolos para a impregnação.
- ✓ Concepção alternativa III – Nessa concepção, o dispositivo encontra-se semifixo ao duto, sendo que todo o dispositivo acompanha o movimento de translação circular e um subsistema móvel desenvolve movimento de translação longitudinal. A impregnação neste caso é feita da mesma forma que na concepção alternativa II.
- ✓ Concepção alternativa IV – Nessa concepção o dispositivo encontra-se semifixo da mesma forma que na concepção alternativa III. A impregnação é feita da mesma forma que na concepção alternativa I.

Tabela 4.9 – Tabela da concepções alternativas

| Funções Elementares | | Concepções alternativas | | | |
|---|----------------------|---|--|---|---|
| | | I | II | III | IV |
| FE 1.1.1 - Fixar dispositivo no duto | |  |  |  |  |
| FE 1.1.2 - Variar a posição da fixação | |  |  |  |  |
| FE 1.2.1 - Acionar movimento do dispositivo | Fonte de energia |  |  |  |  |
| | Motor de acionamento |  |  |  |  |
| | Tipo de acionamento |  |  |  |  |
| FE - 1.2.2 - Desacionar dispositivo automaticamente | |  |  |  |  |
| FE - 1.3.1 - Armazenar resina | |  |  |  |  |
| FE - 1.3.2 - Armazenar fita | |  |  |  |  |
| FE 1.3.3 - Impregnar a fita na resina | |  |  |  |  |
| FE 1.3.4 - Alimentar dispositivo com fita impregnada | |  |  |  |  |
| FE 1.4.1 - Transmitir movimento de rotação | |  |  |  |  |
| FE 1.4.2 - Transmitir movimento de translação circular | |  |  |  |  |
| FE 1.4.3 - Transformar movimento de rotação em movimento linear | |  |  |  |  |
| FE 1.4.4 - Transmitir movimento linear | |  |  |  |  |

4.3.2.2 Seleção da concepção mais adequada

Para a escolha da concepção que melhor atenda aos requisitos do projeto e às necessidades dos clientes, ou seja, aquela que apresente a melhor viabilidade técnica, foi utilizada novamente a matriz de decisão, onde neste caso, confronta-se as especificações de projeto com as concepções alternativas propostas. Devida a semelhança em relação a concepção apresentada em Pereira (2001), a concepção alternativa I será tomada como padrão de referência para as outras alternativas, Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Matriz de decisão das alternativas de concepção

| Especificações de Projeto | Valoração | Concepções alternativas | | | |
|--|------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | | I | II | III | IV |
| Volume do dispositivo | 9,07 | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ |
| Faixa de diâmetros de dutos a serem reabilitados | 8,66 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| Capacidade de controle de deposição | 8,45 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Área de deposição do material | 8,36 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Velocidade de deposição do material | 8,3 | ↑ | ↑ | ○ | ↑ |
| Largura da fita a ser depositada | 7,56 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Baixo peso | 7,41 | ○ | ○ | ↑ | ↑ |
| Impregnação automática | 6,63 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Tempo de instalação | 6,42 | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Fonte de energia portátil | 6,16 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Capacidade de fixação | 6,06 | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ |
| Valor de fabricação | 5,54 | ○ | ○ | ↑ | ↑ |
| Potência requerida | 5,33 | ○ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Grau de inclinação do dispositivo | 3,31 | ○ | ○ | ↓ | ↓ |
| Número de comandos | 1,50 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Equipamento durável | 1,24 | ○ | ↓ | ↓ | ↓ |
| Índice de Desempenho Técnico | 100 | 586,83 | 509,56 | 546,25 | 576,86 |

Legenda: ↑ desempenho muito bom = 10
 ↑ desempenho bom = 7,5
 ○ desempenho satisfatório = 5
 ↓ desempenho fraco = 2,5
 ↓ desempenho muito fraco = 1

As especificações de projeto estão colocadas na primeira coluna da matriz de decisão de acordo com a valoração dada pela Casa da Qualidade, Figura 4.2. Na segunda coluna, estão representados os pesos relativos (PR) de cada especificação dada pela Casa da Qualidade. Nas outras duas colunas, estão representados os símbolos de desempenho técnico (DT), que estão valorados na legenda da Tabela 4.10. O Índice de Desempenho Técnico (IDT) de cada estrutura funcional alternativa calcula-se através da eq.(4.1).

Da análise da matriz de decisão, Tabela 4.10, observou-se um alto índice técnico para as concepções alternativas I e IV. A configuração dessas concepções estão apresentadas nas Figura 4.7 e Figura 4.8, respectivamente. No entanto, a concepção alternativa I teve um índice de desempenho técnico maior, sendo que, o tipo de fixação do dispositivo no duto é o fator que difere a configuração I da configuração IV.

Dessa forma, a classificação da matriz com o maior índice para a concepção alternativa I, foi considerado consistente, devido a necessidade de estabilidade do dispositivo durante a operação, o que pode ser melhor garantido por essa alternativa. Essa decisão não descarta estudos mais aprofundados que podem ser desenvolvidos na alternativa IV, já que a mesma apresenta algumas vantagens sobre a concepção alternativa I, como visto na matriz de decisão, Tabela 4.10.

Com base nessa avaliação, foi escolhida a primeira alternativa de concepção para seguir o desenvolvimento do projeto do DRD.

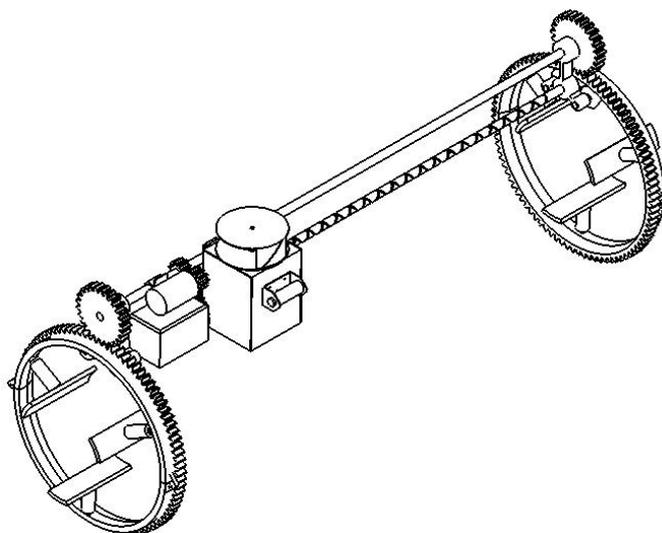


Figura 4.7 – Concepção da alternativa I

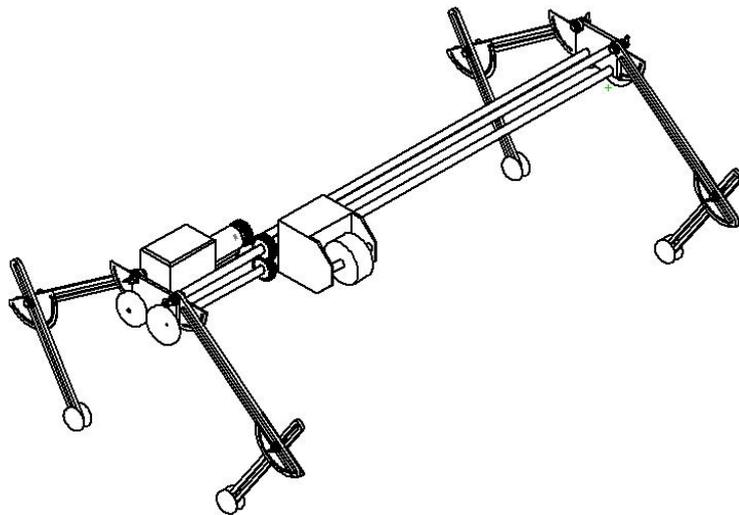


Figura 4.8 – Concepção da alternativa IV

4.3.3 Definição dos subconjuntos do DRD

Com a concepção de projeto do DRD definida, foi possível caracterizar os subconjuntos do DRD, determinando suas configurações geométricas e suas características funcionais. Os subconjuntos são configurações de agrupamento de alguns princípios de solução que atendem às suas funções totalmente harmonizados, assim como identificam elementos de ligação entre os princípios de solução. Esses subconjuntos foram identificados de acordo com sua função para um melhor entendimento do produto. Algumas características relevantes na funcionalidade do dispositivo serão destacadas na configuração desses subconjuntos.

4.3.3.1 – Subconjunto sistema de fixação

O subconjunto sistema de fixação, consiste do agrupamento dos princípios de solução, haste de fixação e haste de comprimento variável. Este subconjunto consiste de um sistema de fixação formado por suportes de comprimento variável de ajuste manual (1), Figura 4.9. Este sistema deve ser fixado na estrutura do dispositivo (cremalheira circular (2)) e acoplado ao duto, de forma que, variando o comprimento dos três suportes na mesma proporção, o DRD poderá ser acoplado em dutos com diferentes diâmetros.

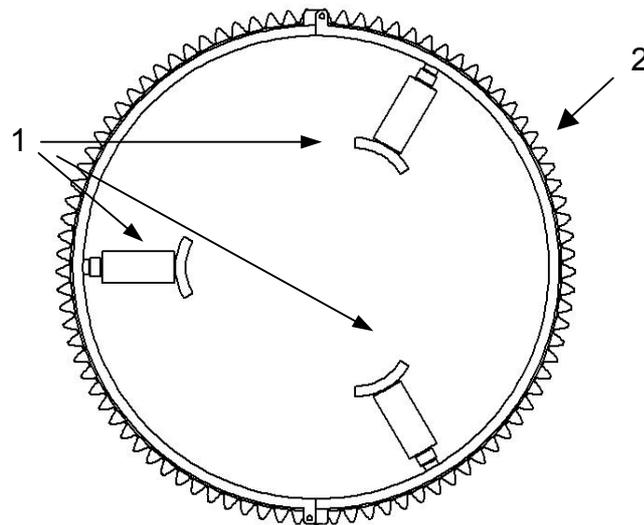


Figura 4.9 – Subconjunto sistema de fixação.

4.3.3.2 Subconjunto sistema de acionamento

O subconjunto sistema de acionamento, representado na Figura 4.10, consiste do agrupamento dos princípios, bateria (1), acionamento manual (2), temporizador (3) e motor de acionamento (4). Esse subconjunto acopla-se à estrutura móvel do dispositivo, de forma que não atrapalhe o mecanismo de deposição do material sobre duto.

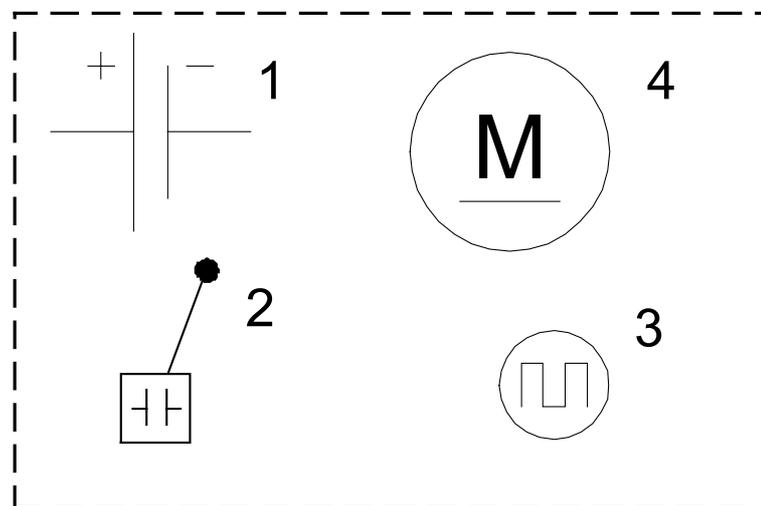


Figura 4.10 – Representação do sistema de acionamento.

4.3.3.3 Subconjunto carro bobinador

O subconjunto carro bobinador, consiste do agrupamento dos princípios de solução, recipiente com formato retangular (1), rolo com eixo no sentido vertical (2), banho de resina através de um rolo (3), fita depositada tensionada (4). Este subconjunto, Figura 4.11, deverá ser configurado para que exerça todas as funções vinculadas aos princípios de solução citados anteriormente.

O subconjunto carro bobinador será basicamente um reservatório de resina com um suporte externo para o carretel da fita. Esta fita deverá passar por dentro do reservatório, a qual será impregnada pela resina e posteriormente depositada sobre a superfície do duto.

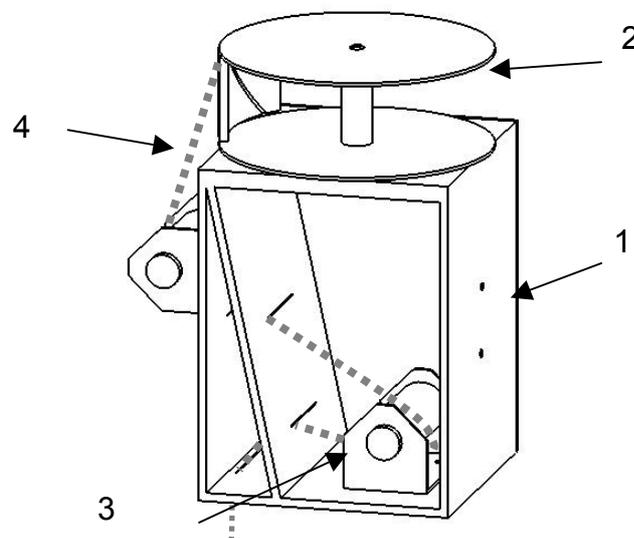


Figura 4.11 – Subconjunto carro bobinador.

4.3.3.4 Subconjunto sistema de transformação de movimento

O subconjunto sistema de transformação de movimento consiste do agrupamento dos princípios de solução, eixo de acionamento com ranhura e guia, e um eixo guia. Este subconjunto, é um mecanismo formado por um eixo guia (1), um eixo sincronizador (2) e uma base móvel (3), Figura 4.12.

Este subconjunto terá como função receber um movimento de rotação, transformá-lo em movimento linear e transmiti-lo para outro elemento. O movimento de rotação chegará até o eixo sincronizador, que apresenta ranhuras helicoidais em sua superfície. Essas ranhuras transmitirão movimento para a base móvel, que apresenta um pino que se deslocará dentro das ranhuras do eixo sincronizador. O eixo guia servirá para restringir o movimento de rotação da base móvel, direcionando a mesma para um movimento linear.

Para que o movimento linear atenda à especificação de projeto de deposição contínua do material de revestimento sobre o duto, este movimento deve ser alternado. Dessa forma, as ranhuras do eixo sincronizador deverão apresentar ângulos de avanço, $+\lambda$ e $-\lambda$. A alternância do movimento longitudinal se fará pela variação do ângulo de avanço, esta variação ocorrerá sempre na extremidade do eixo sincronizador passado de $+\lambda$ para $-\lambda$ e vice-versa na outra extremidade.

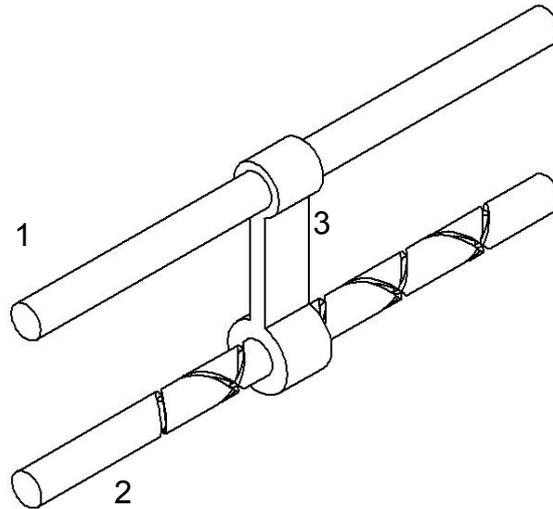


Figura 4.12 – Subconjunto sistema de transformação de movimento

4.3.4 Concepção do produto

Com os princípios de solução e os subconjuntos definidos, a concepção do produto ficou definida conforme representada nas Figura 4.13 e Figura 4.14. Os componentes do dispositivo e seus respectivos números indicativos são colocados na seguinte forma:

- 1) Engrenagem da cremalheira circular;
- 2) Conjunto acionador;
- 3) Engrenagem do motor;
- 4) Eixo guia;
- 5) Base dos eixos;
- 6) Cremalheiras circulares;
- 7) Eixo sincronizador;
- 8) Carro bobinador;
- 9) Engrenagem do eixo sincronizador;
- 10) Suportes de fixação;

- 11) Rodas guia;
- 12) Base móvel do carro bobinador;
- 13) Engrenagem do eixo guia;
- 14) Base fixa de suporte do sistema de acionamento.

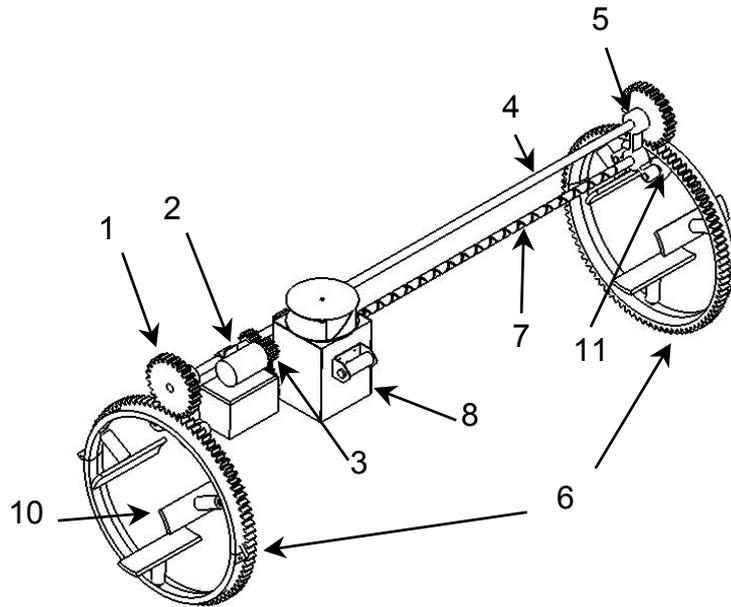


Figura 4.13 – Concepção do DRD – vista de frente.

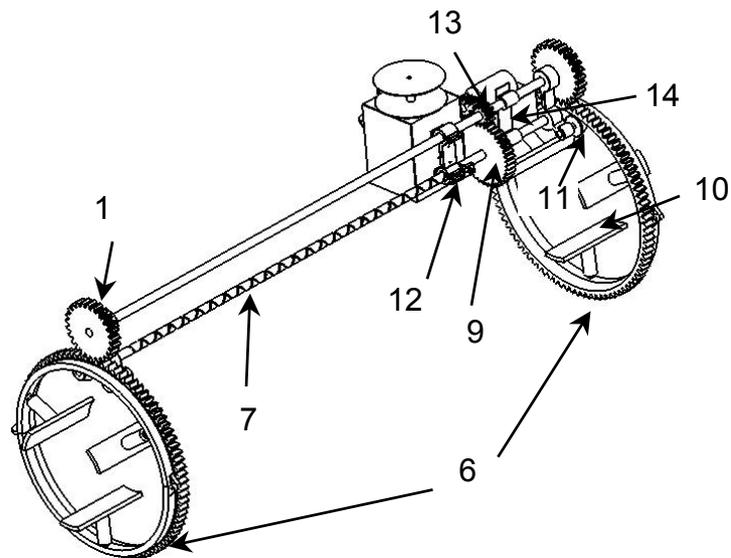


Figura 4.14 – Concepção do DRD – vista de trás.

4.3.4.1 Descrição do mecanismo de funcionamento do DRD

O dispositivo restaurador de dutos (DRD) é composto de duas cremalheiras circulares de aço bipartidas (6), de maneira que no momento da instalação do dispositivo, elas possam *abraçar* o duto. Estas cremalheiras circulares são fixadas ao duto através de suportes de comprimento variável (10). Isto permitirá a utilização do dispositivo em dutos de diferentes diâmetros. Sobre as cremalheiras circulares serão instalados dois eixos de aço: eixo guia (4) e eixo sincronizador (7), acoplados às cremalheiras circulares (6) através de engrenagens de aço (1), e rodas guia de PVC (11).

O conjunto acionador (2) está instalado em uma base fixa sobre dois mancais (14), um acoplado ao eixo sincronizador (7) e outro acoplado ao eixo guia (4). Nas extremidades desses eixos está instalada também uma base fixa sobre dois mancais (5), mantendo o eixo sincronizador (7) e o eixo guia (4) ajustados sobre as cremalheiras circulares (6).

O carro bobinador (8) é composto de um reservatório estanque de resina e de um carretel de fita de fibra. Este carro bobinador (8), está acoplado a uma base móvel com dois mancais deslizantes (12) acoplados ao eixo sincronizador (7) e ao eixo guia (4). A base móvel do carro bobinador tem um pino guia que desliza dentro das ranhuras do eixo sincronizador (7) e transmite o movimento de translação ao carro bobinador (8). Uma vez que uma extremidade da fita de fibra estiver aderida à superfície do duto, uma força de tração surgirá de maneira que a fita seja forçada a passar por dentro do reservatório de resina e se impregnar.

O eixo sincronizador (7) possui duas ranhuras com dois ângulos de avanço diferentes, $+\lambda$ e $-\lambda$. Estas duas ranhuras se encontram nas extremidades do eixo sincronizador pela variação dos ângulos de avanço. Este sistema permite que, com o motor girando sempre no mesmo sentido, o carro bobinador (8), acoplado ao eixo sincronizador (7) por um pino guia, tenha um movimento alternado de maneira a depositar várias camadas de fibra/resina sobre a superfície do duto a ser restaurado. A quantidade de camadas a ser depositada será definida através do tempo introduzido no temporizador (2), uma vez que se saberá a priori o tempo gasto para depositar uma camada.

O sincronismo dado pelas engrenagens será tal que, quando o carro bobinador (8) der uma volta sobre o duto, este deverá percorrer uma distância na direção longitudinal equivalente à largura da fita, considerando uma sobreposição da mesma, ou seja, deve se deslocar apenas 90% da largura da fita, este valor será

definido posteriormente. Isto fará que, quando o carro bobinador (8) percorrer a distância de uma extremidade a outra do eixo sincronizador (7), não haja nenhuma região do duto sem deposição de fibra/resina .

4.4 PROJETO PRELIMINAR

Após a definição da concepção do DRD, serão determinadas no projeto preliminar as características geométricas e funcionais dos componentes (peças), de um protótipo do DRD visando o desenvolvimento de um produto otimizado em termos de funcionalidade.

Após a concepção do dispositivo ter sido definida, é feita uma avaliação inicial do mecanismo de funcionamento do protótipo do DRD a partir de um modelo geométrico desenvolvido no software Solidworks 2000. Nesta análise inicial, é avaliado o sincronismo de movimento entre as peças, detectando e eliminando as eventuais interferências entre as mesmas, de forma a cumprir a função global do dispositivo. A partir dessa análise, foram definidas as características iniciais do dispositivo que serão utilizadas posteriormente para se determinar a configuração ótima do DRD. A descrição detalhada das características de cada componente do protótipo do DRD será apresentada nos itens subseqüentes.

As dimensões dos componentes apresentadas a seguir foram estipuladas a partir dos atributos do projeto, assim como das dimensões limites definidas na concepção de projeto. Uma exceção a isso foi as dimensões da cremalheira circular, já que optou-se por verificar a viabilidade do dispositivo não só através de simulações geométricas, como também através de testes a serem realizados com um protótipo. Assim, as dimensões da cremalheira nestas análises posteriores são menores que as da configuração final, de forma a, diminuir os custos de fabricação do protótipo e facilitar os testes que serão realizados em laboratório.

As dimensões finais dos componentes serão definidas no capítulo 5, a partir de uma avaliação técnica de alguns componentes que são relevantes na funcionalidade e no sincronismo do DRD.

4.4.1 Descrição dos componentes do protótipo do DRD

De acordo com a análise para definição de um layout preliminar, as características iniciais das peças são as seguintes:

Conjunto acionador

O conjunto acionador é composto por um motor de corrente contínua que será alimentado por uma bateria e acionado por um botão liga/desliga, que servirá também como botão de segurança, e um temporizador que será colocado em série com esses componentes, o qual tem o papel de regular o tempo de bobinagem, e desacionar automaticamente o dispositivo. Esses componentes serão definidos a partir da potência solicitada pelo dispositivo após a análise de todo o mecanismo do DRD no capítulo 5.

Eixo guia

O eixo guia é um dos componentes do subconjunto sistema de transformação de movimento. Além de restringir o movimento de rotação da base móvel do carro bobinador, ele terá a função de suportar os elementos (engrenagens, rolamentos e mancais), transmitir movimento de rotação, assim como suportar parte do peso dos mesmos. Esse eixo será confeccionado com diâmetro $d = 20$ mm e comprimento $L = 1500$ mm.

Engrenagem da cremalheira circular

A engrenagem da cremalheira circular, receberá movimento de rotação do eixo guia e o transformará em movimento de translação circular desenvolvido sobre a cremalheira circular. A engrenagem da cremalheira circular deverá ser uma engrenagem cilíndrica de dentes retos com módulo $M = 5,5$ e número de dentes $Z = 25$.

Engrenagem do motor

A engrenagem do motor transmitirá movimento de rotação do motor para a engrenagem do eixo guia. Essa deverá ser uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, com módulo $M = 4$ e número de dentes $Z = 11$.

Engrenagem do eixo sincronizador

A engrenagem do eixo sincronizador, receberá movimento de rotação da engrenagem do eixo guia e transmitirá esse movimento para o eixo sincronizador. Essa deverá ser uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, com módulo $M = 4$ e número de dentes $Z = 38$.

Engrenagem do eixo guia

A engrenagem do eixo guia, receberá movimento de rotação da engrenagem do motor e transmitirá esse movimento para o eixo guia e para a engrenagem do eixo sincronizador. Essa engrenagem deverá ser uma engrenagem cilíndrica de dentes retos com módulo $M = 4$ e número de dentes $Z = 11$.

Base dos eixos

As bases dos eixos servem como acoplamento entre o eixo guia, o eixo sincronizador e as rodas guias, os quais estão acoplados através de rolamentos de esfera. As dimensões das bases dos eixos dependerão da distância entre o eixo guia e o eixo sincronizador que será definida no capítulo 5. A configuração inicial da base dos eixos está representada na Figura 4.15.

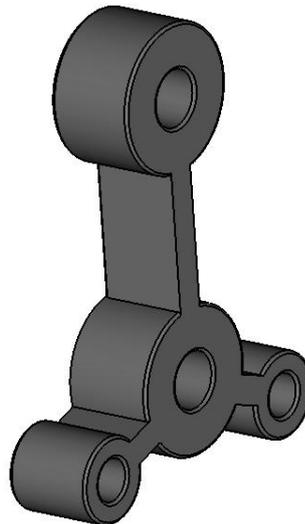


Figura 4.15 – Base dos eixos

Cremalheiras circulares

As cremalheiras circulares são elementos que servem tanto como sustentação do dispositivo, como para transmissão de movimento de translação circular, e estão acopladas ao duto pelos suportes de fixação. Estes elementos são rodas dentadas bipartidas, de forma que elas possam ser acopladas ao duto. As dimensões preliminares das cremalheiras circulares são, modulo $M = 5,5$ e diâmetro externo $d_e = 500$ mm, Figura 4.16. É importante lembrar que o diâmetro das cremalheiras circulares é relativo a um protótipo.

A largura do dentes das cremalheiras é menor do que a largura da mesma, isto para permitir a instalação das articulações e dos suportes de fixação,

Figura 4.17. A articulação foi projetada de forma que se conseguisse o máximo de abertura da cremalheira circular sem que houvesse interferência entre os dentes periféricos da cremalheira circular bipartida. A fixação das partes da cremalheira circular bipartida é feita através de um pino conectado no encaixe de fixação da mesma. Este encaixe tem a mesma geometria do elemento de articulação facilitando assim a fabricação dos mesmos.



Figura 4.16 – (a) Cremalheira circular aberta, (b) Cremalheira circular fechada

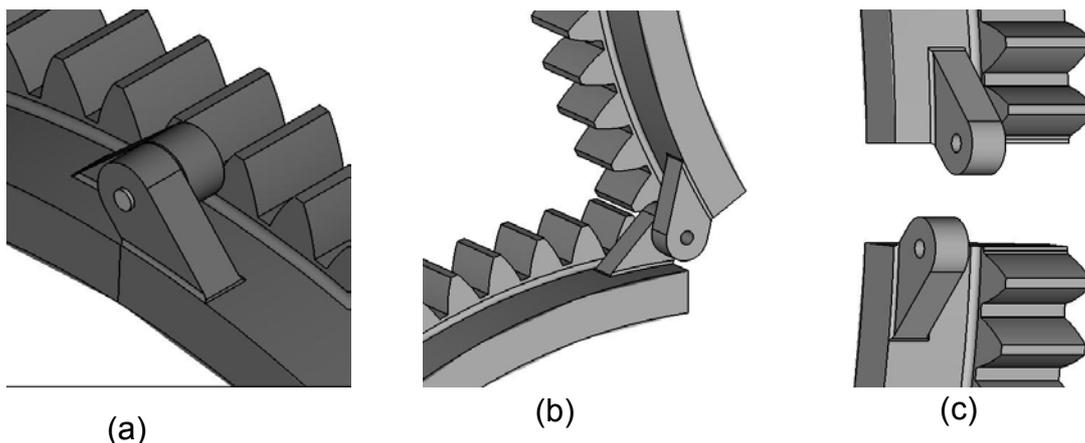


Figura 4.17 - Detalhe da articulação da cremalheira circular bipartida, (a) Detalhe da articulação, (b) Detalhe da abertura, (c) Detalhe do encaixe

Além de fixar o dispositivo no duto a cremalheira circular tem uma outra função de, juntamente com as rodas guias, manter o mecanismo móvel do

dispositivo estável sobre toda estrutura. Para executar essa função a parte interna da cremalheira circular apresenta uma conicidade com uma inclinação de 15° coerente com a inclinação das rodas guias, as quais vão desenvolver a trajetória interna da cremalheira circular.

Eixo sincronizador

O eixo sincronizador, é um dos componentes do subconjunto sistema de transformação de movimento, sendo responsável pela transformação do movimento de rotação em movimento linear, Figura 4.18. Esse elemento consiste de um eixo com ranhuras com passo p_z e ângulos de avanço $+\lambda$ e $-\lambda$, determinados de forma que os movimentos de rotação e translação do carro bobinador estejam sincronizados com a deposição da fibra impregnada na superfície do duto. No capítulo subsequente, será feito uma análise para determinar os ângulos de avanço mais adequados para alcançar esse objetivo. As características do eixo sincronizador são: material aço 1040, diâmetro externo $d = 20$ mm e comprimento $L = 1430$ mm.

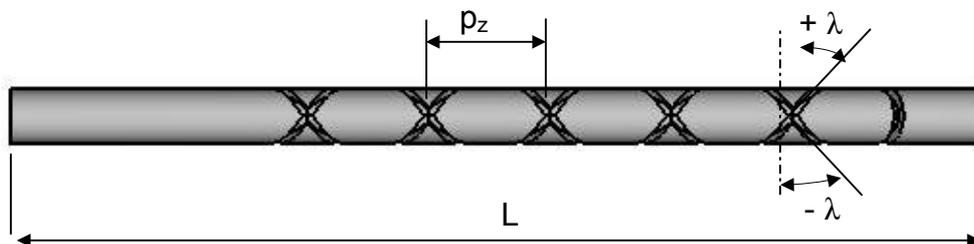


Figura 4.18 – Eixo sincronizador

Carro Bobinador

O carro bobinador, representado na Figura 4.11, é o elemento responsável pelo armazenamento e impregnação da fita na resina, o qual deve ter um reservatório estanque de resina e um suporte para o carretel da fita. O carro bobinador deve se deslocar longitudinalmente em relação o eixo sincronizador, e de forma alternada, de maneira a depositar várias camadas do composto fibra/resina sobre o duto.

Os componentes que compõem a configuração carro bobinador estão apresentados nas Figura 4.19 e são denominados da seguinte forma:

- (1) Reservatório da resina;
- (2) Tampa de envase;

- (3) Tampa lateral removível e transparente;
- (4) Tampa lateral remoção opcional;
- (5) Rolo de impregnação;
- (6) Suporte para o carretel da fita;
- (7) Rolo para direcionar a fita.

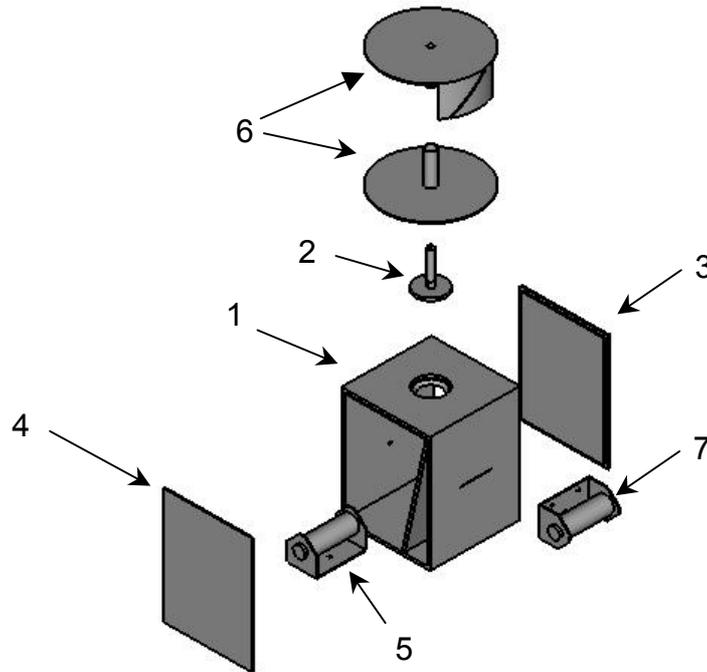


Figura 4.19 - Vista explodida esquerda do carro bobinador detalhado

Para manter a estanqueidade no carro bobinador, o reservatório de resina Figura 4.20 é projetado com duas câmaras distintas. Uma câmara maior onde deve ser depositada a resina, denominada de reservatório principal e uma segunda câmara menor, denominada de reservatório secundário, com a intenção de reter a resina que venha a vazar do reservatório principal. Nesses dois reservatórios devem ser colocados internamente retentores de borracha nas aberturas de forma a garantir a estanqueidade das câmaras.

Para garantir a impregnação total da fita na resina foi acoplado no interior do reservatório principal um rolo que facilitará a impregnação da fita, assim como o seu deslocamento dentro do reservatório. Do lado externo do reservatório, foi também acoplado um rolo, que tem como função direcionar a fita que vem do suporte do carretel para a entrada do reservatório de resina. Outras características menos relevantes para o funcionamento adequado do carro bobinador foram

atendidas, a fim de facilitar a instalação e a operação do DRD, como, por exemplo: tampas laterais removíveis, para facilitar o posicionamento da fita no carro bobinador e, uma das tampas lateral transparente, para facilitar o controle da quantidade de resina no reservatório durante a operação

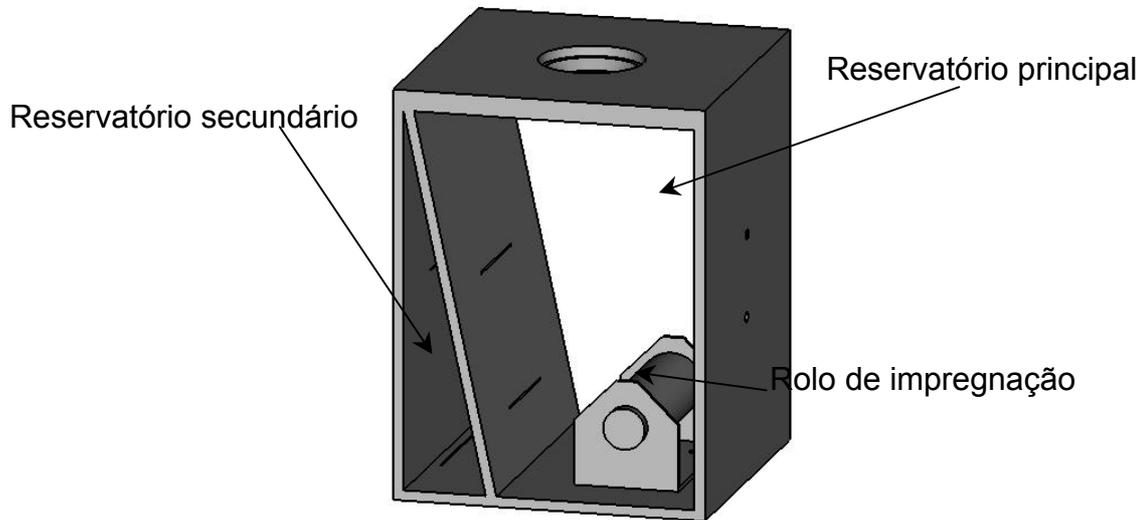


Figura 4.20 - Detalhe do reservatório do carro bobinador

Suportes de fixação

Os suportes de fixação são os elementos que compõem o subconjunto sistema de fixação, o qual serve para fixar a estrutura do dispositivo ao duto. Esses elementos têm comprimento variável L de forma a possibilitar a instalação do dispositivo em dutos com diâmetros diferentes. Esses elementos deverão ser confeccionados em aço 1020.

A configuração dos suportes de fixação está detalhada na Figura 4.21, onde se apresentam os componentes integrantes do mesmo:

- (1) Base do suporte de fixação;
- (2) Elemento de fixação na cremalheira circular;
- (3) Luva de variação do comprimento;
- (4) Luva de restrição do movimento de translação.

A base do suporte de fixação, é o componente que se deslocará linearmente variando o comprimento do suporte. Este deslocamento será gerado pela luva de variação de comprimento, os quais são conectados através de uma rosca. O elemento de fixação da cremalheira circular, está conectado na parte interna na luva de variação de comprimento sem restrição de movimento. O

movimento de translação será restringido pela luva de restrição do movimento de translação, e a extremidade oposta será fixada na cremalheira circular.

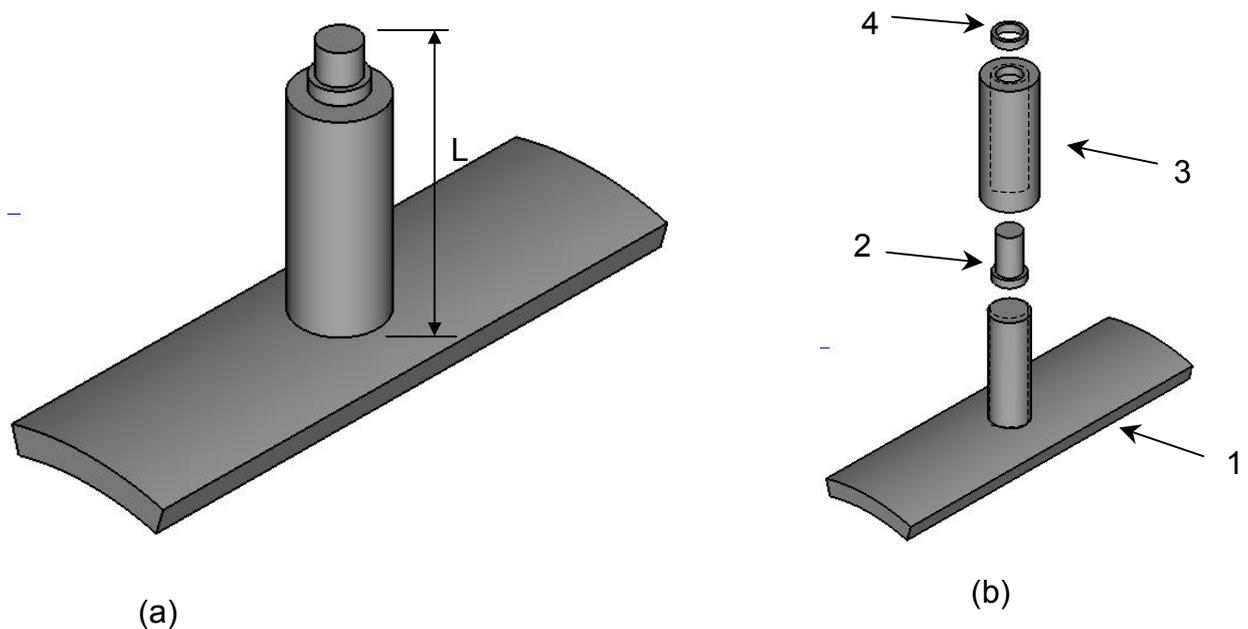


Figura 4.21 – (a) suporte de fixação, (b) suporte de fixação – vista explodida

Rodas guias

As rodas guias acopladas as bases dos eixos servem para apoiar e guiar o subconjunto móvel do dispositivo sobre a cremalheira circular, Figura 4.22. As rodas guias atuam como apoio do mecanismo móvel do dispositivo tanto na direção radial quanto na direção longitudinal devido a sua inclinação de 15° na base de apoio à cremalheira. Essa configuração permite que essas rodas restrinjam movimento longitudinal do subconjunto móvel do dispositivo quando o DRD trabalha em uma direção inclinada.

As rodas guias serão padronizadas, escolhidas de acordo com o que é oferecido pelo mercado ou fabricadas para este fim.

Base móvel do carro bobinador

A base móvel do carro bobinador serve para acoplar o carro bobinador aos eixos guia e sincronizador, a fim de que, o carro bobinador desenvolva os movimentos determinados pelos eixos. Na base móvel do carro bobinador está fixo um pino guia o qual se deslocará dentro das ranhuras do eixo sincronizador. Basicamente, esse elemento é formado por dois mancais deslizantes que estão

acoplados aos eixos, sendo que no mancal do eixo sincronizador será fixado o pino guia.

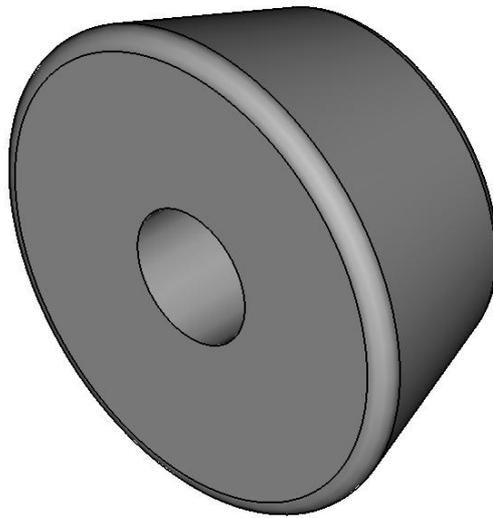


Figura 4.22 – Roda guia

A Figura 4.23 mostra a configuração da base móvel do carro bobinador detalhada, apresentando todos os seus componentes:

- (1) Corpo da base móvel do carro bobinador;
- (2) Mancal deslizante do eixo guia;
- (3) Mancal deslizante do eixo sincronizador;
- (4) Suporte do pino guia;
- (5) Pino guia.

O pino guia (5), se deslocará dentro das ranhuras do eixo sincronizador fazendo com que o carro bobinador desenvolva um movimento linear em relação ao eixo sincronizador, já que a base móvel também está acoplada ao eixo guia. O pino guia, visto mais detalhadamente na Figura 4.24, apresenta uma liberdade de movimento rotacional livre de 120 graus em torno de si mesmo. Esse movimento faz com que, quando a ranhura do eixo sincronizador alterar o ângulo de avanço, o pino guia consiga acompanhar este movimento mudando o sentido de deslocamento da base móvel do carro bobinador.

A base móvel do carro bobinador terá uma função fundamental na deposição da fita impregnada, pois o carro bobinador estará acoplado na mesma, por isso, o seu movimento deverá estar em sincronismo com os outros componentes do dispositivo.

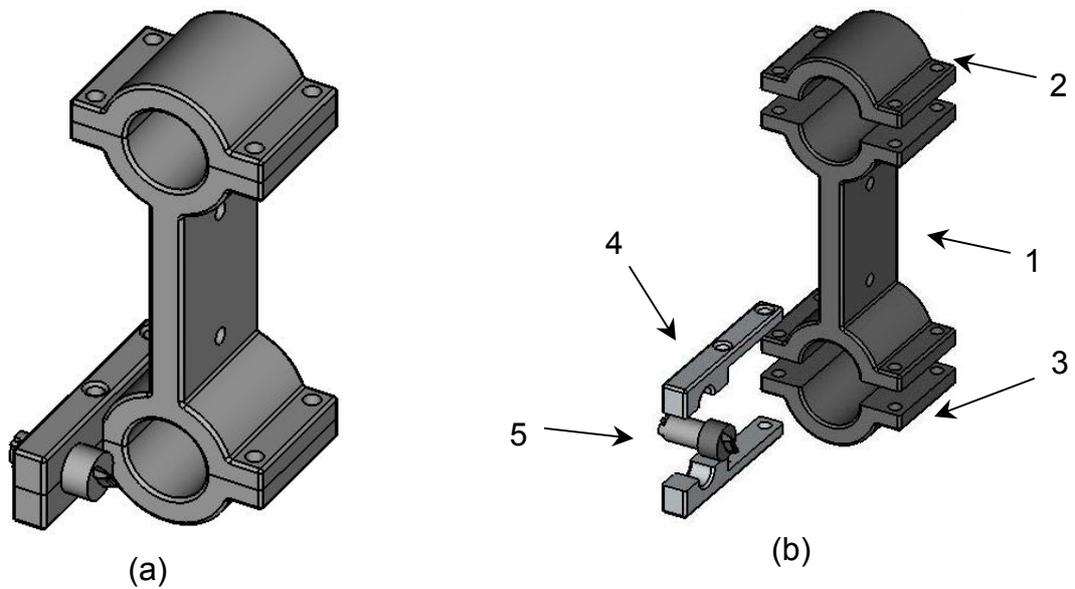


Figura 4.23 – (a) base móvel do carro bobinador detalhada (b) vista explodida da base móvel do carro bobinador

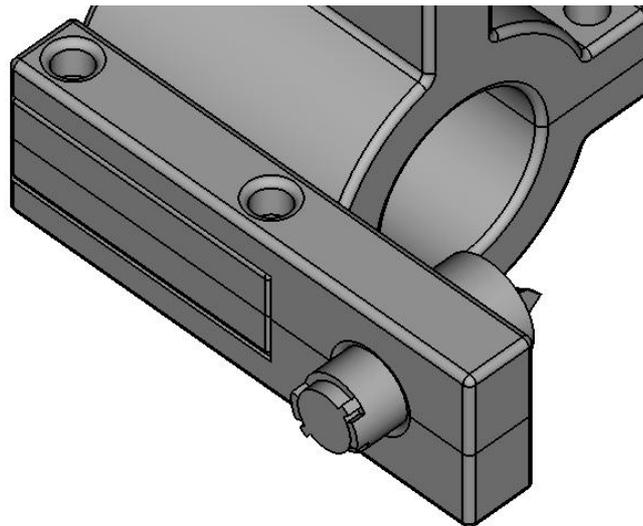


Figura 4.24 - Detalhe do pino guia

Base fixa de suporte do sistema de acionamento

A base fixa de suporte do sistema de acionamento, Figura 4.25, serve para fixar o subconjunto sistema de acionamento nos eixos guia e sincronizador, para que o conjunto acompanhe o movimento de rotação da parte móvel do dispositivo. Esse elemento será formado basicamente por uma placa, onde será fixo o conjunto, e por dois mancais com rolamentos de esfera que estarão acoplados aos eixos.

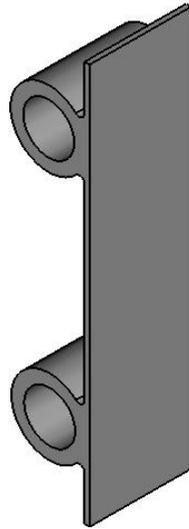


Figura 4.25 – Base de suporte do motor

Neste capítulo uma configuração preliminar do DRD, foi desenvolvida através de uma metodologia convencional de projeto, na qual se utilizou varias ferramentas aplicadas em desenvolvimento de produto. Essas ferramentas foram utilizadas em três fases definidas durante o capítulo que foram o projeto informacional, projeto conceitual e projeto preliminar.

A partir dessa configuração preliminar do DRD, será analisada no próximo capítulo a sua viabilidade técnica. A partir de um estudo sobre seu funcionamento, sincronismo de movimento e de uma configuração geométrica mais adequada. Essa análise será realizada a partir de um modelo geométrico, o qual será primeiramente validado através de submodelos de mecanismos conhecidos e semelhantes aos presentes no dispositivo, para em seguida ser realizada a análise do dispositivo considerando todos os seus subsistemas.

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO TÉCNICA DO DRD

5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DO DRD

Para validar o modelo geométrico do dispositivo restaurador de dutos, o dispositivo foi dividido em três submodelos, de maneira que fosse possível comparar os resultados de cada um deles com soluções analíticas. Dessa forma, supõe-se que, se os resultados obtidos em cada submodelo separadamente estão corretos, os resultados do modelo completo do dispositivo também o serão. Esses submodelos são mecanismos semelhantes ao utilizados na configuração do modelo do dispositivo restaurador de dutos.

Para verificar a validação desses submodelos, os mesmos foram simulados e analisados pelo software Dynamic Designer for SolidWorks 2000. Essas análises têm por objetivo determinar a velocidade angular e o torque de cada submodelo a partir de dados iniciais conhecidos, como geometria, velocidade de rotação e esforço aplicado.

A avaliação das velocidades angulares nos submodelos, de acordo com a forma e a funcionalidade do modelo, foi verificada a partir da teoria dos trens de engrenagens. Trem de engrenagens é uma combinação de diversas engrenagens, para que, com uma dada velocidade angular de entrada, se determine facilmente a velocidade angular de saída e seu sentido. Essa relação de velocidades angulares de entrada e saída é conhecida como relação de velocidades angulares, e é expressa como W_e/W_s . Um trem de engrenagens pode ser apresentado com eixos fixos de rotação em todas as engrenagens, ou com uma ou mais engrenagens planetárias, ou seja, estas não só giram em torno de seu centro, como também giram em torno de um outro. Este último caso é chamado de trem de engrenagens planetárias, Mabie et al. (1980).

Os parâmetros que estão envolvidos nestas análises comparativas de cada submodelo são: geometria, número de dentes da engrenagem, e passo e diâmetro do eixo sincronizador. Nesta primeira etapa de aferição dos submodelos, parâmetros como número de dentes, são aqueles obtidos no projeto preliminar apresentado no capítulo anterior, e os valores de velocidades são valores arbitrários utilizados somente na verificação dos submodelos. Esses valores foram arbitrados a

partir de alguns atributos do usuário, como, por exemplo, como a velocidade de deposição necessária para o DRD (ver Tabela 4). Os valores definitivos destes parâmetros serão definidos após algumas análises, nas quais serão verificados sincronismo e funcionalidade do dispositivo.

Para a verificação de cada submodelo, estipulou-se que a velocidade do mecanismo móvel do dispositivo² em torno do duto será de 6 rpm, de forma a ter-se uma velocidade de deposição do material dentro dos limites desejáveis pelo usuário. Conseqüentemente, cada ciclo será simulado em um tempo de 10 segundos.

A divisão do dispositivo em submodelos pode ser observada na Figura 5.1.

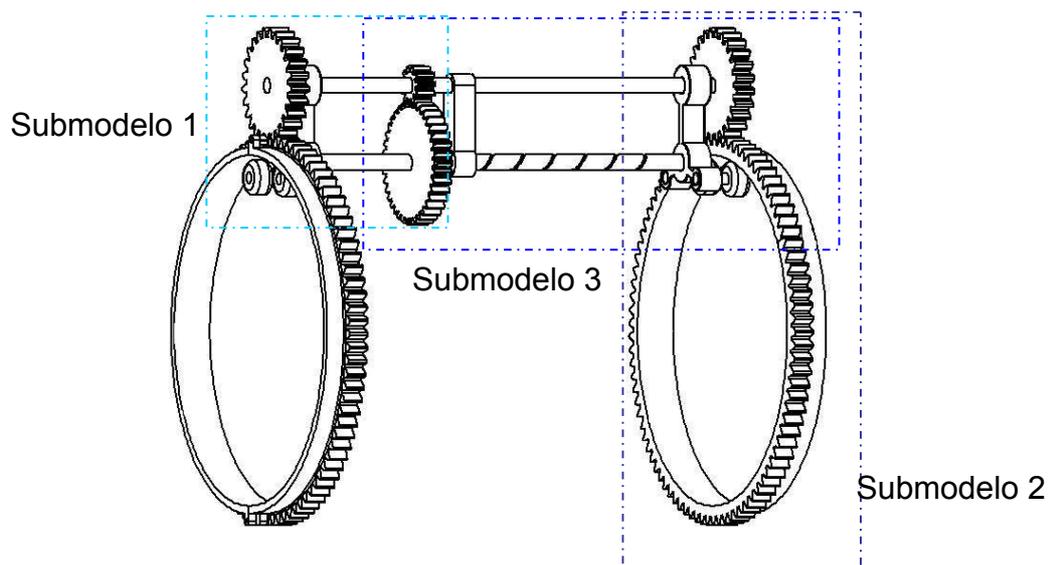


Figura 5.1 – Divisão do modelo do dispositivo em submodelos

5.1.1 Avaliação do submodelo 1

O submodelo 1 é uma configuração geométrica que busca representar as características de movimento de um trem engrenagens que se apresenta no mecanismo do DRD. A função desse trem de engrenagens é transmitir movimento de rotação do eixo guia para o eixo sincronizador, e é composto pela engrenagem do eixo sincronizador, engrenagem do eixo guia e as engrenagens das cremalheiras circulares. No submodelo 1, será representada apenas uma das engrenagens das cremalheiras circulares, já que as mesmas são idênticas e desenvolvem a mesma função.

² Conjunto formado por componentes do DRD que desenvolvem movimento translação circular em torno do duto tais como: eixo sincronizador, eixo guia e os respectivos componentes acoplados aos mesmos.

Este submodelo faz parte do mecanismo móvel do dispositivo, sendo assim, as engrenagens além de desenvolver movimento de rotação em torno de seu eixo desenvolvem também movimento em torno do eixo do duto, o que caracteriza um movimento planetário.

Sendo assim, a velocidade da engrenagem do eixo sincronizador não será a mesma velocidade do mecanismo móvel que é de 6 rpm. Para completar o ciclo completo do mecanismo móvel do dispositivo no tempo de 10 segundos da simulação, A velocidade calculada *a priori* é de $W_1 = 6,18$ rpm.

O submodelo 1 consiste de um trem de engrenagens compostas, Figura 5.2, formado pela engrenagem do eixo guia (2), engrenagem do eixo sincronizador (1) e engrenagem da cremalheira circular (3), com número de dentes $Z_2 = 11$, $Z_1 = 38$ e $Z_3 = 25$. Nesta análise, são avaliadas as transmissões de velocidade angular (W) e de torque (T), onde os dados iniciais são arbitrários tais como: velocidade angular $W_1 = 6,18$ rpm. Com essa velocidade arbitrada, pode-se determinar a velocidade na engrenagem da cremalheira circular (3), a qual é responsável pelo movimento de translação circular do dispositivo.

Para a avaliação da transmissão de torques neste submodelo 1, arbitrou-se um torque na engrenagem 3 de $T_3 = 100$ Nmm.

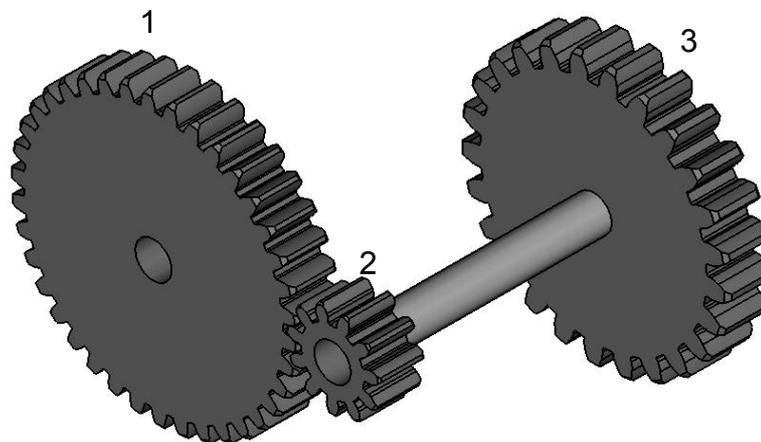


Figura 5.2 – Submodelo 1 utilizado na aferição do modelo do DRD

Neste submodelo, duas dessas engrenagens são consideradas compostas. Uma engrenagem é considerada composta quando duas ou mais engrenagens estão fixas num mesmo eixo, mantendo assim a mesma velocidade angular, $W_3 = W_2$.

5.1.1.1 Cálculo da velocidade angular no submodelo 1

Resultado analítico:

Para o cálculo da velocidade angular deste submodelo, foi considerada a relação de engrenagens para um par de engrenagens cilíndricas externas de dentes retos. Logo, a relação de velocidades angulares é inversamente proporcional ao número de dentes e, as engrenagens giram em sentidos opostos, o que é indicado pelo sinal negativo na relação de velocidades.

$$\frac{W_e}{W_s} = \frac{W_1}{W_2} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (5.1)$$

Substituindo os dados conhecidos, a velocidade W_2 encontrada é:

$$W_2 = -21,34 \text{ rpm} \quad (5.2)$$

Resultado do modelo:

| Entrada | Processo | Saída |
|--------------------------|---|----------------------------|
| $W_1 = 6,18 \text{ rpm}$ |  | $W_2 = -21,34 \text{ rpm}$ |

5.1.1.2 Cálculo da transmissão de torque no submodelo 1

Resultado analítico:

O torque será calculado pelo equilíbrio de torques nas engrenagens compostas para posteriormente, ser calculado o torque na engrenagem 1 através da relação de engrenagens. No caso das engrenagens compostas, o torque resultante nessas engrenagens tem a mesma intensidade, ou seja, $T_2 = T_3 = 100 \text{ Nmm}$. O torque na engrenagem 1 é calculado pela relação entre as engrenagens 1 e 2, e é dado por (ver anexo III):

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (5.3)$$

Substituindo os dados conhecidos, o torque T_1 encontrado é:

$$T_1 = 345,5 \text{ Nmm} \quad (5.4)$$

Resultado do modelo:

| Entrada | Processo | Saída |
|-------------------------|----------|---------------------------|
| $T_3 = 100 \text{ Nmm}$ | → | $T_1 = 345,5 \text{ Nmm}$ |

5.1.2 Avaliação do submodelo 2

O submodelo 2 é uma configuração geométrica que busca representar as características de movimento de um trem engrenagens planetárias que se apresenta no mecanismo do DRD. A função desse trem de engrenagens é transmitir movimento de translação circular entre a cremalheira circular e o mecanismo móvel do dispositivo. No submodelo 2 será representado um braço de ligação entre as engrenagens, para que se possa melhor entender, os cálculos analíticos estão apresentados no anexo III.

Dessa forma, o submodelo 2 consiste de um trem de engrenagens planetárias, conforme ilustrado na Figura 5.3. Neste tipo de trem de engrenagens, a engrenagem 2 é chamada de solar e a engrenagem 1 é chamada de planetária, Mabie et al. (1980). O braço 3 impele a engrenagem 1 em torno da engrenagem 2, que é uma engrenagem externa fixa. Como pode ser observado, a engrenagem 1 gira em torno do seu centro A, enquanto este centro gira em torno do centro B. A determinação da relação de velocidades angulares em um trem planetário é mais complexa do que em um trem simples devido à rotação dupla da planetária. O método analítico utilizado na verificação do modelo foi o método de Fórmula, Mabie et al. (1980). Outros métodos podem também ser utilizados para determinar a relação de velocidades angulares: o método de centro instantâneo e o método de tabulação, Mabie et al. (1980).

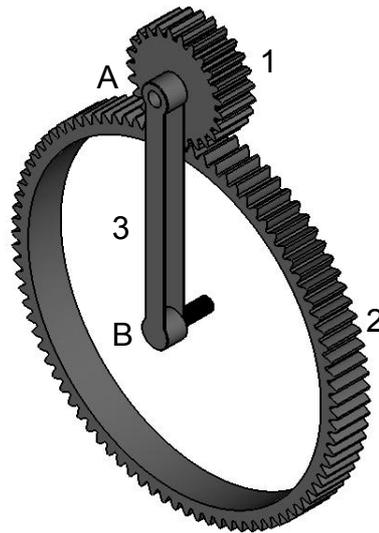


Figura 5.3 – Submodelo 2 utilizado na aferição do modelo do DRD.

É definido como W_{12} , a velocidade angular da engrenagem 1 relativo a engrenagem 2, W_{13} a velocidade angular da engrenagem 1 relativo ao braço 3 e W_{32} a velocidade angular do braço 3 relativo a engrenagem 2. Neste submodelo, são avaliadas a transmissão de velocidade angular e a transmissão de torque resultante na engrenagem 1. Seguindo o mesmo procedimento utilizado no submodelo 1, pode-se então utilizar a velocidade angular da engrenagem da cremalheira circular retirada no submodelo 1 e utiliza-la como a velocidade angular. Sendo assim, $W_{13} = 21,34$ rpm e os números de dentes das engrenagens 1 e 2 são: $Z_1 = 25$ e $Z_2 = 89$.

5.1.2.1 Cálculo da velocidade angular do submodelo 2

Resultado Analítico:

Para o cálculo da velocidade angular neste submodelo, foi considerada a relação de engrenagens para um trem de engrenagens planetárias. No cálculo analítico foi considerado que, para a engrenagem 1 dar uma volta completa em torno da engrenagem 2 com a velocidade angular de W_{13} , a velocidade angular do braço 3 em relação à engrenagem 2 deve ser $W_{32} = 6$ rpm, que seria a velocidade do mecanismo móvel do dispositivo em relação ao duto.

A expressão que fornece a relação entre as velocidades angulares é da forma (ver anexo III):

$$W_{12} = W_{32} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (5.5)$$

Substituindo os dados conhecidos, a velocidade W_{12} encontrada é:

$$W_{12} = 27,36 \text{ rpm} \quad (5.6)$$

Resultados do Modelo:

| Entrada | Processo | Saída |
|------------------------------|----------|------------------------------|
| $W_{13} = 21,34 \text{ rpm}$ | → | $W_{12} = 27,36 \text{ rpm}$ |

5.1.2.2 Cálculo da transmissão de torque no submodelo 2

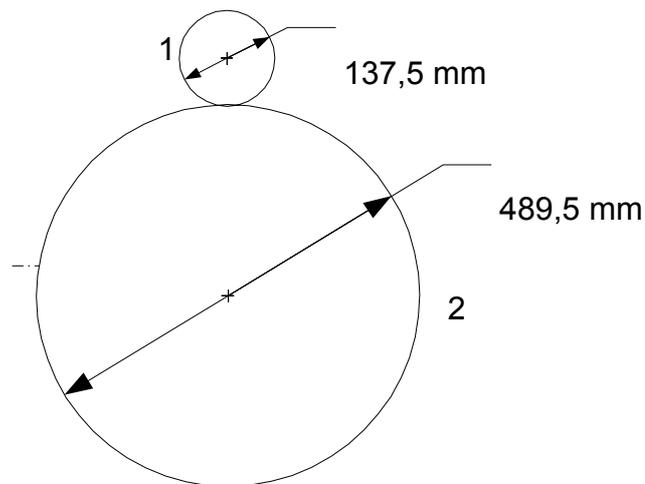


Figura 5.4 – Diâmetros primitivos das engrenagens do submodelo 2

A transmissão de torque foi analisada em duas situações diferentes. Primeiramente é aplicado no sistema apenas um torque conhecido numa das engrenagens, sem levar em consideração nenhuma massa do sistema. Na segunda análise, se considera uma massa conhecida no sistema sem nenhum torque inicial aplicado.

Resultado Analítico com Aplicação de um Torque Conhecido:

Neste caso, como ilustrado na Figura 5.5, deseja-se saber qual o torque que deve ser aplicado no ponto A, T_A , de forma que o torque atuante na engrenagem 1 seja de $T_1 = T_{13} = 100 \text{ Nmm}$. A expressão que fornece a relação entre os torques é da forma (ver anexo III):

$$T_A = T_{13} \cdot \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (5.7)$$

Substituindo os valores na eq. (5.7), temos o torque que deve ser aplicado no eixo em A de maneira que a engrenagem 1 tenha um torque de 100 Nmm:

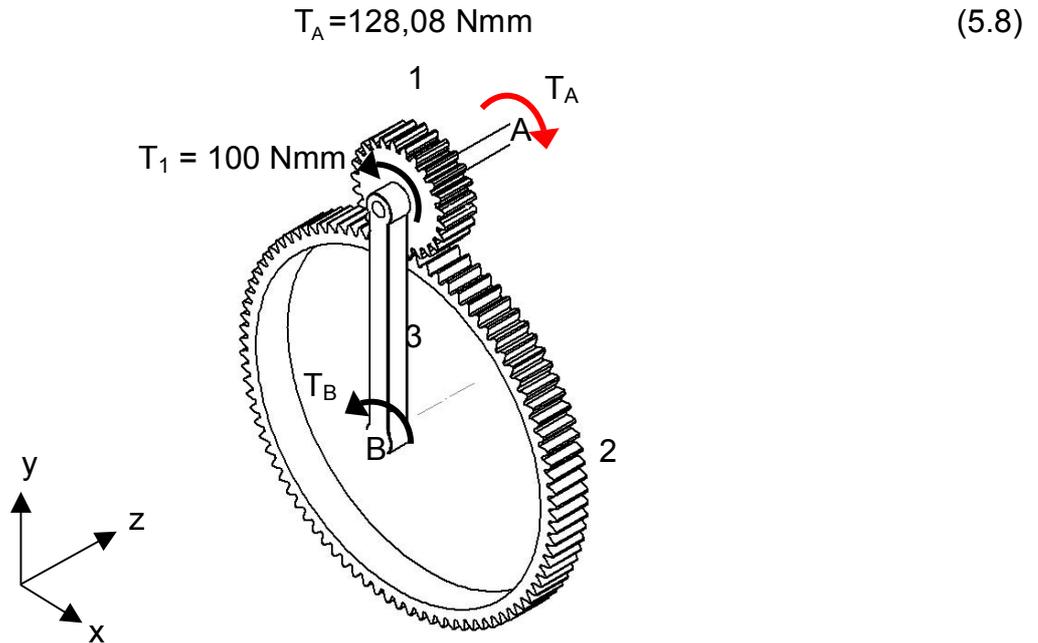


Figura 5.5 – Representação dos torques atuantes no submodelo 2

Resultados do Modelo:

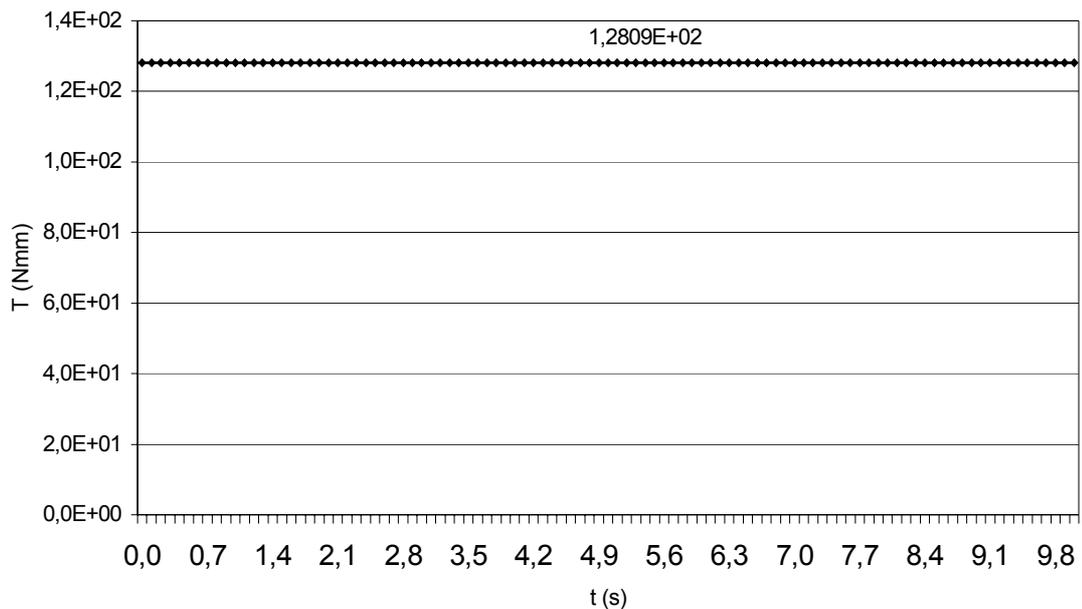


Figura 5.6 – Evolução do torque T_A no submodelo 2

Resultado Analítico Considerando uma Massa Conhecida:

Para o cálculo do torque neste caso, é considerada somente uma massa arbitrária de 10 kg acoplada à engrenagem 1, com uma aceleração gravitacional de $9,81 \text{ m/s}^2$ atuando no sistema.

O modelo geométrico foi simulado num tempo de 10 segundos. Para um melhor entendimento da evolução dos esforços neste submodelo, esta simulação foi subdividida em quatro estágios com intervalos de 2,5 segundos, como mostra a Figura 5.7.

Os esforços atuantes neste submodelo são assim denominados:

F_c = Força centrífuga;

F_p = Força peso;

F_t = Força tangente atuando na interface entre as engrenagens 1 e 2;

T_B = Torque em relação à B (centro da engrenagem 2);

T_A = Torque em relação à A (centro da engrenagem 1).

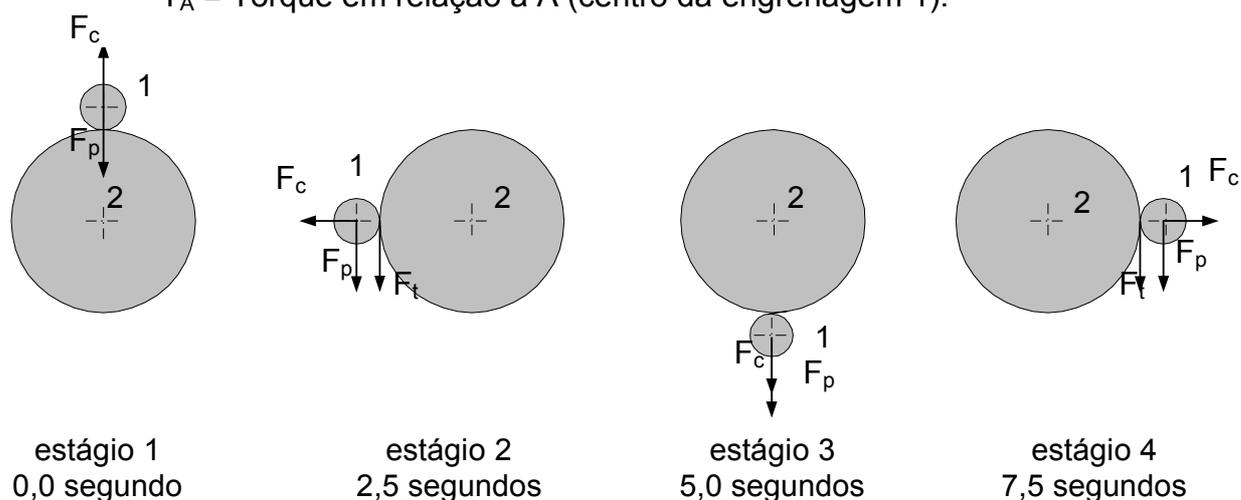


Figura 5.7 – Posições da engrenagem 1 nos diferentes estágios analisados

Considerando que o torque máximo no ponto B ocorrerá nos estágios 2 e 4 e será somente devido à força peso de 98,1 N e, considerando que a distância entre eixos é 313,5 mm (ver Figura 5.4), o valor desse torque é:

$$T_{B \text{ maximo}} = |98,10 \text{ N} \cdot 313,5 \text{ mm}| = 30,75 \text{ kNmm} \quad (5.9)$$

A força tangente atuando na interface entre as engrenagens 1 e 2 pode então ser calculada:

$$F_t = \left| \frac{30,75 \text{ KNmm}}{244,75 \text{ mm}} \right| = 125,66 \text{ N} \quad (5.10)$$

onde 244,75 mm, é o raio da engrenagem 2. Logo, o torque máximo atuante em A, no momento em que o torque B é máximo é:

$$T_A = |125,66 \text{ N} \cdot 68,75 \text{ mm}| = 8,64 \text{ kNmm} \quad (5.11)$$

onde 68,75 mm é o raio da engrenagem 1.

Resultados do Modelo³:

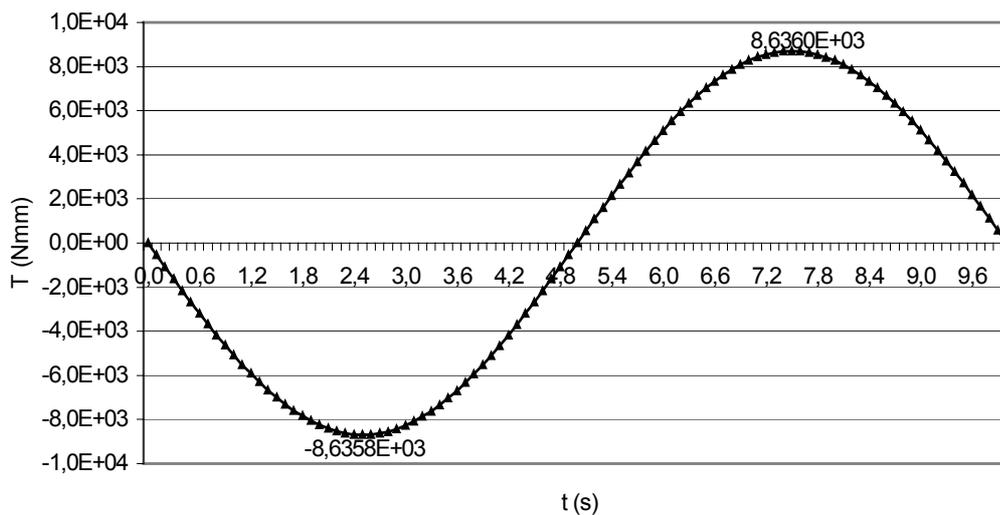


Figura 5.8 – Evolução do torque reativo T_A no submodelo 2

³ Os resultados apresentados nas figuras são os torques reativos

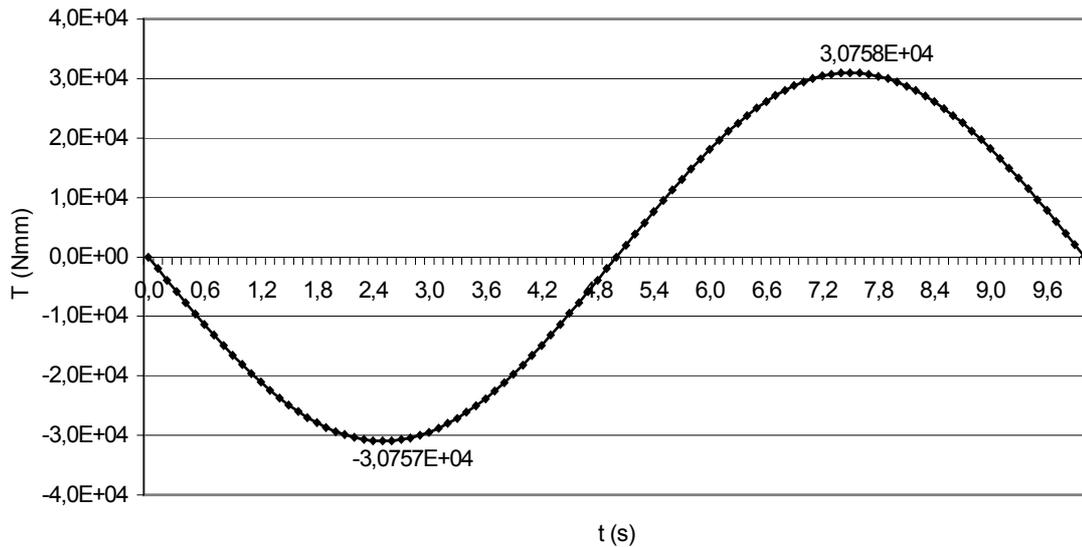


Figura 5.9 – Evolução do torque reativo T_B no submodelo 2

5.1.3 Avaliação do Submodelo 3

O submodelo 3 é uma configuração geométrica que busca representar as características do mecanismo responsável em transformar um movimento de rotação em um movimento de translação linear.

Esse submodelo, Figura 5.10, consiste de um trem de engrenagens simples com as mesmas dimensões do submodelo 1, com $Z_1 = 11$ e $Z_2 = 38$, onde a engrenagem motora (1) está acoplada ao eixo guia (5), a engrenagem do eixo sincronizador (2) está acoplada ao eixo sincronizador (3) e, a base móvel onde será colocado do carro bobinador (4) está acoplada aos eixos guia (5) e sincronizador (3). São considerados também duas bases fixas (6), necessárias para manter o acoplamento entre os componentes.

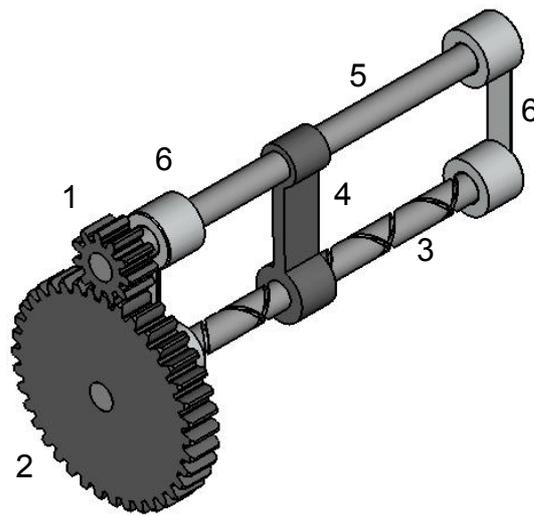


Figura 5.10 – Submodelo 3 utilizado na aferição do modelo do DRD

Os resultados do modelo foram retirados de uma simulação com um tempo de 10 segundos. A relação de velocidades angulares entre as engrenagens 1 e 2 deste modelo é a mesma aferida no submodelo 1. Portanto neste caso, será aferida somente a transmissão de torque para a engrenagem motora (1), gerada pelo deslocamento linear da base móvel do carro bobinador (4) a partir do movimento de rotação do eixo sincronizador (3).

5.1.3.1 Cálculo da transmissão de torque no submodelo 3

Resultado analítico:

Para o cálculo da transmissão de torque para a engrenagem (1) a partir do torque necessário para pelo deslocar a base móvel do carro bobinador (4), o eixo sincronizador (3) foi considerado como sendo um parafuso de potência com um equilíbrio de forças esquematizado como mostra a Figura 5.11.

A força F_a , chamada força de arrasto gerada pelo atrito entre o mancais deslizantes da base móvel do carro bobinador e os eixos guia (5) e sincronizador (3), é uma força oposta ao movimento da base móvel do carro bobinador (4). A força F_a foi determinada no submodelo considerando um estágio crítico, onde a força resultante gerada pelo peso do carro bobinador estaria aplicada totalmente sobre o eixo sincronizador (3), com um coeficiente de atrito dos mancais deslizantes em relação aos eixo sincronizador (3) e eixo guia (5) de $\mu_e = 0,1$.

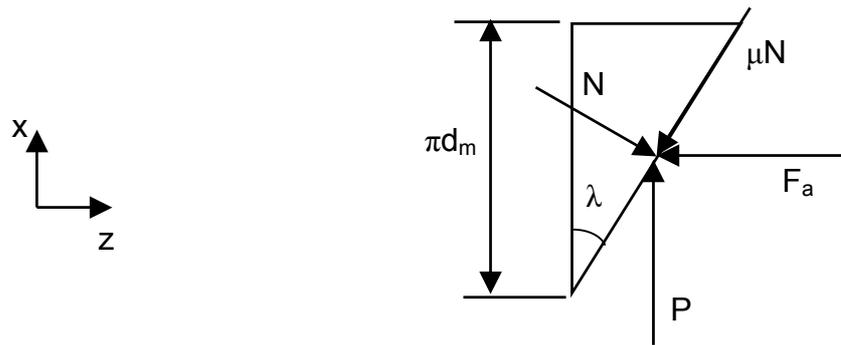


Figura 5.11 - Forças na superfície da parede da ranhura

onde as forças envolvidas nesta análise são assim denominadas:

F_a = Força de arrasto da base móvel do carro bobinador;

P = Força do pino sobre a parede da ranhura;

N = Reação normal à parede da ranhura;

μ = coeficiente de atrito entre o pino e a parede da ranhura;

λ = Ângulo de avanço;

d_m = diâmetro médio do eixo sincronizador.

Impondo o equilíbrio das forças nas direções z e x temos:

$$F_a = N (\cos \lambda - \mu \operatorname{sen} \lambda) \quad (5.12)$$

$$P = N (\operatorname{sen} \lambda + \mu \cos \lambda) \quad (5.13)$$

Dividindo a eq. (5.13) pela eq. (5.12), temos:

$$P = F_a \frac{\operatorname{sen} \lambda + \mu \cos \lambda}{\cos \lambda - \mu \operatorname{sen} \lambda} \quad (5.14)$$

Considerando a força de arrasto, $F_a = 20$ N, o ângulo de hélice $\lambda = 34,75$ (ver § 5.2), o coeficiente de atrito entre o pino e a parede da ranhura $\mu = 0$ e o diâmetro médio do eixo sincronizador $d_m = 17$ mm, o torque no eixo sincronizador T_e , necessário para impulsionar a base do carro bobinador é:

$$T_e = -F_a \left(\frac{\text{sen}\lambda + \mu \cos\lambda}{\cos\lambda - \mu \text{sen}\lambda} \right) \frac{d_m}{2} \quad (5.15)$$

Substituindo os dados conhecidos, o torque no eixo sincronizador T_e é:

$$T_e = -117,93 \text{ Nmm} \quad (5.16)$$

Resultados do modelo:

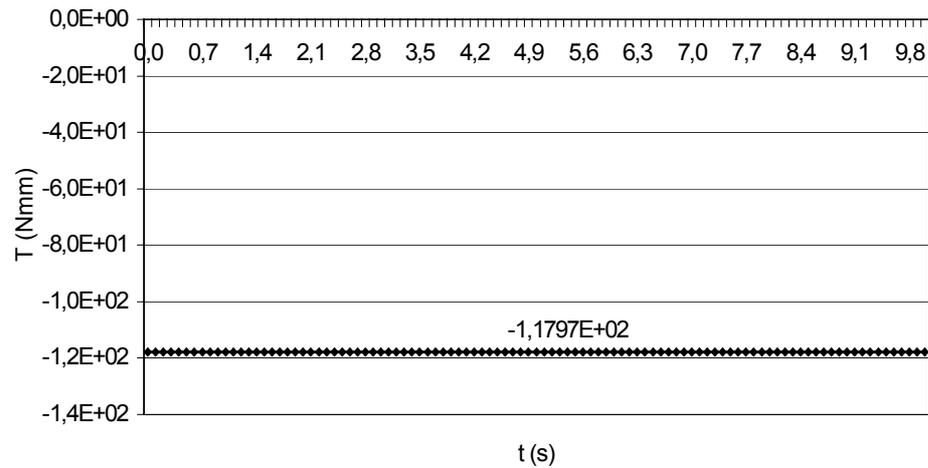
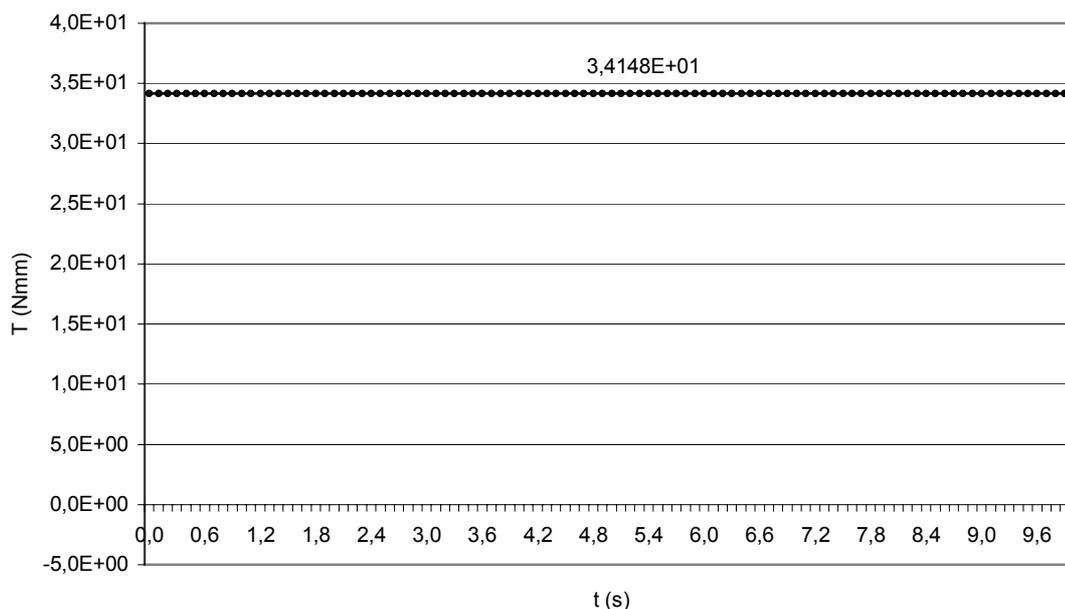


Figura 5.12 - Evolução do torque T_e no eixo sincronizador.

Determinado o torque solicitado no eixo sincronizador para deslocar o carro bobinador longitudinalmente, sendo esse eixo acoplado à engrenagem (2) e, considerando o equilíbrio de torques no eixo sincronizador, $T_e = T_2 = -117,93 \text{ Nmm}$, que conseqüentemente é transmitido para a engrenagem motora 1 de acordo com a eq. (5.3), tem se que:

$$T_1 = 34,14 \text{ N.mm} \quad (5.17)$$

Resultados do modelo:Figura 5.13 - Evolução do torque T_1 na engrenagem motora 1

5.2 AVALIAÇÃO DO MECANISMO DO DRD

Para determinar as relações de engrenagens adequadas para o modelo, foram levados em consideração vários fatores que poderiam interferir na funcionalidade e no sincronismo do equipamento. De acordo com o princípio de funcionamento do dispositivo, a cada volta que o eixo sincronizador completar em torno do duto, o carro bobinador deve se deslocar longitudinalmente de uma distância equivalente à largura da fita, permitindo uma sobreposição da mesma como citado anteriormente. Esse movimento se dará pela interação entre as ranhuras do eixo sincronizador e o pino guia fixado à base do carro bobinador. Dessa forma, os movimentos de rotação do eixo sincronizador em torno de si mesmo, o de rotação desse eixo em torno do duto e o movimento longitudinal do carro bobinador em relação ao eixo, devem estar sincronizados.

Algumas restrições tiveram que ser respeitadas na determinação da relação de movimento. As principais restrições são a largura da fita que é ofertada pelo mercado e o raio livre de trabalho entre o equipamento e o duto a ser restaurado. Este raio livre é considerado como sendo a distância entre o centro do duto e o diâmetro externo da engrenagem do eixo sincronizador, conforme ilustrado

na Figura 5.14. Dessa forma, para que não exista interferência entre o dispositivo e o duto a ser restaurado, a eq. (5.18) deve ser considerada.

$$R_l = dc_1 - (dc_2 + R_{es}) \quad (5.18)$$

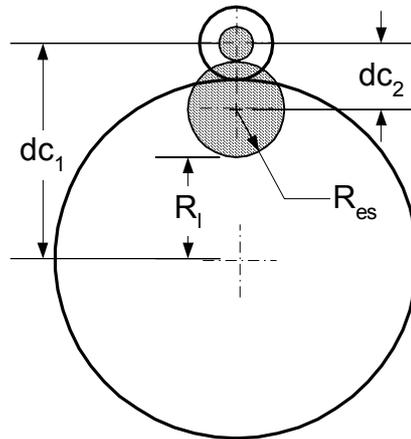


Figura 5.14 – Representação geométrica do raio livre.

onde:

R_l = Raio livre;

dc_1 = Distância entre centros da cremalheira circular e da engrenagem da cremalheira circular;

dc_2 = Distância entre centros das engrenagens do eixo sincronizador e do eixo guia;

R_{es} = Raio da engrenagem do eixo sincronizador.

O raio livre foi estipulado para um diâmetro máximo de duto a ser restaurado, de forma que a faixa de diâmetros de dutos possíveis de serem restaurados fosse a maior possível. Sendo assim, para determinar essa relação para o protótipo proposto, foram fixados os seguintes parâmetros:

Diâmetro da cremalheira circular = 500 mm

Largura da fita utilizada = 50 mm

Diâmetro máximo do duto = 250 mm

Diâmetro do eixo sincronizador = 20 mm

Outra restrição importante a ser considerada é o ângulo de avanço do eixo sincronizador, que devido ao movimento alternado do carro bobinador, exige do eixo sincronizador dois sentidos de avanço. Este ângulo deve estar disposto nos dois sentidos, $+\lambda$ e $-\lambda$, Figura 5.15.

Na região onde as ranhuras se cruzam, pode ocorrer um problema de inversão indesejada do sentido do movimento do pino guia antes do final do curso da ranhura. Na Figura 5.15, estão ilustradas algumas disposições dessas ranhuras para diferentes ângulos de avanço, para que posteriormente seja avaliada aquela que melhor se adapte ao sincronismo desejado do dispositivo.

Obviamente, um ângulo de avanço ideal seria aquele que permitisse o avanço do pino guia na direção longitudinal, e que, na região do cruzamento das ranhuras, evitasse a inversão indesejada do sentido do movimento do carro bobinador. O ângulo ótimo para essa situação seria um ângulo de avanço de 45° , onde as ranhuras estariam perpendiculares no cruzamento, dificultando assim que o pino guia mudasse o sentido do movimento.

Na Figura 5.15, observa-se que, quanto maior o passo, maior o ângulo de avanço, para um mesmo diâmetro do eixo sincronizador. Sendo assim, deve-se determinar a geometria para o eixo sincronizador que se aproxime de um ângulo de avanço de 45° , e que respeite as restrições impostas anteriormente.

A partir da fixação desses parâmetros, foram avaliadas as relações de engrenagens que atendessem aos requisitos de sincronismo do dispositivo e de não interferência de seus componentes. Nesse caso, duas variáveis foram consideradas livres: o diâmetro da engrenagem da cremalheira circular (3), e a relação de diâmetros das engrenagens do eixo sincronizador (2) e do eixo guia (1), Figura 5.16.

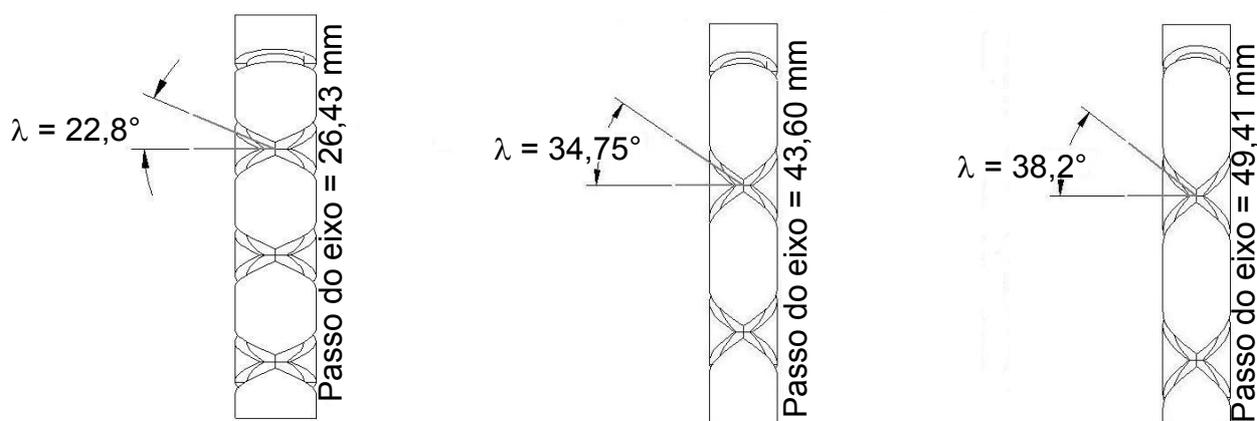


Figura 5.15 – Variação do ângulo de avanço no eixo sincronizador

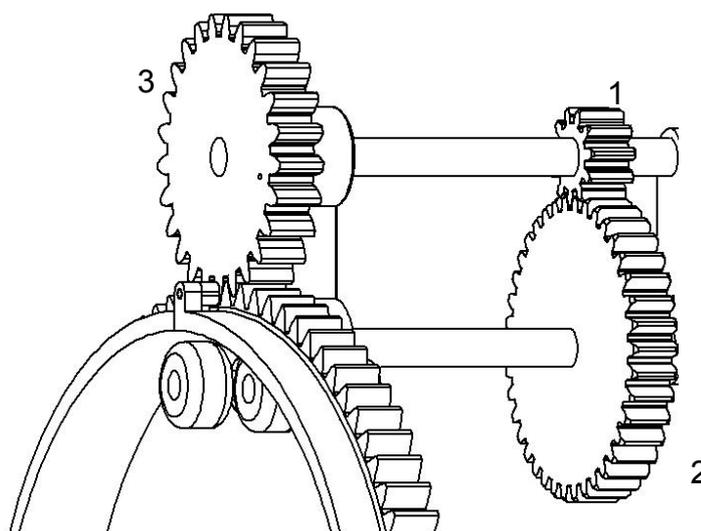


Figura 5.16 – Representação das variáveis de análise

A engrenagem da cremalheira circular (3), foi avaliada com dois diâmetros externos diferentes, e o diâmetro da engrenagem do eixo guia (1) foi fixado em 52 mm, deixando apenas o diâmetro da engrenagem do eixo sincronizador (2) variando. O diâmetro da engrenagem do eixo guia (1) fixado em 52 mm, é o menor valor possível, estipulado em função da altura de seus dentes.

A variável livre, diâmetro externo da engrenagem do eixo sincronizador, foi avaliada entre os valores 92 a 180 mm, sempre levando em conta todas as relações do restante do mecanismo. Os ângulos de avanço obtidos dessa análise se apresentam na Tabela 5.1 e estão graficamente representados na Figura 5.17.

Tabela 5.1 – Ângulo de avanço do eixo sincronizador

| | d_{es} (mm) | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 180 | 172 | 160 | 152 | 140 | 132 | 120 | 112 | 100 | 92 |
| $d_{ec} = 148,5$ (mm) | 38,18 | 36,86 | 34,75 | 33,36 | 31,11 | 29,55 | 27,12 | 25,43 | 22,81 | 21,01 |
| $d_{ec} = 121,0$ (mm) | 32,18 | 30,96 | 29,07 | 27,78 | 25,77 | 24,40 | 22,28 | 20,83 | 18,60 | 17,08 |
| | λ (°) | | | | | | | | | |

Onde:

d_{es} – Diâmetro da engrenagem do eixo sincronizador (2)

d_{ec} - Diâmetro da engrenagem da cremalheira circular (3)

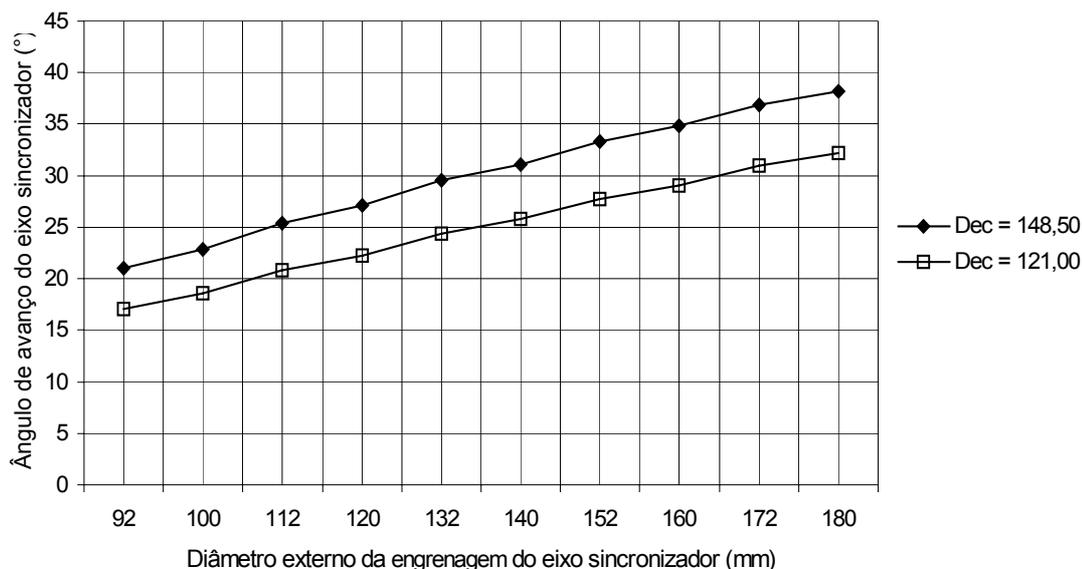


Figura 5.17 – Ângulo de avanço *versus* diâmetro da engrenagem do eixo sincronizador

Nessa primeira análise foi determinada a relação de engrenagens mais adequada para que o passo do eixo sincronizador proporcionasse ao carro bobinador um deslocamento de aproximadamente 45 mm no sentido longitudinal a cada revolução do eixo. Esse deslocamento é referente à largura da fita que é de 50 mm, com isso, a cada passo do bobinamento ocorrerá uma sobreposição da fita para que não ocorra falha no revestimento. De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.17, quanto maior o diâmetro das engrenagens avaliadas, maior será o ângulo de avanço. Sendo assim, a relação de engrenagens que nos proporcionaria um ângulo de avanço mais próximo do ideal, 45° , é: $d_{es} = 180$ mm e $d_{ec} = 148,5$ mm.

Nessa primeira análise, não foi no entanto, avaliado o raio livre de trabalho do dispositivo em relação ao duto restaurado. Este parâmetro será analisado posteriormente usando os mesmos valores dos diâmetros de engrenagens obtidos nessa análise .

O raio livre de trabalho será avaliado de acordo com o diâmetro máximo de duto definido anteriormente. Sendo assim, a relação mais adequada ao mecanismo será aquela que mais se aproximar de um raio livre de 125 mm, equivalente ao raio do duto de maior diâmetro a ser restaurado pelo DRD. Essa análise está representada graficamente na Figura 5.18.

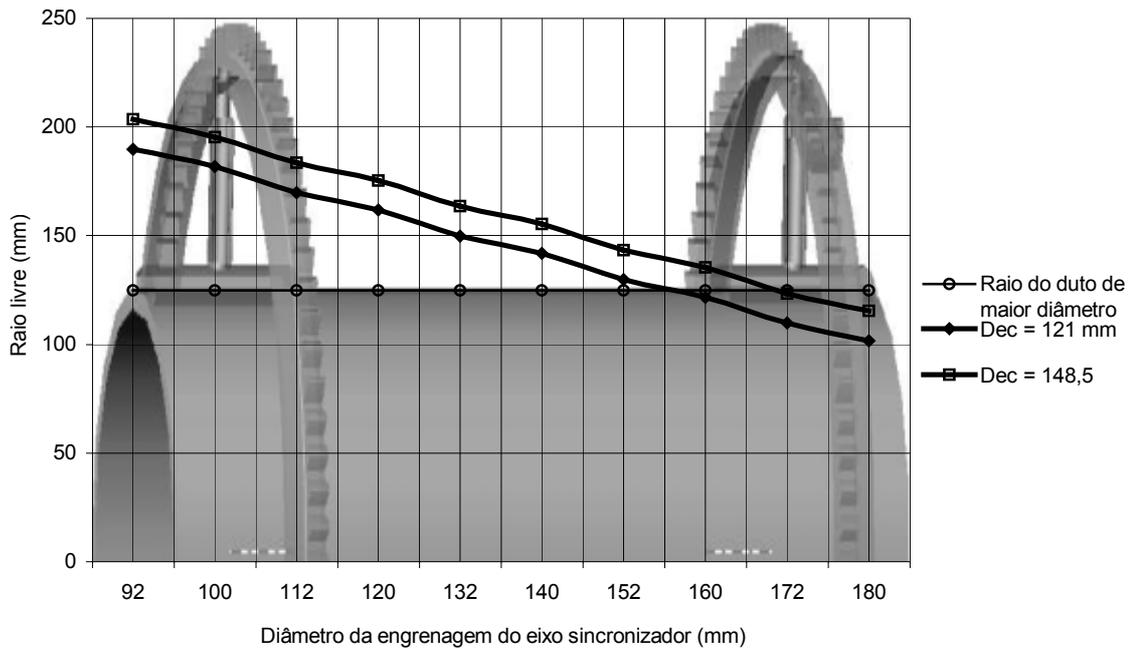


Figura 5.18 – Raio livre *versus* diâmetro da engrenagem do eixo sincronizador.

De acordo com os resultados obtidos nessa análise, levando em consideração os resultados obtidos anteriormente, os parâmetros que mais atendem aos requisitos, se mostrando mais eficientes na funcionalidade do mecanismo do dispositivo foram os seguintes:

Diâmetro externo da engrenagem da cremalheira circular = 148,5 mm

Diâmetro externo da engrenagem do eixo sincronizador = 160 mm

Ângulo de avanço do eixo sincronizador $\lambda = 34,75^\circ$

Com os resultados obtidos nesta análise, o passo do eixo sincronizador foi determinado como, (ver Figura 5.19):

$$p_z = \tan \lambda \cdot \pi \cdot d \quad (5.19)$$

Substituindo os dados conhecidos, o passo p_z é:

$$p_z = 43,60 \text{ mm} \quad (5.20)$$

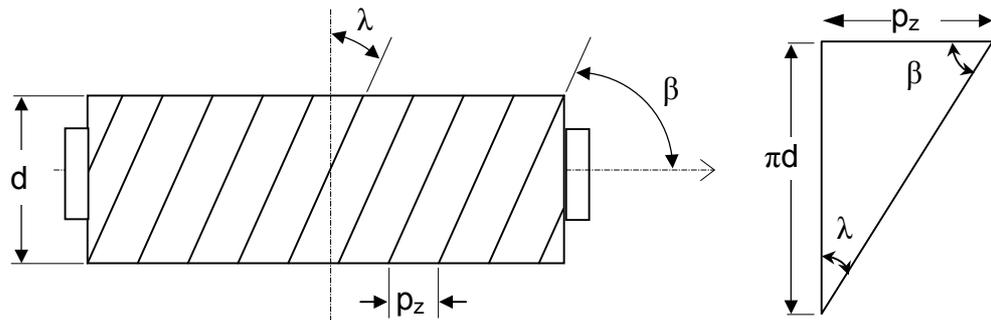


Figura 5.19 – Parâmetros geométricos do eixo sincronizador.

onde os parâmetros geométricos do eixo sincronizador são assim denominados:

- d = diâmetro do eixo sincronizador;
- p_z = passo da ranhura do eixo sincronizador;
- λ = ângulo de avanço;
- β = ângulo de hélice;

Sendo assim, os valores dos parâmetros geométricos do eixo sincronizador ficaram definidos como sendo:

- passo $p_z = 43,60$ mm;
- diâmetro $d = 20$ mm;
- ângulo de avanço $\lambda = 34,7^\circ$.

5.3 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR DO DRD

Após a avaliação do dispositivo no que diz respeito à geometria de seus componentes, de forma a obter o sincronismo dos mecanismos com a deposição da fibra impregnada sobre a superfície do duto, é possível agora avaliar a potência necessária que deverá ter o motor para acionar o dispositivo. Assim, o torque no motor pode ser determinado levando em consideração a massa de todos os componentes do dispositivo conforme mostrado na Tabela 5.2. A massa total do dispositivo pode ser determinada da forma.

$$\text{Massa Total} = \sum_{i=1}^m (Q_i \cdot M_i) \quad (5.21)$$

onde Q_i representa a quantidade da peça i no dispositivo, M_i a massa da mesma e m é o número de peças.

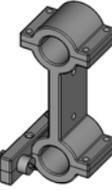
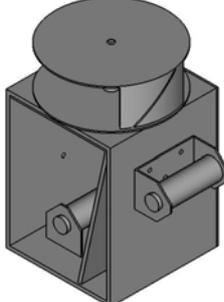
De acordo com a eq.(5.21), a massa total dos componentes é de 49,60 kg. A massa do material fibra/resina foi calculada segundo dados da Tabela 3.1, para uma deposição de 8 camadas em um duto de 250 mm de diâmetro e um comprimento longitudinal da área degradada do duto de 1040 mm (ver Figura 5.26). Para esses dados, as massas necessárias de fibra e de resina são respectivamente 9,75 kg e 4,50 kg (ver ANEXO IV).

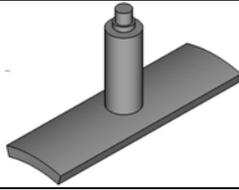
A massa dos componentes de acionamento foi considerada ser de 4 kg para a bateria e 2,6 kg para o motor. Esses valores poderão ser reajustados em função da especificação do motor e conseqüentemente da bateria. Para a simulação do modelo geométrico foi considerado a aceleração da gravidade de $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Para determinar a potência exigida no motor, foi considerado que a velocidade angular do carro bobinador em torno do duto é de 6 rpm e, a velocidade angular da engrenagem motora é de 21,34 rpm (ver § 5.2). Portanto, considerando todos esses dados no modelo geométrico de todo o dispositivo, é possível obter o torque máximo exigido pela engrenagem motora e a potência requerida para o motor.

Está análise foi feita considerando o DRD em 2 diferentes posições: horizontal e inclinada (45°).

Tabela 5.2 – Descrição das características dos componentes do DRD

| Geometria | Denominação | Qtde | Subconjunto | Volume (m ³) | Densidade (kg/m ³) | Massa (kg) |
|---|------------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------|
|  | Engrenagem da cremalheira circular | 02 | Mecanismo móvel do dispositivo | $3,6 \cdot 10^{-4}$ | 7800 | 2,81 |
| | Engrenagem do eixo sincronizador | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $4,4 \cdot 10^{-4}$ | 7800 | 3,44 |
| | Engrenagem do eixo guia | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $3,0 \cdot 10^{-5}$ | 7800 | 0,24 |
| | Engrenagem do motor | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $3,0 \cdot 10^{-5}$ | 7800 | 0,24 |
|  | Eixo sincronizador | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $4,2 \cdot 10^{-4}$ | 7800 | 3,23 |
|  | Eixo guia | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $4,7 \cdot 10^{-4}$ | 7800 | 3,70 |
|  | Base dos eixos | 02 | Mecanismo móvel do dispositivo | $1,6 \cdot 10^{-4}$ | 7800 | 1,30 |
|  | Base móvel do carro bobinador | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $1,2 \cdot 10^{-4}$ | 7800 | 0,94 |
|  | Carro Bobinador | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | 1175 | 0,17 |
|  | Base fixa do conjunto acionador | 01 | Mecanismo móvel do dispositivo | $4,0 \cdot 10^{-5}$ | 7800 | 0,32 |
| | | | | | | |

| Geometria | Denominação | Qtde | Subconjunto | Volume (m ³) | Densidade (kg/m ³) | Massa (kg) |
|--|----------------------|------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------|
|  | Eixo da roda guia | 04 | Mecanismo móvel do dispositivo | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | 7800 | 0,08 |
|  | Roda guia | 04 | Mecanismo móvel do dispositivo | $4,0 \cdot 10^{-5}$ | 1387 | 0,06 |
|  | Cremalheira circular | 02 | Subconjunto do sistema de fixação | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | 7800 | 10,20 |
|  | Suporte de fixação | 06 | Subconjunto do sistema de fixação | $1,8 \cdot 10^{-4}$ | 7800 | 1,41 |

5.3.1 Análise de torque e potência do DRD na posição horizontal

As Figura 5.20 e Figura 5.21 apresentam respectivamente a evolução do torque e da potência na engrenagem motora com o dispositivo colocado na posição horizontal, de acordo com os resultados do modelo geométrico de todo o DRD.

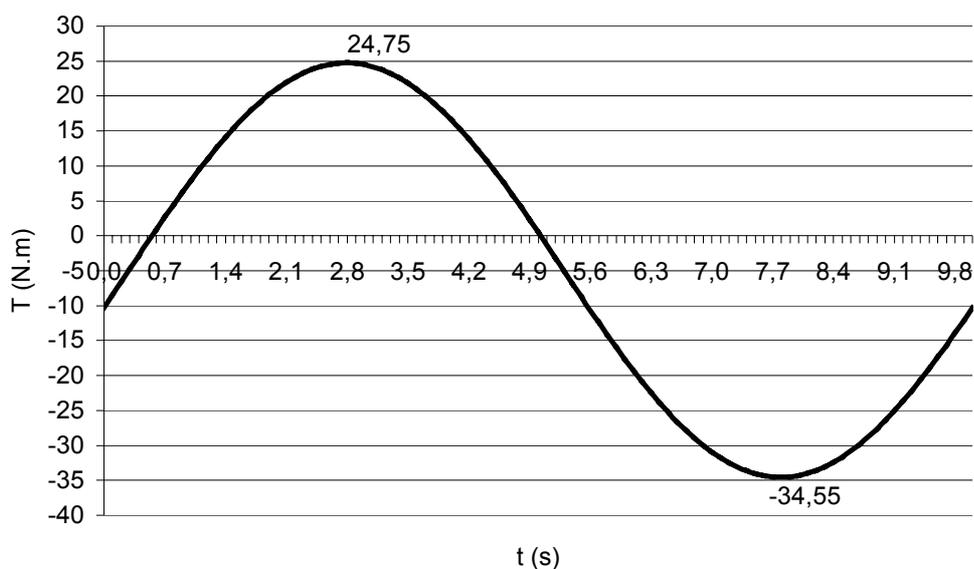


Figura 5.20 – Evolução do torque na engrenagem motora (posição horizontal).

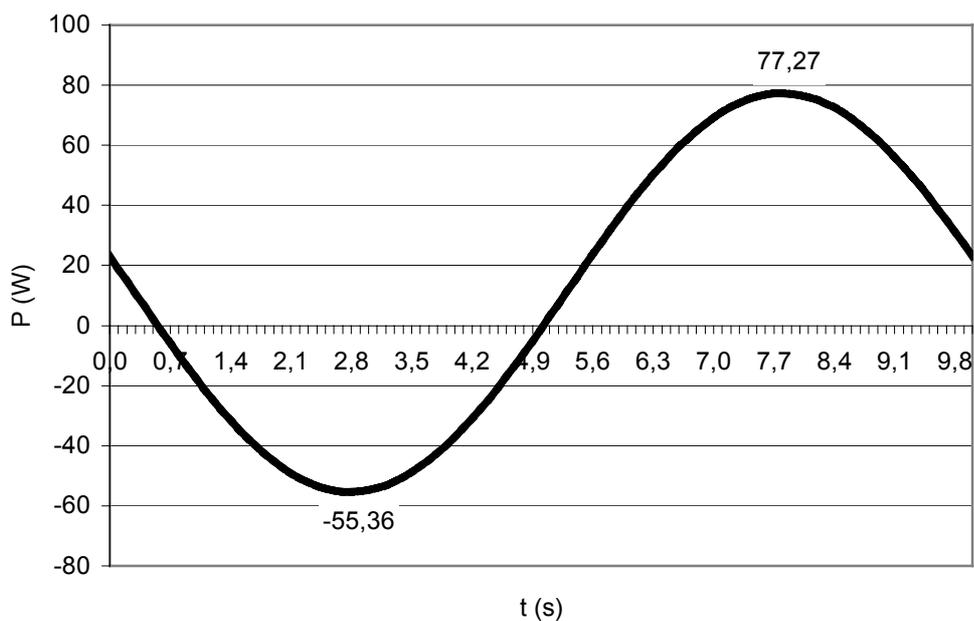


Figura 5.21 – Evolução da potência na engrenagem motora (posição horizontal).

Analisando os resultados dos gráficos apresentados, o torque máximo solicitado pelo DRD na posição horizontal é de $T_m = 34,55 \text{ Nm}$ e a potência máxima necessária é de $P_m = 77,27 \text{ W}$.

5.3.2 Análise de torque e potência do DRD na posição inclinada

Nas Figura 5.22 e Figura 5.23, estão representadas respectivamente a evolução do torque e da potência na engrenagem motora com o dispositivo colocado numa posição inclinada (45°), de acordo com os resultados do modelo geométrico de todo o DRD.

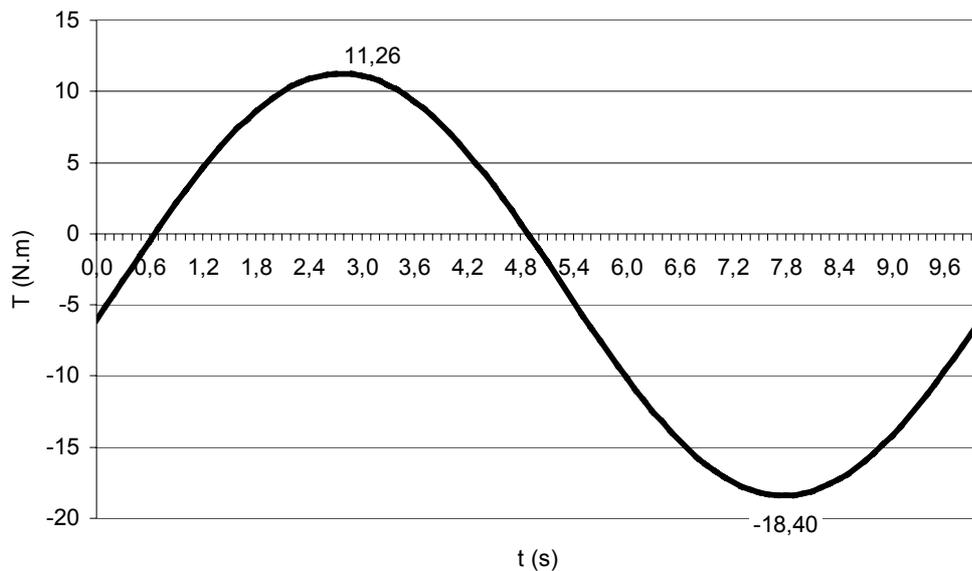


Figura 5.22 - Evolução do torque na engrenagem motora (posição inclinada).

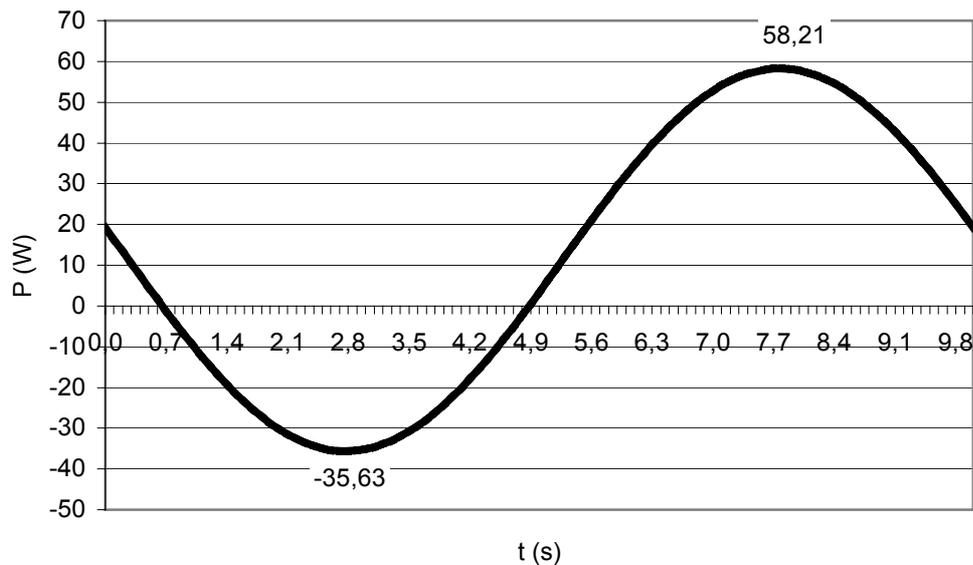


Figura 5.23 - Evolução da potência na engrenagem motora (posição inclinada).

Analisando os resultados dos gráficos apresentados, o torque máximo solicitado, para o DRD na posição inclinada é de $T_m = 18,40$ Nm, e a potência máxima necessária é de $P_m = 58,21$ W.

Neste caso, onde o dispositivo se encontra numa posição inclinada, surge uma carga axial nas rodas guias sobre a cremalheira devido a uma componente do peso do mecanismo móvel do dispositivo. Esses esforços não foram simulados por deficiência do software, no entanto, como o maior torque solicitado nas simulações surgiu sempre devido ao movimento de translação do mecanismo móvel do dispositivo, estes esforços não alterariam significativamente os resultados da análise. Mesmo assim, a especificação do motor será definida pelos resultados de um torque de maior valor, como determinado na análise do DRD na posição horizontal.

Com os valores máximos solicitados pelo DRD, torque $T_m = 34,55$ Nm, e velocidade de rotação, $W_m = 21,34$ rpm exigidos pelo motor, especificou-se um motoredutor tipo CDP modelo 0 390 242 400 com as seguintes características: Torque de 50 Nm, rotação de 22 rpm e tensão do motor de 24 V (ver Anexo V).

5.4 AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO FINAL DO DRD

A avaliação da configuração final do DRD tem como objetivo verificar se todas as necessidades dos clientes colocadas como especificações de projeto apresentadas na Tabela 5.2 foram atingidas:

- ✓ A faixa de diâmetros de dutos possíveis de serem reabilitados já tinha sido estipulada ser entre os diâmetros de 100 a 250 mm,
- ✓ A largura da fita a ser utilizada no dispositivo deveria ser de acordo aquelas ofertadas pelo mercado, entre 50 e 100 mm. A fita utilizada tem largura de 50 mm,
- ✓ Da Tabela 5.2, a massa (peso) de todo o dispositivo, considerando inclusive a massa dos componentes acionadores é de 56,20 kg, menor do que 60 kg estipulado como sendo um valor limite,
- ✓ A potência encontrada necessária para impulsionar o dispositivo é de $P_m = 77,27$ W, menor do que 1 cv (735,5 W) estipulado como sendo um valor limite,
- ✓ A bateria requerida é uma bateria selada, portátil de 24 V,
- ✓ A partir da especificação da potência necessária para impulsionar o dispositivo e escolhida a bateria adequada, foi possível especificar o motor para acionamento do dispositivo, que consiste de um motoredutor compacto do tipo CDP tipo CDP modelo 0 390 242 400 da Bosch, (ver ANEXO V),
- ✓ O volume do dispositivo deveria ser pequeno o bastante tal que fosse fácil o seu transporte e o volume de escavação em torno do duto fosse também pequeno. De acordo com a Figura 5.24, o volume máximo de ocupação do DRD é de $1,16 \text{ m}^3$,

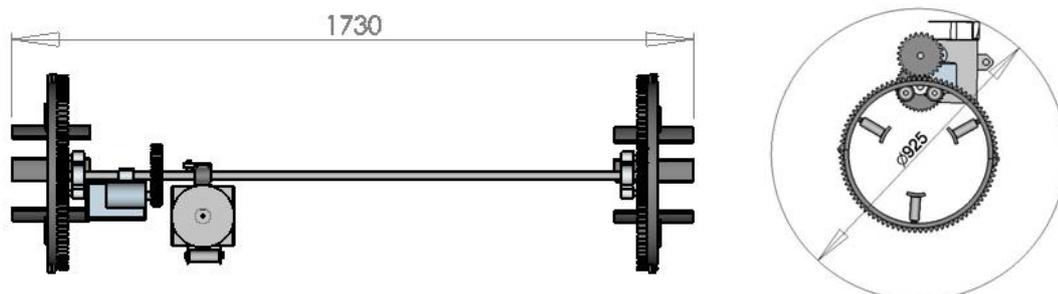


Figura 5.24 – Dimensões limites do DRD.

- ✓ A área de deposição do DRD considerando um comprimento de 1040 mm, Figura 5.25, e um diâmetro de 250 mm é de 0,82 m², maior do que 0,80 m² estipulado como sendo um valor mínimo,

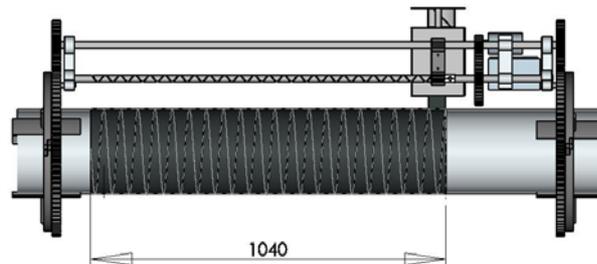


Figura 5.25 – Comprimento de bobinamento do DRD

- ✓ O controle de deposição é garantido pelo sincronismo entre os mecanismos do DRD e a deposição da fibra impregnada sobre o duto, assim como pelo temporizador,
- ✓ A impregnação automática é realizada pelo carro bobinador,
- ✓ A possibilidade do DRD trabalhar numa posição inclinada foi garantida com a inclinação da área de contato entre a roda guia com a cremalheira circular,
- ✓ Requisitos como tempo de instalação, número de comandos, capacidade de fixação e possibilidade de trabalhar numa posição inclinada poderão ser melhor avaliados a partir de testes realizados com um protótipo,
- ✓ A durabilidade do equipamento é um requisito difícil de ser avaliado até este ponto do projeto, e além disso, não há nenhum equipamento do gênero no mercado para ser fazer uma comparação. Acredita-se que este requisito poderá ser avaliado somente a partir de testes realizados com um protótipo, para a partir deles poder-se fazer uma extrapolação.
- ✓ De acordo com a Tabela 5.3, o valor de fabricação estipulado é em torno de R\$10.000,00, menor do que o valor especificado inicialmente de R\$15.000,00,

Tabela 5.3 - Custo de fabricação do DRD

| Descrição das peças | Quantidade | Custo Unitário | Custo Total |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| Cremalheira | 2 | R\$ 1.120,00 | R\$ 2.240,00 |
| Eixo guia | 1 | R\$ 175,94 | R\$ 175,94 |
| Eixo sincronizador | 1 | R\$ 364,99 | R\$ 364,99 |
| Roda guia | 4 | R\$ 15,00 | R\$ 60,00 |
| Engrenagem da cremalheira. | 2 | R\$ 91,04 | R\$ 182,08 |
| Engrenagem do Eixo guia | 1 | R\$ 82,94 | R\$ 82,94 |
| Engrenagem do Eixo sincronizador. | 1 | R\$ 102,08 | R\$ 102,08 |
| Engrenagem do Motor | 1 | R\$ 82,94 | R\$ 82,94 |
| Carro bobinador | 1 | R\$ 98,00 | R\$ 98,00 |
| Base fixa do conjunto acionador | 2 | R\$ 45,00 | R\$ 90,00 |
| Suporte de fixação | 6 | R\$ 321,51 | R\$ 1.929,06 |
| Rolamentos | 8 | R\$ 15,00 | R\$ 120,00 |
| Mancais | 6 | R\$ 10,00 | R\$ 60,00 |
| Base dos eixos | 2 | R\$ 25,00 | R\$ 50,00 |
| Motor | 1 | R\$ 70,00 | R\$ 70,00 |
| Bateria | 1 | R\$ 32,00 | R\$ 32,00 |
| temporizador | 1 | R\$ 34,00 | R\$ 34,00 |
| Base móvel do carro bobinador | 1 | R\$ 85,00 | R\$ 85,00 |
| Eixo Guia | 4 | R\$ 7,00 | R\$ 28,00 |
| Mão de obra | | | R\$ 3.800,00 |
| Total | | | R\$ 9.687,03 |

A configuração final do DRD pode ser observada na Figura 5.26 em posição de instalação, e na Figura 5.27 na posição de início de operação.

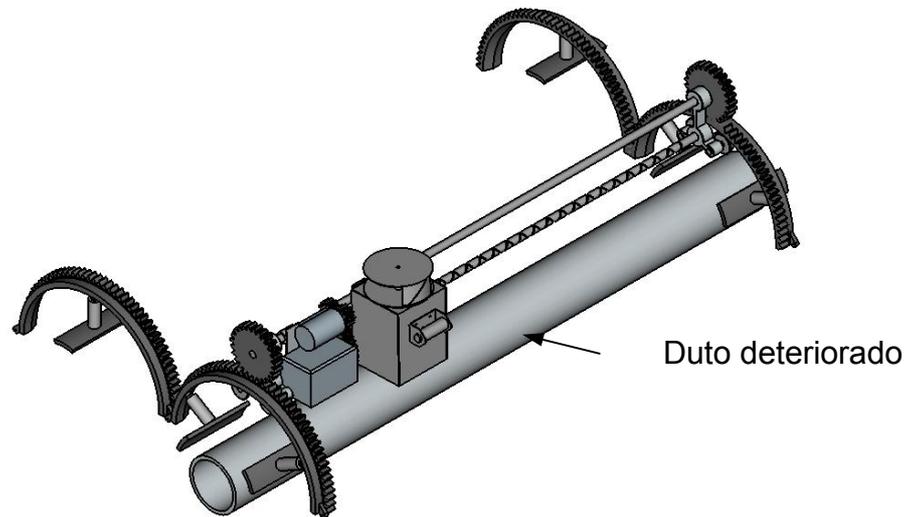


Figura 5.26 – DRD em posição de instalação.

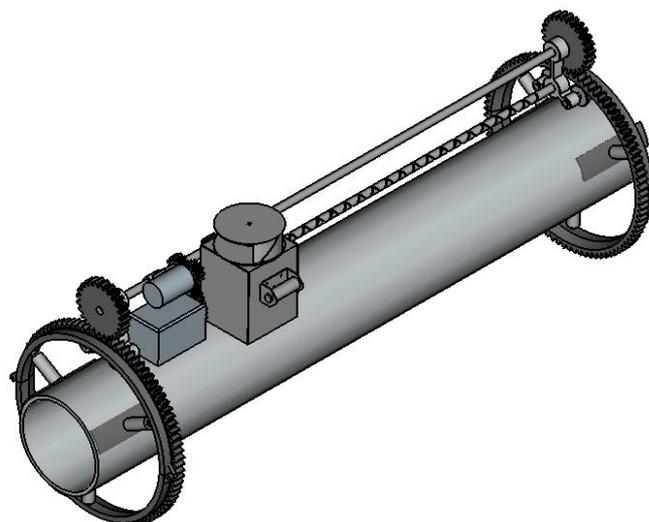


Figura 5.27 – DRD na posição de início de operação.

6 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Este trabalho teve por objetivo estudar a viabilidade de um método de restauração de elementos tubulares utilizando materiais compostos bobinados, a partir do desenvolvimento de um equipamento (DRD) concebido para esta finalidade, de forma a evidenciar as boas perspectivas do uso desses materiais nesta área da engenharia.

Neste trabalho, verificou-se através de uma revisão bibliográfica e de uma consulta à empresas envolvidas em processos de restauração de dutos que, a aplicação de materiais compostos nesta área é ainda muito recente, no entanto, dada as boas características desses materiais, principalmente em termos de resistência e peso, e de sua flexibilidade, em termos de manuseio e aplicação, que as perspectivas de utilização desses materiais são enormes. Dentre os benefícios que os materiais compostos poderiam trazer na área de reabilitação de dutos, estariam a redução no tempo de manutenção e a não necessidade de paralisação das linhas de dutos, o que conseqüentemente reduziria o custo da operação, e tornaria a operação de manutenção mais segura do que, por exemplo, a manutenção por encamisamento. Estas vantagens já foram ressaltadas em termos econômicos por órgãos americanos ligados à área como o Instituto de Pesquisa em Gás (Gas Research Institute - GRI) e a Associação Americana de Gas (American Gas Association – AGA).

Na fase de projeto do DRD, utilizando uma metodologia de projeto formada pelo projeto informacional, projeto conceitual e projeto preliminar, definiu-se a configuração do dispositivo que mais se enquadrava nas necessidades dos usuários, baseado uma configuração proposta em uma patente de Pereira (2001). No projeto informacional utilizou-se de informações adquiridas junto às empresas envolvidas em processos de restauração, seja como beneficiárias, seja como usuárias, a fim de definir as especificações de projeto do DRD.

No projeto conceitual utilizou-se de ferramentas de projeto que, a partir das quais definiu-se concepções alternativas do DRD, para em seguida ser definida a mais adequada entre elas. No projeto preliminar, com uma concepção já definida, foi feita a modelagem do mecanismo do DRD através de simulações do modelo geométrico do DRD em sua configuração final, avaliou-se a transmissão de velocidades angulares e de torques entre seus componentes, de forma a garantir o sincronismo do mecanismo do dispositivo com a deposição de fibra impregnada

sobre a superfície do duto, como também se determinou as características de seus componentes acionadores.

De forma geral, concluiu-se que as ferramentas computacionais para simulação de mecanismos num ambiente virtual, associadas com as metodologias de projeto são elementos fundamentais no projeto de um produto, de forma a reduzir o tempo de desenvolvimento e o custo final do produto. Através dos resultados obtidos das diferentes simulações realizadas, conseguiu-se avaliar a viabilidade técnica do dispositivo no que consiste as dimensões de seus componentes e as características de seus componentes acionadores.

De acordo com as avaliações feitas no item 5.4 onde todas as necessidades dos clientes foram atingidas, e juntamente com a Tabela 5.3, na qual avalia-se um custo de fabricação inferior ao declarado pelos clientes, sendo assim conclui-se que o Dispositivo Restaurador de Dutos (DRD) é plenamente viável para ser utilizado em operações de restauração de dutos.

Como perspectiva para trabalhos futuros, pretende-se:

- ✓ Aplicar as metodologias de projeto em todo ciclo de vida do produto, focalizando o tipo de transporte e a montabilidade do dispositivo de forma a melhorar ainda mais a concepção do DRD,
- ✓ Utilizar ferramentas computacionais do tipo CAE para dimensionar estruturalmente os componentes do DRD,
- ✓ Fabricar um protótipo do DRD para avaliar sua funcionalidade e, identificar e corrigir eventuais erros de projeto,
- ✓ Fazer um estudo de viabilidade econômica de forma a avaliar a potencialidade de um equipamento desse tipo no mercado consumidor.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRENACCI, A., WONG, D. and MORDARSKI, J. G., “New Developments in Joint Coating and Field Repair”, **Materials Performance**, Feb. 1999. Vol. 38, Issue 2,. p. 35-40.

AHAMMED, M. and Melchers, R. E., “Reability of Underground Pipelines Subject to Corrosion” **ASCE J. Transport Engng.** 120 (6):989-1002, 1994.

ANON. Desert project shows how big, hot line is rehabilitated. **Oil and Gas Journal**, 1993. v 91, p 58-60. Gay, D., **Matériaux Composites**, Editions Hérmes, 1991.

BACK, Nelson. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: ed. Guanabara Dois, 1983. 389 p.

BACK, N. FORCELLINI, F. **Apostila sobre projeto conceitual**. Disciplina EMC 6605, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Ufsc, 1998.

BERTHELOT, J.-M., **Matériaux Composites**. Comportement Mécanique et Analyse des Structures. Masson, 1992.

BITENCOURT, A. C. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de produto para o meio ambiente** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BURGUEÑO, R. System Characterization and Design of Modular Fiber Reinforced Polymer (FRP) Short- and Medium- span Bridges. 1999. Tese de Doutorado, University of California, San Diego.

CHUNDURU, S., BARBER, M.E and BAKER, R. M., “Buckling Behavior of Polyethylene Liner System”, **Journal of Materials in Civil Engineering**, , Nov. 1996. Vol. 8, Issue 4, p. 201-206.

Dynamic Designer/Motion for SolidWoks 2000, Mechanical Dynamics, Design Technologies division, www.designtechnologies.com

Da VEIGA, S. N. **Desenvolvimento de um protótipo de um separador de sólidos de dejetos animais, destinado à pequena propriedade rural** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FONSECA, A. J. H. Sistematização do processo de obtenção da especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FORTNER, B., "Main Line Mending", **Civil Engng Mag.**, July:42-5, 1999.

FRASSINE, R., "Long-term Performance of a Polymer Composite Repair System for gas Pipelines", In: **Advances in Polymer Technology**, New York: John Wiley and Sons Inc., 1997. N° 1, Vol. 16, p. 33-43.

GAY, D., **Matériaux Composites**, Editions Hérmes, 1991.

KARBHARI, V. M. and SEIBLE, F., Design Considerations for FRP Rehabilitation of Concrete Structures, **Proceedings** of Damstruc'98 Rio, Brazil, May 1998.

KURUVILA, V. "In Situ Pipeline Rehabilitation Techniques, Equipment Improved" **Oil & Gas Journal**, June 21, 1993. Vol. 91 n° 25.

LINHARES, J. C. **Modelamento de dados para o desenvolvimento e representação de peças: Estudo de casos** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MABIE, Hamilton H. and FRED, W. Ocvirk. **Mecanismos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980. 272 p.

MARSHALL, William F. Creating a Pipeline Rehabilitation Plan. **Materials Performance**. 1998. v 37, p 17-21.

MAZETTO, G. M. **Desenvolvimento de um sistema modular para mecanização agrícola conservacionista em pequenas propriedades**

2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OSWALD, K. J., "Thirty Years of Fiberglass Pipe in Oilfield Applications: A Historical Perspective", **Materials Selection & Design**, May 1996.

OTEGUI, J.L. RIVAS; A. MANFREDI, C. MARTINS, C. Weld failures in sleeve reinforcements of pipelines, **Engineering Failure Analysis**, 1999, v 8, p 57-73.

OTEGUI, J. L., Urquiza, S., Rivas, A. and Trunzo A. "Local Collapse of Gas Pipelines under Sleeve Repairs", **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, , 2000. Vol. 77, p. 555-566.

PEREIRA, J. C. **Dispositivo Restaurador de Dutos**. 2001. Modelo de Utilidade. n. 8100259-9, "Dispositivo Restaurador de Dutos". 12 de fev.de 2001(Depósito); 16 de ago. de 2001 (Exame)

PROVENZA, Francesco. **Projetista de máquinas**. 1. ed. São Paulo: F. Provenza, 1989.

PROVENZA, Francesco. **Desenhista de máquinas**. 4. ed. São Paulo: F. Provenza, 1991.

REVISTA BRASIL ENERGIA, (2000), nº 235 - p 048 – 060

SANTON, June. Regulation Changes Create opportunities for pipeline manufacturers. **Materials Performance**, 1999, v 38, p 26-29.

SEIBLE, F. and KARBHARI, V. M. Advanced Composites for Civil Engineering Applications. In: the U.S., **Proceedings** on first International Conference on Composite Infrastructure, ICCI 96, Tucson, Arizona, Jan. 1996, p. 21-37.

SHIGLEY, Joseph Edward. **Elementos de Máquinas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984

SLACK, M. Polyethylene Liners for Internal Rehabilitation of Oil Pipeline. **Materials Performance**, 1992. v-31, p 49-52.

SolidWorks 2000, SolidWorks Corporation, www.solidWorks.com

TENG, J. G. And YAO, J, “Self-weight Buckling of FRP Tubes Filled with Wet Concrete”, **Thin-Walled Structures**, Sept. 2000. Vol. 38, p. 337-353.v.

TEXIGLASS. **Texiglass Indústria e Comércio Têxtil**. Disponível em <<http://www.texiglass.com.br>>. Acesso em: 8 de outubro 2001.

TOUTANJI, H., “Durability Characteristics of Concrete Columns Confined with Advanced Composites Materials”, **Composite Structures**, 1999. Vol. 44, p. 155-161.

TOUTANJI. H. DEMPSEY, S. Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials, **Thin Walled Structures**, 2000. v 39, 153-165.

VALDIERO, A. C. **Desenvolvimento e construção do protótipo de um microtrator articulado: tração e preparo de sulcos**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

VARUGHESE, Kuruvila. In situ pipeline rehabilitation techniques, equipment improved. **Oil and Gas Journal**, 1993. v 91, p 54-57.

XXSYS TECHNOLOGIES, INC. **Xxsys Robo-Wrapper™ Family of Products**. Disponível em <<http://www.xxsys.com>>. Acesso em 20 de novembro 2000.

ANEXOS

ANEXO I – QUESTIONÁRIO APLICADO PARA LEVANTAR AS NECESSIDADES DOS CLIENTES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto de pesquisa: “*Desenvolvimento de um Dispositivo Restaurador de Dutos*”

Mestrando (pesquisador): Gilson Simões Porciúncula Data: 07/03/2002

Questionário para levantamento de dados referentes à reabilitação *in loco* de dutos enterrados e para o estabelecimento de necessidades e requisitos de projeto de um dispositivo restaurador de dutos deteriorados através da técnica de bobinagem automática de material composto (fibras impregnadas em resina).

A - Dados da Empresa

Nome: _____

Cidade: _____ Estado _____

Área de atuação _____

Número de funcionários _____

Entrevistado/cargo _____

Tipos de prestação de serviço _____

Qual é a principal atividade da empresa em relação a dutos _____

B – Reabilitação de dutos

A empresa atua na área de reabilitação de dutos

() Não () Sim. Qual(is) o(s) método(s) de reabilitação utilizado

Qual o diâmetro dos dutos reabilitados _____

Qual a disposição dos dutos *in loco*

() % Horizontal

() % inclinação menor que 45°

() % inclinação maior que 45°

() % vertical

A empresa trabalha com reabilitação de dutos *in loco*:

() Sim _____ () Não _____

Qual é a velocidade média de reabilitação de dutos *in loco* _____

O serviço de reabilitação utilizado pela empresa é automatizado:

() Sim _____ () Não _____

Qual a extensão linear em média de reparo contínuo é feita nos dutos:

() 1,0 m () 1,5 m () 2,0 m () outros _____

A empresa trabalha com reabilitação de dutos através da deposição de materiais compostos:

() Sim _____ () Não _____

Qual o tipo de fibra mais utilizada na reabilitação de dutos:

() de vidro () de carbono () de aramida () Outros _____

Porquê? _____

Qual a forma de fibra mais utilizada na reabilitação de dutos:

() Tecido () Manta () Fita () Fio () Outros _____

Porquê? _____

Na reabilitação de dutos usando materiais compostos, em média, quantas camadas do material são depositadas?

() 1 camada () 3 camada () 5 camada () Outras _____

Na reabilitação de dutos usando materiais compostos, quais os pontos negativos e positivos? _____

C – Estabelecimento das necessidades e requisitos referentes a um dispositivo para reabilitação de dutos.

A empresa gostaria de disponibilizar de um equipamento de deposição automática de material composto em dutos deteriorados:

Sim _____ Não _____

Custo esperado do equipamento: R\$ _____

Qual seria uma boa velocidade linear de reabilitação de dutos in loco _____

O equipamento deveria estar acoplado ao duto durante operação:

Sim _____ Não _____

Qual o volume de escavação desejada (em relação ao diâmetro do duto) para instalação do equipamento

50% 100% 200% outros _____

Qual seria a fonte de potência para o motor

Gasolina Diesel Energia elétrica Bateria

Energia solar outros _____

Qual o comprimento desejado para o equipamento

1,0 m 1,5 m 2,0 m outros _____

Qual o peso desejado para o equipamento:

35 Kg 50 Kg 100 Kg outros _____

A aparência do equipamento é importante?

Sim _____ Não _____

Qual o consumo de potência desejado do equipamento:

até 0,5 cv de 0,5 à 1,0 cv outros _____

Qual o acionamento/desacionamento desejado do equipamento

manual automático outros _____

Outras observações _____

ANEXO II – PROPRIEDADE FÍSICAS DOS MATERIAIS COMPOSTOS

PROPRIEDADES FÍSICAS PRINCIPAIS DOS COMPONENTES

Tabela II.1– Propriedades físicas das fibras, Gay (1991)

| Fibras | Massa específica (kg/m ³) | Módulo de elasticidade (MPa) | Módulo de cisalhamento (MPa) | Coefficiente de Poisson | Tensão de ruptura à tração (MPa) | Alongamento à ruptura (%) | Coefficiente de dilatação térmica (°C ⁻¹) | Temperatura limite de utilização (°C) | Preço/kg 1985 |
|--------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|---|---------------------------------------|---------------|
| | ρ | E | G | ν | σ | ϵ | α | T _{max} | \$US |
| Vidro "R" | 2500 | 86000 | | 0,2 | 3200 | 4 | $0,3 \cdot 10^{-5}$ | 700 | 12 |
| Vidro "E" | 2600 | 74000 | 30000 | 0,25 | 2500 | 3,5 | $0,5 \cdot 10^{-5}$ | 700 | 2,8 |
| Kevlar 49 | 1450 | 130000 | 12000 | 0,4 | 2900 | 2,3 | $-0,2 \cdot 10^{-5}$ | | 70 |
| Grafite "HR" | 1750 | 230000 | 50000 | 0,3 | 3200 | 1,3 | $0,02 \cdot 10^{-5}$ | >1500 | 70 a 140 |
| Grafite "HM" | 1800 | 390000 | 20000 | 0,35 | 2500 | 0,6 | $0,08 \cdot 10^{-5}$ | >1500 | 70 a 140 |
| Boro | 2600 | 400000 | | | 3400 | 0,8 | $0,4 \cdot 10^{-5}$ | 500 | 500 |

Tabela II.2 -Propriedades físicas das matrizes, Gay (1991)

| Matrizes | Massa específica (kg/m ³) | Módulo de elasticidade (MPa) | Módulo de cisalhamento (MPa) | Coefficiente de Poisson | Tensão de ruptura à tração (MPa) | Alongamento à ruptura (%) | Coefficiente de dilatação térmica (°C ⁻¹) | Temperatura limite de utilização (°C) | Preço/kg 1985 |
|------------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|---|---------------------------------------|---------------|
| | ρ | E | G | ν | σ | ϵ | α | T _{max} | \$US |
| Termoresistentes | | | | | | | | | |
| Epóxi | 1200 | 4500 | 1600 | 0,4 | 130 | 2 a 6 | 11·10 ⁻⁵ | 90 a 200 | 6 a 20 |
| Fenólica | 1300 | 3000 | 1100 | 0,4 | 70 | 2,5 | 1·10 ⁻⁵ | 120 a 200 | |
| Poliéster | 1200 | 4000 | 1400 | 0,4 | 80 | 2,5 | 8·10 ⁻⁵ | 60 a 200 | 2,4 |
| Polycarbonato | 1200 | 2400 | | | 60 | | 6·10 ⁻⁵ | 120 | |
| Termoplásticas | | | | | | | | | |
| Polipropileno | 900 | 1200 | | | 30 | 20 a 400 | 9·10 ⁻⁵ | 70 a 140 | |
| Poliamida | 1100 | 4000 | | | 70 | 200 | 8·10 ⁻⁵ | 170 | 6 |

ANEXO III – CÁLCULOS AUXILIARES NA AVALIAÇÃO TÉCNICA DO DRD

SUBMODELO 1

A força tangente F_t , atuante entre duas engrenagens 1 e 2 de raios R_1 e R_2 sobre as quais estão sendo aplicados os torques T_1 e T_2 tem a forma, Figura III.1:

$$F_t = \frac{T_1}{R_1} = \frac{T_2}{R_2} \quad (\text{III.1})$$

Sabe-se também que o número de dentes de um par de engrenagens está diretamente relacionado com seus raios. Assim:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (\text{III.2})$$

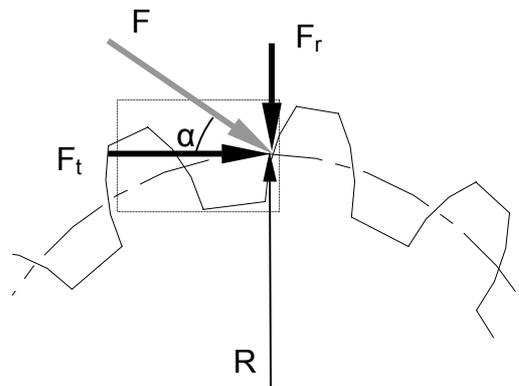


Figura III.1 - Representação gráfica da transmissão de forças

Das eqs. (III.1) e (III.2), temos:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{III.3})$$

SUBMODELO 2

Num trem de engrenagens planetárias, conforme ilustrado na Figura 5.3, a engrenagem 2 é chamada de solar e a engrenagem 1 é chamada de planetária. O braço 3 impele a engrenagem 1 em torno da engrenagem 2, que é uma engrenagem externa fixa. Definindo como W_{12} , a velocidade angular da engrenagem 1 relativo a engrenagem 2, W_{13} a velocidade angular da engrenagem 1 relativo ao braço 3 e W_{32} a velocidade angular do braço 3 relativo a engrenagem 2, a relação entre elas é dada pelo método de Fórmula, Mabie et al., (1980).

$$W_{12} = W_{13} + W_{32} \quad (\text{III.4})$$

Dividindo a eq. (III.4) pela velocidade angular W_{32} e simplificando temos:

$$\frac{W_{12}}{W_{32}} = \frac{W_{13}}{W_{32}} + 1 \quad (\text{III.5})$$

Sabendo que $W_{32} = -W_{23}$, a eq. (III.5) pode ser finalmente colocada da forma:

$$W_{12} = W_{32} \left(1 - \frac{W_{13}}{W_{23}} \right) \quad (\text{III.6})$$

Se considerarmos o braço 3 como referencial fixo em vez da engrenagem 2, observamos que teremos um trem de engrenagem simples. Dessa forma, a sua relação de engrenagem é:

$$\frac{W_{13}}{W_{23}} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (\text{III.7})$$

Se voltarmos com o mecanismo na montagem original, com a engrenagem 2 como sendo um referencial fixo e o braço 3 móvel, teremos ainda a relação dada pela eq. (III.7), isto porque quando um mecanismo é invertido, o movimento relativo entre as peças não é alterado.

Substituindo a eq.(III.7) na eq. (III.6) temos:

$$W_{12} = W_{32} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (\text{III.8})$$

Para o cálculo da transmissão de torque num trem de engrenagens planetárias, pode-se considerar o equilíbrio de potência no sistema já que as velocidades angulares foram determinadas anteriormente. A potência no ponto A é a soma da potência da engrenagem 1 em relação ao braço 3 com a potência do braço 3 em relação a engrenagem 2, sendo que o torque $T_1 = T_{13} = 100 \text{ Nmm}$ (ver Figura 5.5):

$$P_A = P_{13} + P_{32} \quad (\text{III.9})$$

Desdobrando esse equilíbrio de potência temos:

$$T_A \cdot W_{13} = T_{13} \cdot W_{13} + T_{32} \cdot W_{32} \quad (\text{III.10})$$

Dividindo a eq. (III.10) por W_{13} e simplificando temos:

$$T_A = T_{13} + T_{32} \cdot \frac{W_{32}}{W_{13}} \quad (\text{III.11})$$

Sabe-se que:

$$\frac{W_{13}}{W_{23}} = -\frac{Z_2}{Z_1} \Rightarrow \frac{W_{23}}{W_{13}} = -\frac{Z_1}{Z_2} \quad (\text{III.12})$$

Como $W_{32} = -W_{23}$, tem-se:

$$\frac{W_{32}}{W_{13}} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (\text{III.13})$$

Logo, substituindo a eq. (III.13) na eq. (III.11), temos:

$$T_A = T_{13} + T_{32} \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (\text{III.14})$$

Do equilíbrio de torque no braço 3, tem-se que $T_{32} = T_{13}$, logo:

$$T_A = T_{13} \cdot \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (\text{III.15})$$

ANEXO IV – CÁLCULO DA MASSA DO MATERIAL COMPOSTO

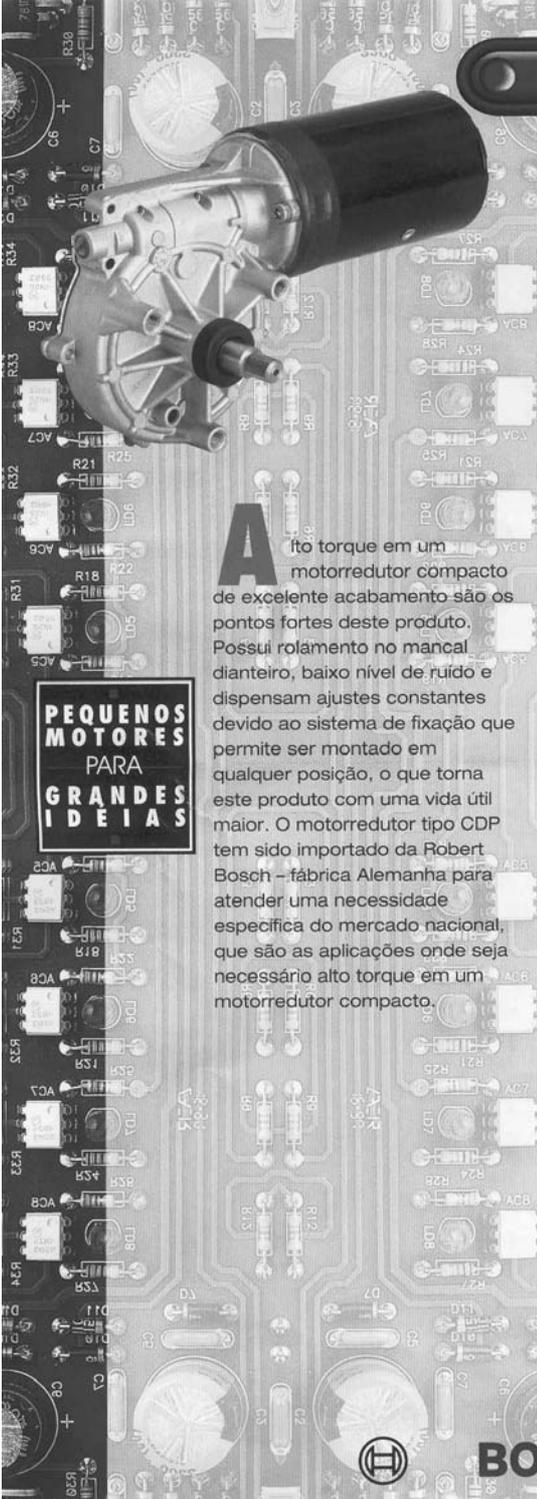
No modelo geométrico utilizado para a determinação da potência exigida no motor do dispositivo em operação, foi considerado a massa do material a ser depositado no duto deteriorado. O material composto utilizado foi com uma composição com 50% em volume de cada componente. Os materiais considerados foram os seguintes:

Fibra: Vidro “E” – Massa específica = 2600 kg/m^3 , Tabela II.1.

Matriz: Resina Epóxi – Massa específica = 1200 Kg/m^3 , Tabela II.2.

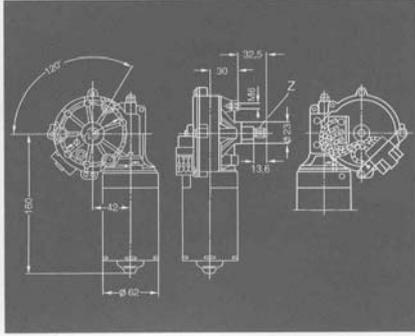
Para o cálculo da massa total do material de revestimento, fibra/resina, foi considerado uma deposição de 8 camadas em um duto de 250 mm de diâmetro e com um comprimento da região a ser restaurada de 1040 mm. Para executar essa operação de restauração são necessários 150 m de fita, proporcionando um volume de $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ se considerarmos a espessura da fita de 0,5 mm (ver Tabela 4.1). Como a composição do material composto é 50 % de fibra e 50 % de resina, o volume de resina é também $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Assim, a massa de fibra é 9,75 kg e a massa de resina é 4,5 kg

ANEXO V – ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR



**PEQUENOS
MOTORES
PARA
GRANDES
IDÉIAS**

Motoredutor Tipo CDP

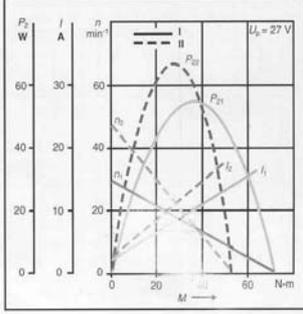


Características Técnicas*

* cada modelo de motor tem características específicas.

| | |
|----------------------|-------------|
| Tensão do Motor..... | 24 VCC |
| Consumo Nominal..... | 5 A |
| Torque..... | 50 Nm |
| Sentido de Giro..... | L |
| Velocidade..... | 2 |
| Rotações..... | 22 / 38 rpm |

Curva de Performance
(Ref. Modelo: 0 390 242 400)



Aplicações já Desenvolvidas

- Painéis de propaganda
- Portões automáticos
- Esteiras rolantes


BOSCH

