



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PERFIS
HÍBRIDOS PULTRUDIDOS**

Eduardo Rodrigues dos Santos Amorim



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PERFIS HÍBRIDOS PULTRUDIDOS

Eduardo Rodrigues dos Santos Amorim

1101315

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e Co-Orientação do Mestre Mário Rui Alvim de Castro, Assistente do 2.º Triénio do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e Doutora Ana Cristina Meira da Silva e Castro, Professora Adjunta do Departamento de Matemática do ISEP.

Júri

Presidente

Doutor Armando José Vilaça de Campos

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho

Professor Adjunto, Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenheiro Mário Rui Monteiro Alvim de Castro

Assistente do 2.º Triénio, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Ana Cristina Meira da Silva e Castro

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Agradecimentos

Antes de tudo mais, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de uma forma ou de outra, tornaram possível esta Dissertação.

Ao meu orientador Doutor Francisco José Gomes da Silva, pelos seus vastos conhecimentos científicos que me procurou transmitir de forma paciente, pela sua elevada experiência profissional que foram evidentes nos esclarecimentos que lhe foram solicitados, pela sua disponibilidade permanente, pelo incentivo prestado ao longo deste trabalho no qual foi evidente o espírito de confiança, sábios conselhos e sentido crítico, permitiram realizar este trabalho eficazmente. É com gratidão que reconheço que se tornou num Amigo especial, como especial é o meu agradecimento, um grande “Bem Haja”.

Ao Co-Orientador, Engenheiro Mário Rui Monteiro Alvim de Castro, agradeço a sua disponibilidade, sugestões e informações fornecidas, ao longo desta Dissertação.

Aos bolseiros, Eng.º Frederico Ferreira e Eng.º Bruno Moreira, que me elucidaram e ajudaram de forma clara e objectiva em diversas fases desta Dissertação, os meus sinceros agradecimentos.

À Co-Orientadora, Doutora Ana Cristina Meira da Silva e Castro, pela sua disponibilidade na elucidação de conceitos aplicados ao projecto, do qual esta Dissertação se debruça, o meu muito obrigado.

À empresa ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda., por todo o apoio disponibilizado e informações fornecidas, os meus agradecimentos ao Eng.º Tomé Santos.

À minha família, que ao longo deste último ano foram privados por diversas vezes da minha companhia, agradeço fraternalmente pelo apoio, força e amor que me deram durante a minha tardia vida académica.

Aos todos Amigos que fiz no Ensino Superior, particularizando o grupo “André Coutinho, Emanuel Petejo, João Carlos e Luís Vila”, que me acompanharam desde o início da minha licenciatura. A todos eles agradeço a amizade e compreensão, boa sorte para as suas vidas futuras.

Ao programa COMPETE (QREN), pelo apoio financeiro concedido ao ISEP, FEUP e ALTO, Lda. através do Projecto N.º 21557 (HYBRIDPULTRUSION, 2011-2013).

Palavras-chave

Perfis Pultrudidos, Pultrusão Híbrida, Equipamentos de Pultrusão

Resumo

A realização deste trabalho teve como principal objectivo proceder ao projecto e realização de dois sistemas de produção de perfis pultrudidos híbridos a acoplar aos equipamentos de pultrusão já instalados na ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. A realização de perfis pultrudidos híbridos visa melhorar as características de isolamento térmico e acústico dos tubos habitualmente feitos por pultrusão, incrementando simultaneamente a sua resistência, através da melhoria do momento de inércia do perfil, sem que haja um aumento significativo do peso do conjunto. O projecto teve como base de trabalho dois sistemas de produção completamente distintos: (a) a existência de barras de cortiça e de poliuretano (pré-formas) sobre as quais se vai efectuar a pultrusão de um tubo que abraça as barras e (b) o uso de resíduos de pultrusão como forma de enchimento dos tubos, durante o seu processo produtivo. Estes equipamentos foram projectados e parcialmente fabricados, antevendo-se que os mesmos entrem em funcionamento muito brevemente.

Keywords

Pultruded bars, Hybrid pultrusion, Manufacturing systems for pultrusion

Abstract

The main goal of this work was to create two different hybrid pultrusion manufacturing systems that will be connected to the pultrusion equipment already installed at ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. The production of hybrid pultruded bars intends to increase the insulation thermal and acoustic properties of the traditional pultruded tubes, improving simultaneously its mechanical strength by increasing the moment of inertia of the common tubes using low weight components. The project was based on two distinct manufacturing approaches: (a) cork and polyurethane bars previously produced manufacturing the pultruded tube around them and (b) the use of pultruded wastes as filling form of the pultruded tubes in a continuous process. These systems were drawn and partially produced, foreseeing that they will be in service soon.

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Al₂O₃	- Óxido de Alumínio / Alumina
AREMA	- Associação Americana de Engenharia Ferroviária e Manutenção de Vias (<i>The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association</i>)
ASTM	- Sociedade Americana para Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
ATEX	- Atmosferas Explosivas
B₄C	- Carboneto de Boro
BMC	- Composto Moldado sob a Forma de Bloco (<i>Bulk Molding Compound</i>)
BN	- Nitreto de Boro
C	- Carbono
C/C	- Carbono/Carbono
C/SiC	- Carbono/Carboneto de Silício
CMM	- Compósitos de Matriz Metálica
DIN	- Instituto Alemão para Normas (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
EPTA	- Associação Europeia de Tecnologia de Pultrusão (<i>European Pultrusion Technology Association</i>)
EUA	- Estados Unidos da América
HDPE	- Polietileno de Alta Densidade (<i>High-Density Polyethylene</i>)
HDT	- Temperatura de Distorção ao Calor (<i>Heat Distortion Temperature</i>)
HPC	- Betão de Elevado Desempenho (<i>High Performance Concrete</i>)
IDEA	- Programa de Análise Exploratória de Inovações Credíveis (<i>Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs</i>)
ISO	- Organização Internacional para a Standardização (<i>International Organization for Standardization</i>)
IV	- Infravermelhos
MAPP	- Polipropileno Anídrico Maleico (<i>Maleic Anhydride Polypropylene</i>)
MDF	- Madeira Prensada de Densidade Média (<i>Medium Density Fiberboard</i>)
MPa	- Mega Pascal
PA	- Poliamida
PAN	- Poliacrinolitrila
PC	- Policarbonato

PE	- Polietileno
PEEK	- Poli-Éter-Éter-Cetona
PET	- Tereftalato de Polietileno
PITCH	- Produto Derivado do Petróleo
PI	- Poliimidas
PLC	- Comunicações Através de Linhas de Força (<i>Power Line Communication</i>)
PMCs	- Compósitos de Matriz Polimérica (<i>Polymer Matrix Composites</i>)
PP	- Polipropileno
PPS	- Polissulfureto de Fenileno
PRF	- Plástico Reforçado com Fibra
PRFC	- Plástico Reforçado com Fibra de Carbono
PRFV	- Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
PU	- Poliuretano
PVC	- Policloreto de Vinilo
RNA	- Redes Neurais Artificiais (<i>Artificial Neural Networks</i>)
RTM	- Moldação por Transferência de Resina (<i>Resin Transfer Molding</i>)
SBB	- Companhia de Transportes Ferroviários Suíça (<i>Swiss Federal Railways</i>)
SiC	- Carboneto de Silício
SiC/SiC	- Carboneto de Silício/Carboneto de Silício
SiO₂	- Dióxido de Silício
SMA	- Anidrido Estireno-Maleico
SMC	- Composto Moldado sob a Forma de Chapa (<i>Sheet Molding Compound</i>)
SRIM	- Moldação por Injeção de Resina Estrutural (<i>Structural Resin Injection Molding</i>)
TiB₂	- Diboreto de Titânio
TiC	- Carboneto de Titânio
TIV	- Termografia de Infravermelhos
TMC	- Composto Moldado Espesso (<i>Thick Molding Compound</i>)
TPT	- Tecnologias de Pultrusão de Termoplásticos (<i>Thermoplastic Pultrusion Technologies</i>)
UV	- Ultravioleta
W	- Tungstênio
WC	- Carboneto de Tungstênio
WP	- Percentagem de Água (<i>Water Percentage</i>)
ZrO₂	- Dióxido de Zircônio

Glossário de Termos

Chips	- Bocados, implantes.
Cura	- Reacção da resina que permitiu polimerizar e passar ao estado sólido.
Design	- Estilo
Equiaxiais	- Eixos axiais equidistantes
Fieira	- Molde com uma secção transversal constante utilizado em pultrusão ou extrusão
Fillers	- Materiais inertes adicionados à resina para produzir volume, diminuindo assim a densidade global do compósito. Sendo usados também para incrementar certas características de desempenho da resina, tais como a resistência ao fogo ou a resistência à fissuração.
Gel-coat	- Gel de revestimento
Isotrópico	- Que possui propriedades idênticas em todas as direcções.
Off-line	- Desligado
Offshore	- Fora do território.
Pellets	- Granulados
Portland	- Tipo de pó de cimento
Post-die	- Arrefecimento depois da saída da fieira/molde
Pré-preg	- Pré-impregnado
Rayon	- Nylon
Roving	- Mecha de filamentos contínuos com uma pequena torção, enrolados helicoidalmente numa bobina
Set-up	- Configurar
Towpregs	- Mecha de filamentos cortados, pré-impregnada
Tows	- Mecha de filamentos cortados
Whiskers	- Cristais simples

Índice de Figuras e Tabelas

Figuras

Figura 1 - Aplicação de materiais compósitos (Embraer, 2012).....	32
Figura 2 - Aplicações de CMM (Durão, 2010b).....	33
Figura 3 - Cone de escape de um foguetão (Aviação, 2012).....	34
Figura 4 – ‘Roving’, tecido e manta (Corning, 2012).....	39
Figura 5 - Principais vantagens dos polímeros reforçados (Adaptado de Fibrolux, 2012).....	40
Figura 6 - Tecido de fibra de vidro (Rocarbon, 2012).....	42
Figura 7 - Imagens da secção transversal de fibras do tipo PAN e PITCH.....	44
Figura 8 -Tecido de fibra de carbono e um filamento (Rocarbon, 2012).....	45
Figura 9 - Tecido em Kevlar produzido por Dupont (Rocarbon, 2012).....	46
Figura 10 - Teor de volume de poros cheios de água como uma função do ganho de massa a 20°C, para amostras cortadas da alma (linha pontilhada) e flanges (linha sólida), (Aniskevich, 2012).....	47
Figura 11 - Maquete da Torre de Carbono projectada por Peter Testa em 2005.....	49
Figura 12 - Representação esquemática da montagem do conjunto Betão/PRFV/PRFC (Khennane, 2008).....	51
Figura 13 - Aplicação específica num tabuleiro de uma ponte, tendo por base a viga acima referenciada (Khennane, 2008).....	51
Figura 14 - Configuração proposta para uma viga híbrida de PRF-HPC (Kennane, 2008).....	52
Figura 15 - Formatos de plataformas usadas (Zi, 2007).....	54
Figura 16 - Estudo comparativo entre os FRP e o aço comum e aço inoxidável (Adaptado de Fibrolux, 2012).....	56
Figura 17 - Esquema do processo de moldação manual de PRF (Adaptado de Franco, 2008) ...	61
Figura 18 - Esquema do processo de moldação à pistola (Adaptado de Franco, 2008).....	62
Figura 19 - Esquema do processo de moldação por vácuo (Adaptado de Franco, 2008).....	63
Figura 20 - Esquema do processo por RTM (Ctihuatai, 2008).....	64
Figura 21 - Representação esquemática do processo VARTM (Vacmobiles, 2012).....	65
Figura 22 - Representação esquemática do processo SRIM (Rijswijk, Bersee, 2007).....	66
Figura 23 - Diagrama esquemático do processo SCRIM (Brust, 2005).....	66
Figura 24 - Diagrama esquemático do processo da compressão de compósitos de matriz polimérica.....	67
Figura 25 - (a) Diagrama esquemático em corte do método de revestimento enrolado e (b) mandril utilizado no processo (Kim, Lee, 2006).....	68

Figura 26 - Diagrama esquemático do processo de moldação por injeção (Kopeliovich, 2012)	69
Figura 27 - Diagrama esquemático do processo por enrolamento filamenar	70
Figura 28 - Diagrama esquemático do processo de pultrusão (Cogumelo, 2005)	75
Figura 29 - Vista do perfil em corte (Adaptado de Fibrolux, 2012).....	82
Figura 30 - Exemplos de perfis personalizados (Adaptado de Fibrolux, 2012)	83
Figura 31 - Vista geral do equipamento.....	92
Figura 32 - Representação esquemática do 'layout' da máquina de pultrusão	92
Figura 33 - Esboço inicial da estrutura 1 (1).....	97
Figura 34 - Esboço inicial da estrutura 1 (2).....	97
Figura 35 - Esboço final da estrutura 1.....	98
Figura 36 - Representação da estrutura correspondente ao armazém da matéria-prima (pré-formas).....	99
Figura 37 - Aspecto da parte inferior da estrutura.....	100
Figura 38 - Identificação dos perfis analisados	106
Figura 39 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis longitudinais inferiores.....	107
Figura 40 - Diagrama de reacções nos apoios correspondente aos perfis longitudinais inferiores	108
Figura 41 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis transversais.....	109
Figura 42 - Diagrama de reacções nos apoios correspondente aos perfis transversais.....	109
Figura 43 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis longitudinais exteriores	110
Figura 44 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente aos perfis longitudinais exteriores.....	110
Figura 45 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal direito superior.....	111
Figura 46 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal direito superior	111
Figura 47 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal esquerdo superior	112
Figura 48 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal esquerdo superior	112
Figura 49 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior.....	113
Figura 50 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior.....	113
Figura 51 - Diagrama de esforços (horizontais) correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior	113
Figura 52 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior.....	114
Figura 53 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal direito inferior	115

Figura 54 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal direito inferior	115
Figura 55 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis transversais esquerdo inferiores	116
Figura 56 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente aos perfis transversais direito inferior	116
Figura 57 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal central.....	117
Figura 58 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal central	117
Figura 59 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal intermédio esquerdo	117
Figura 60 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal intermédio esquerdo.....	118
Figura 61 - Localização das ligações entre perfis.....	122
Figura 62 - Esboço inicial da estrutura 2 (1).....	142
Figura 63 - Esboço inicial da estrutura 2 (2).....	143
Figura 64 - Esboço final da estrutura 2.....	143
Figura 65 - Vista geral da estrutura.....	144
Figura 66 – Esforços devidos ao peso próprio e esforços aplicados.....	146
Figura 67 – Estrutura com as cargas aplicadas e seus valores.....	147
Figura 68 – Esforços axiais na estrutura e o máximo valor verificado.....	147
Figura 69 – Esforços cortantes na estrutura e o máximo valor verificado	148
Figura 70 – Momentos flectores na estrutura e o máximo valor verificado	148
Figura 71 – Reacções nos pés de apoio e deslocamentos nodais.....	149
Figura 72 – Estrutura com as cargas aplicadas e seus valores (pés afastados)	153
Figura 73 – Esforços axiais na estrutura e o valor máximo verificado (pés afastados)	153
Figura 74 – Esforços cortantes na estrutura e o valor máximo verificado (pés afastados)	154
Figura 75 – Os momentos flectores na estrutura e o máximo valor verificado (pés afastados)	154
Figura 76 - Reacções nos pés de apoio e deslocamentos nodais na estrutura (pés afastados)	155
Figura 77 – Diagrama de esforços correspondente ao peso próprio do veio e do fuso.....	161
Figura 78 – Diagrama das reacções que correspondem às cargas radiais aplicadas nos rolamentos A e B.....	161
Figura 79 – Par de rolamentos de rolos cónicos, montados em “O” (Adaptado do catálogo da FAG, 2010)	162
Figura 80 – Equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida.....	172
Figura 81 – Pormenor do equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida – Parte motriz das pré-formas	172
Figura 82 – Pormenor do equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida – Caixa do cilindro que impulsiona as pré-formas.....	173

Figura 83 – Pormenor do equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida – Perfil usado e ligações.....	173
Figura 84 – Pormenor do equipamento de abastecimento de resíduos para a Pultrusão Híbrida – Estrutura e silo de armazenagem dos resíduos para alimentação.....	174

Tabelas

Tabela 1 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras (Adaptado de Rocarbon, 2012)	39
Tabela 2 - Propriedades dos diferentes tipos de fibras de vidro.....	41
Tabela 3 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras de vidro (Adaptado de Durão, 2010b).....	42
Tabela 4 - Classificação das fibras de carbono (Starr, 2000).....	44
Tabela 5 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras de carbono (Durão, 2010b).....	45
Tabela 6 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras aramídicas (Adaptado de Durão, 2010).....	46
Tabela 7 - Processos de fabrico mais utilizados (Adaptado de Mazumdar, 2001).....	60
Tabela 8 - Reacções e flechas correspondentes aos perfis longitudinais inferiores.....	108
Tabela 9 - Reacções e flechas correspondentes aos perfis transversais.....	109
Tabela 10 - Reacções e flechas correspondentes aos perfis longitudinais exteriores.....	111
Tabela 11 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal direito superior.....	111
Tabela 12 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal esquerdo superior.....	112
Tabela 13 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal esquerdo inferior.....	114
Tabela 14 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal direito inferior.....	115
Tabela 15 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal direito inferior.....	116
Tabela 16 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal central.....	117
Tabela 17 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal intermédio esquerdo....	118
Tabela 18 - Ligações entre perfis sujeitos a pequenos esforços.....	122
Tabela 19 - Ligações entre perfis submetidos a selecção.....	123
Tabela 20 – Ligação 1, horizontal, parâmetros de selecção.....	123
Tabela 21 - Ligação 2, horizontal, parâmetros de selecção.....	124
Tabela 22 - Ligação 1 e 2, verticais, parâmetros de selecção.....	125
Tabela 23 - Ligação 3, parâmetros de selecção.....	125
Tabela 24 - Ligação 4, parâmetros de selecção.....	126
Tabela 25 - Ligação 5, parâmetros de selecção.....	126
Tabela 26 - Ligação 6, parâmetros de selecção.....	127

<i>Tabela 27 - Ligação 7, parâmetros de selecção.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabela 28 - Ligação 8, parâmetros de selecção.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabela 29 - Ligação 9, parâmetros de selecção.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabela 30 – Ligação10, parâmetros de selecção.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 31 – Listagem dos componentes envolvidos na construção do 1º equipamento</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 32 – Reacções dos esforços nos apoios.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabela 33 – Deslocamentos nodais</i>	<i>157</i>
<i>Tabela 34 – Listagem dos componentes envolvidos na construção do 2º equipamento</i>	<i>163</i>

Índice

<i>Lista de Símbolos e Abreviaturas</i>	xiii
<i>Glossário de Termos</i>	xv
<i>Índice de Figuras e Tabelas</i>	xvii
<i>Figuras</i>	xvii
<i>Tabelas</i>	xx
<i>Índice</i>	xxiii
1. Introdução	27
1.1. Enquadramento	27
1.2. Objectivos	28
1.3. Metodologia	28
1.4. Estrutura	29
2. Revisão Bibliográfica	31
2.1. Materiais compósitos: Conceitos gerais	31
2.1.1. Materiais compósitos de matriz não-polimérica: Breve introdução	32
2.1.2. Materiais compósitos de matriz polimérica	35
2.1.2.1. Tipos de matriz polimérica	35
2.1.2.1.1. Matrizes Termoplásticas	35
2.1.2.1.2. Matrizes Termoendurecíveis	37
2.1.2.2. Tipos de Reforços	37
2.1.3. Tipos de Plásticos Reforçados	40
2.1.3.1. Os Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro	41
2.1.3.2. Os Plásticos Reforçados com Fibra de Carbono	43
2.1.3.3. Plásticos Reforçados com outros tipos de fibra	45
2.1.4. Outras propriedades dos materiais compósitos de matriz polimérica	46
2.1.5. Vantagens genéricas dos materiais compósitos de matriz polimérica	48
2.1.6. Desenvolvimentos na aplicação de compósitos de matriz polimérica	48
2.1.7. Investigações mais recentes na área dos materiais compósitos com vista a aplicações específicas	57
2.1.8. Técnicas de produção mais usuais em materiais compósitos de matriz polimérica	59
2.1.8.1. Processos Manuais	61
2.1.8.1.1. Moldação Manual ('Hand lay-up')	61
2.1.8.1.2. Moldação à Pistola ('Spray lay-up')	62
2.1.8.1.3. Moldação por Vácuo ('Vacuum bagging')	63

2.1.8.2. Injecção de Compósitos de Matriz Polimérica.....	63
2.1.8.2.1. Moldação por Transferência de Resina ('RTM - Resin Transfer Molding').....	63
2.1.8.2.2. Moldação por Transferência de Resina com Vácuo Assistido.....	64
2.1.8.2.3. Moldação por Injecção de Resina Estrutural ('SRIM - Structural Resin Injection Molding')	65
2.1.8.2.4. Moldação por Infusão de Resina Composta ('SCRIM - Seemann Composite Resin Infusion Molding').....	66
2.1.8.3. Moldação por Compressão de Compósitos de Matriz Polimérica.....	67
2.1.8.3.1. Processo de Revestimento Enrolado ('Roll Wrapping Process').....	68
2.1.8.3.2. Moldação por Injecção ('Injection Molding')	69
2.1.8.3.3. Processo por Enrolamento Filamentar ('Filament Winding Process').....	70
2.1.8.4. Pultrusão de Compósitos de Matriz Polimérica: Breve introdução	71
2.1.9. Técnicas de Controlo de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica.....	71
2.2. A Pultrusão	74
2.2.1. O Processo de Pultrusão.....	74
2.2.2. Desenvolvimentos Recentes na Pultrusão	79
2.2.3. Aplicações da Pultrusão.....	80
2.2.4. Os Produtos Pultrudidos.....	82
2.2.5. Vantagens dos Produtos Pultrudidos.....	83
2.2.6. A Pultrusão Híbrida	84
2.2.6.1. Produtos Híbridos à Base de PRFV: evolução mais recente.....	88
3. Desenvolvimento	91
3.1. Enquadramento do trabalho prático e caracterização da empresa de acolhimento	91
3.2. Equipamento de Pultrusão já existente	91
3.2.1. Layout do equipamento já existente	92
3.2.2. Condições de acoplamento dos novos sistemas.....	93
3.3. Sistema de Pultrusão Híbrida tendo por base pré-formas	94
3.3.1. Anteprojecto das soluções preconizadas.....	95
3.3.2. Projecto e cálculo das soluções preconizadas	99
3.3.2.1. Esforços aplicados à estrutura.....	99
3.3.2.1.2. Esforços aplicados à parte superior da estrutura	101
3.3.2.2. Análise das reacções nos apoios.....	106
3.3.2.3 Análise dos resultados.....	118
3.3.2.4. Escolha de ligações entre perfis	121
3.3.3. Listagem completa das peças e componentes do sistema projectado.....	130
3.3.3.1. Informação complementar.....	139

<i>3.4. Sistema de Pultrusão Híbrida tendo por base a alimentação contínua de resíduos</i>	<i>140</i>
<i>3.4.1. Requisitos iniciais</i>	<i>140</i>
<i>3.4.2. Anteprojecto das soluções preconizadas.....</i>	<i>141</i>
<i>3.4.3. Projecto e cálculo das soluções preconizadas</i>	<i>144</i>
<i>3.4.3.1. Esforços aplicados à estrutura.....</i>	<i>145</i>
<i>3.4.4. Listagem completa das peças e componentes do sistema projectado.....</i>	<i>163</i>
<i>3.4.4.1 Informação complementar.....</i>	<i>170</i>
<i>3.5 Construção dos equipamentos</i>	<i>171</i>
<i>4. Conclusões.....</i>	<i>175</i>
<i>Bibliografia e Outras Fontes de Informação.....</i>	<i>177</i>
<i>Referências Bibliográficas</i>	<i>177</i>
<i>Outras Fontes de Informação Disponíveis Online Por Empresas do Sector</i>	<i>182</i>
<i>Anexos</i>	<i>183</i>

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A pultrusão é uma técnica de produção de perfis compósitos de matriz polimérica que permite a obtenção de perfis estruturais de elevada resistência mecânica, baixo peso específico e elevada resistência à corrosão, com preços bastante competitivos. Estes produtos facilitam fortemente a montagem devido ao seu baixo peso, permitindo ganhos também no transporte. Para além disso, a sua manutenção é extremamente reduzida, podendo incorporar no seu processo produtivo todos os elementos necessários a uma maior preservação quando expostos aos raios solares ou a outros ambientes agressivos.

No entanto, as suas características de resistência mecânica, isolamento acústico e térmico podem ser facilmente melhoradas através da inclusão de produtos próprios no interior de perfis ocos, como tubos. Isso poderá permitir um melhor desempenho mecânico através do incremento do Momento de Inércia do perfil. Para além disso, as estruturas tubulares têm tendência natural para ampliar os sons neles aplicados, o que poderá ser melhorado através da introdução de produtos próprios que absorvam as emissões acústicas. Por outro lado, estando uma estrutura tubular cheia de ar, o isolamento térmico não será tão eficaz como quando se tiver outro produto, sólido, capaz de promover um maior isolamento térmico.

Estas foram as ideias base que estiveram no princípio da criação dos perfis híbridos. No entanto, a sua produção carecia de equipamentos adequados, não existindo qualquer oferta para os mesmos no mercado. Assim, tornou-se imperioso proceder ao projecto e execução dos mesmos, com vista à obtenção dos perfis que se pretendiam alcançar.

De salientar que a informação científica e comercial existente sobre a matéria é praticamente nula, já que não são conhecidos outros exemplos de produção deste tipo de perfis.

1.2. Objectivos

Este trabalho tem como objectivos:

- Projectar um equipamento que, acoplado ao equipamento de pultrusão já existente, permita produzir perfis pultrudidos em torno de uma barra pré-existente de cortiça ou de poliuretano, adiante designados por pré-formas;
- Projectar um equipamento que, acoplado ao equipamento de pultrusão já existente, permita introduzir de forma contínua resíduos de pultrusão no interior de perfis pultrudidos durante o seu processo de fabrico, criando perfis mais leves, com resistência similar e melhor momento de inércia, reciclando materiais;
- Acompanhar a realização prática dos equipamentos.

1.3. Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a metodologia que seguidamente se descreve:

- Contacto com o sistema de pultrusão existente na ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda.;
- Mapeamento dos requisitos dos equipamentos;
- Pesquisa bibliográfica sobre possíveis soluções já existentes;
- Leitura atenta da Directiva Máquinas para o cumprimento de todas as normas de segurança no projecto dos equipamentos;
- Realização dos projectos referentes aos equipamentos necessários;
- Validação pela ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. das soluções encontradas;
- Acompanhamento da produção dos mesmos;
- Redacção da presente dissertação.

1.4. Estrutura

A estrutura deste trabalho está assente essencialmente em duas partes: uma Revisão Bibliográfica inicial, onde se pretende enquadrar o leitor com o tema, passando em revista os desenvolvimentos técnicos e científicos que foram publicados em livros e periódicos científicos dedicados à matéria, e o Desenvolvimento do trabalho prático propriamente dito, com a referência aos projectos desenvolvidos, soluções encontradas, respectiva validação e teste dos produtos obtidos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. *Materiais compósitos: Conceitos gerais*

Os compósitos são, provavelmente, uma das famílias de materiais mais antiga da Humanidade, tendo sido criada pelo Homem para responder às suas necessidades específicas. Os antigos egípcios usavam palha na confecção de tijolos de barro (Starr, 2000). Tecnologia idêntica foi encontrada na construção da muralha da China. O papiro, que foi mais tarde substituído pelo papel, usava na sua forma original fibras colocadas paralelamente numa posição longitudinal, alternadas com camadas idênticas colocadas numa posição transversal (Durão, 2010a). Muitos outros exemplos preconizam esta tecnologia: a capacidade de reforçar um material mais fraco juntando um outro de natureza fibrosa, aumentando assim a sua resistência mecânica (Durão, 2010a).

Na actualidade, o uso de materiais compósitos é enorme, sendo o betão reforçado o compósito mais usado. Contudo, quando as exigências estruturais são mais elevadas, o betão reforçado tem sido substituído gradualmente por perfis de PRFV.

Os materiais compósitos oferecem inúmeras vantagens sobre os metais de engenharia mais convencionais. Ao longo dos anos, o uso deste tipo de materiais tem aumentado significativamente e a sua aplicabilidade é cada vez mais variada, podendo ser encontrados no campo da medicina, na indústria automóvel, da aviação e indústria aeroespacial (Ayranci, 2007).

Existem vários tipos de compósitos: o factor que os classifica é a matriz, com especificidades próprias segundo a sua aplicação. Temos compósitos de matriz polimérica, metálica, cerâmica, cimentosa, híbridos, estruturais e ainda outros tipos, sem expressão comercial.

A aplicação de materiais compósitos está cada vez mais disseminada pelos mais diversos sectores. Inicialmente começou por ser usada essencialmente em aplicações muitíssimo exigentes, onde eram requeridas propriedades dificilmente conciliáveis por um único material ou liga: elevada resistência mecânica e tenacidade, elevada resistência mecânica e peso muito baixo, etc. Isso fez com que se desenvolvessem materiais com campos de aplicação muito concretos, nomeadamente na área dos materiais para ferramentas de corte (cerâmicos + metálicos), na área automóvel (polímeros + cerâmicos) e na área da aeronáutica (plásticos + cerâmicos, etc.).

No capítulo dos materiais compósitos, a diversidade de pares de materiais conciliáveis que promovem um lote de propriedades capaz de tornar este novo material bastante competitivo em relação aos materiais mais convencionais é tão grande que, mesmo após muitos anos de investigação, não param de surgir novos materiais compósitos e, conseqüentemente, novos campos de aplicação para os mesmos.

A figura seguinte pretende ilustrar a forma como os materiais compósitos já se encontram disseminados na construção de aeronaves, sendo este apenas um dos exemplos onde os materiais compósitos têm ganho mercado de forma contínua e sustentável.

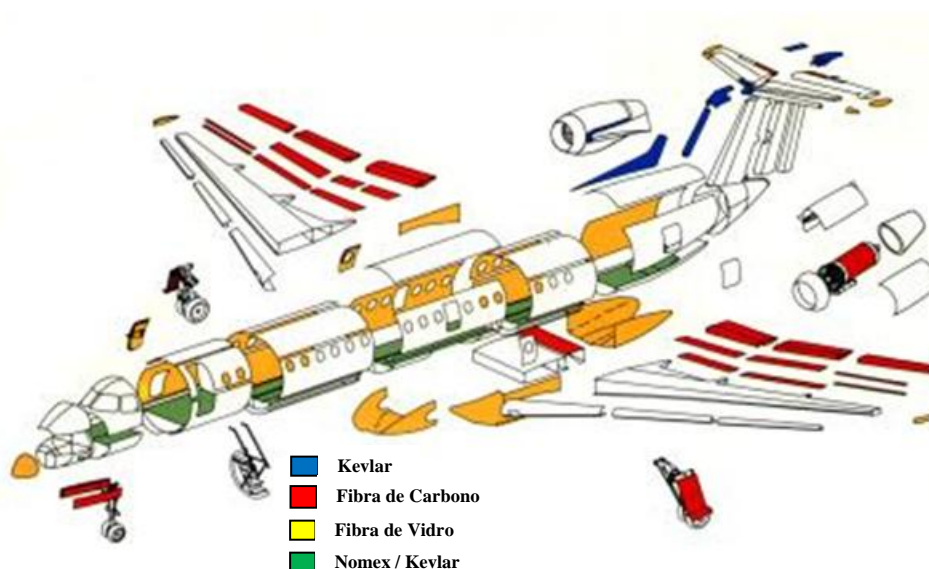


Figura 1 - Aplicação de materiais compósitos (Embraer, 2012)

2.1.1. *Materiais compósitos de matriz não-polimérica: Breve introdução*

Nos compósitos de matriz metálica, o material mais usual como matriz é o alumínio, existindo no entanto compósitos com matriz em titânio, ferro e magnésio. Neste caso, os reforços poderão assumir a forma de partículas, fibras curtas ou longas e os materiais mais usados como reforços são o carboneto de silício (SiC) ou a alumina (Al₂O₃). Existem reforços menos utilizados, como o TiB₂, B₄C, SiO₂, TiC, WC, BN, ZrO₂ e W, os quais podem permitir reacções químicas durante o seu processamento (Durão, 2010a).

Em virtude das suas características, estes materiais substituem com eficácia os metais-bases análogos, quando estão em causa temperaturas de serviço mais elevadas, verificando-se que apresentam uma melhor fluência e resistência à abrasão, e que a sua condutividade térmica e estabilidade dimensional é melhorada (Rocarbon, 2012). Tem na indústria automóvel e aeroespacial as suas maiores áreas de aplicação. Contudo, também se aplicam em várias indústrias que utilizam tecnologia de vanguarda (Durão, 2010a).



Figura 2 - Aplicações de CMM (Durão, 2010b)

Os compósitos de matriz cerâmica, são geralmente utilizados em meios sujeitos a temperaturas elevadas ou a ambientes corrosivos. Nestes casos, a cerâmica é utilizada como o material de base para a matriz e os reforços apresentam-se normalmente sob a forma de fibras curtas. Os mais usados são o SiC ou o BN. Poderão ainda apresentar-se sob a forma de *'whiskers'*, principalmente quando são utilizadas as seguintes combinações fibra/matriz: C/C, C/SiC ou SiC/SiC (Durão, 2010a). Sendo extremamente duro, é também extremamente frágil. Contudo, com a inclusão de partículas de fibras ou de *'whiskers'*, melhora significativamente a resistência à fractura, a choques térmicos, à fluência a alta temperatura e a sua ductilidade (Aviação, 2012). Verifica-se que o seu maior campo de aplicação tem lugar na indústria de ferramentas de corte, principalmente na maquinagem de ligas metálicas duras. Também se aplica na indústria automóvel ao nível dos motores, na indústria aeronáutica e aeroespacial. A figura seguinte é demonstrativa da aplicação de um compósito de matriz cerâmica com base no carbono e reforço do mesmo material (Aviação, 2012).

No caso dos compósitos de matriz cimentosa, como seja o sobejamente conhecido betão armado, a matriz é constituída pelo cimento, sendo o reforço constituído por vergalhões de aço, possuindo como inertes a areia e a pedra.

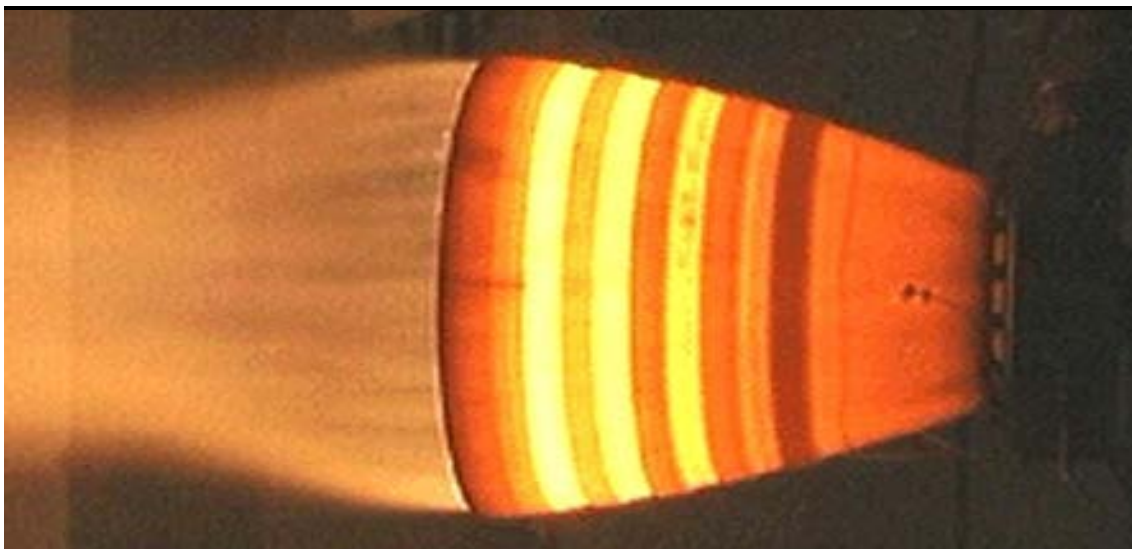


Figura 3 - Cone de escape de um foguetão (Aviação, 2012)

Os compósitos híbridos, resultam da conjugação de três ou mais componentes distintos, permitindo adquirir propriedades que resultam na combinação das características dos componentes usados, as quais são normalmente superiores às apresentadas pelo compósito normal. A sua aplicação tem tido um incremento assinalável na construção civil, pontes e em várias indústrias.

Os compósitos estruturais surgem como resultado do uso de materiais homogêneos juntamente com materiais compósitos. Um bom exemplo disso são os painéis em sanduíche em que, externamente, existem folhas resistentes de materiais compósitos, ou de ligas de alumínio, de titânio, de aço ou de madeira prensada, tendo no seu interior materiais menos densos, tais como borracha sintética ou polímeros em espuma, entre outros (Durão, 2010b). Têm uma boa resistência a deformações normais à sua superfície e uma forte rigidez ao corte, sendo aplicados na construção civil, mais concretamente em telhados, pisos e paredes. No caso da aeronáutica, são usados nas asas, fuselagem, etc..

Existem ainda outros compósitos com uma expressão comercial menos interessante, mas que não podem deixar de ser considerados. Neste campo, são de referir os compósitos estruturais, dos quais fazem parte os painéis em sanduíche e os compósitos de madeira, como é o caso do MDF. Estão ainda em forte desenvolvimento, embora já com provas dadas da sua utilidade e óptimas características, biocompósitos, materiais biomiméticos e nanocompósitos, utilizando, por exemplo, nanotubos de carbono como reforço. Os compósitos bioactivos, que actuam no campo dos materiais microcelulares, são também de considerar, pois começam a ser cada vez mais utilizados em próteses e reconstituições (Durão, 2010a).

2.1.2. Materiais compósitos de matriz polimérica

Os compósitos de matriz polimérica, são constituídos essencialmente por dois grandes grupos: compósitos de matriz termoendurecível e compósitos de matriz termoplástica. Em termos de reforço, a variedade é mais elevada, existindo fortes diferenças em termos de propriedades, custos dos materiais envolvidos e processos de fabricação.

2.1.2.1. Tipos de matriz polimérica

2.1.2.1.1. Matrizes Termoplásticas

As matrizes termoplásticas apresentam como principal característica poderem ser processadas e reprocessadas, já que podem ser aquecidas e arrefecidas várias vezes sem perda das suas principais propriedades e não necessitam de cuidados específicos no seu armazenamento. Tem algumas vantagens relativamente às resinas termoendurecíveis, tais como uma maior resistência ao impacto, maior tenacidade, maior deformação na rotura, menor tendência à absorção de humidade, possuem uma boa resistência química, o tempo necessário ao seu processamento é menor, são recicláveis, facilmente se conseguem ligar por fusão e permitem mais facilmente uma reparação (Durão, 2010b). Contudo, possuem alta viscosidade, o que dificulta a impregnação das fibras longas de reforço e resulta na produção de um compósito com fraca adesão fibra/matriz. Tendo-se verificado que com este tipo de matriz se consegue atingir resistências mecânicas mais elevadas, desenvolveram-se técnicas de impregnação extremamente eficazes, o que possibilitou uma melhoria significativa da qualidade do compósito, assim como da produtividade, o que possibilitou a redução dos custos de produção. Pelo facto dos compósitos de matriz termoplástica terem evoluído de forma consistente, verifica-se um aumento bastante significativo na utilização, o qual advém da sua elevada competitividade em termos de características mecânicas, quando comparados com os compósitos de matriz termoendurecível (Starr, 2000). Para aplicações não estruturais e semiestruturais, usam-se normalmente polímeros tais como o polipropileno (PP), poliamida (PA) ou policarbonato (PC). Nos compósitos de alta resistência, é normal utilizar poli-éter-éter-cetona (PEEK), poliimidaz (PI) ou polisulfureto de fenileno (PPS) (Durão, 2010b).

No caso específico da pultrusão, a empresa *Thermoplastic Technologies (TPT) Inc.*, de Yorktown – Virgínia - EUA, revelou recentemente um processo de injeção de resina termoplástica executada directamente na fieira de pultrusão. Ao contrário dos perfis termoendurecíveis pultrudidos, os perfis termoplásticos podem ser pós-formados e reformulados. Permitem temperaturas de trabalho superiores quando utilizam algumas matrizes termoplásticas, o que permite velocidades de processamento maiores com matérias-primas usuais, reduzindo assim os custos de pultrusão. O processo combina convencionalmente 'roving' de fibra de vidro, aramida ou 'tows' de fibra de carbono, com termoplásticos usuais, tais como tereftalato de polietileno (PET) ou poliamida (PA). Outros plásticos podem também ser utilizados, tais como o sulfeto de polifenileno (PPS), anidrido estireno-maleico (SMA), polietileno de alta densidade (HDPE) e polipropileno (PP). Os termoplásticos podem tomar a forma de 'pellets', 'chips', pedaços, ou tiras e como o processo utiliza injeção na própria fieira, nenhum solvente está envolvido. Aditivos tais como corantes e agentes de enchimento podem ser também utilizados, conforme necessário. Segundo os investigadores (Wilson, 2003), o processo obtido é excelente, a fibra previamente impregnada permite o uso de termoplásticos reciclados, assim como materiais virgens. A fibra molhada é muitas vezes um problema importante para a pultrusão com injeção na fieira, porque os termoplásticos têm uma viscosidade muito mais elevada do que os termoendurecíveis na gama de temperaturas típicas de processamento. (Wilson, 2003).

Segundo Marissen et al. (Marissen, 2000), a pultrusão com termoplásticos é um compromisso entre a optimização da qualidade de impregnação e a elevada velocidade de produção. A alta velocidade de produção significa baixo custo. Por outras palavras, tem que existir um compromisso entre o preço e a qualidade. É conseguida uma melhor qualidade se for utilizado um feixe de fibras previamente impregnadas com termoplástico, conseguindo-se, por esta via, velocidades lineares de produção de cerca de 1 m.s^{-1} .

As potenciais aplicações dos compósitos de matriz termoplástica incluem perfis redondos e planos para tensionar cabos, rebites de alta resistência, parafusos, raios de bicicleta, reforço de cabos para revestimentos de controlo da erosão e fitas para transporte de materiais de construção pesados. A produção de 'towpregs', pré-impregnados, varões e fitas, reforço de barras para betão, cabos de ferramentas, são também algumas das possíveis aplicações.

No caso do processo de pultrusão utilizando resinas termoplásticas, podem ser utilizados equipamentos tais como os produzidos pela TPT - *Termoplastic Pultrusion Technologies (EUA)*, os quais são constituídos pelo urdidor de fibras, unidade de aquecimento, alimentador de resina (que pode também incluir uma extrusora), câmara de impregnação com controlo de fluxo de resina, mecanismo de medição, fieira, mecanismo de arrefecimento e mecanismo de tracção do perfil (Wilson, 2003).

2.1.2.1.2. Matrizes Termoendurecíveis

As matrizes termoendurecíveis, principal objecto de estudo deste trabalho, não podem ser reprocessadas, uma vez que a reacção desenvolvida dentro da fieira não é reversível, fazendo com que o perfilado adquira uma forma permanente. Normalmente, estas resinas necessitam de cuidados específicos no seu armazenamento e possuem baixa viscosidade, tornando a produção do compósito mais fácil, pois permite a impregnação do reforço sem grandes problemas. No entanto, o processamento dos perfis com este tipo de matriz é mais complexo pois nas etapas de aquecimento, arrefecimento e pressão, necessitam de cuidados específicos, tornando a sua produção mais lenta e, por consequência, com custos mais elevados (Durão, 2010b). Para aplicações não-estruturais e semiestruturais, são usados poliésteres insaturados, resinas de *vinylester* ou resinas fenólicas. Nos compósitos de alta resistência, são usados epóxidos, bismaleimidas e poliimidas (Durão, 2010b).

Nos produtos normalizados, utiliza-se normalmente resinas à base de ácido isoftálico. No entanto, se pretendermos uma alta resistência à corrosão, usa-se a resina '*vinylester*'. Para resistir a altas temperaturas e fogo, aplicam-se resinas fenólicas. Para obter características de isolamento eléctrico especiais, utilizam-se normalmente resinas epóxidas e nos casos em que se pretende que, em caso de incêndio seja desenvolvido pouco fumo, usam-se resinas acrílicas (Fibrolux, 2012).

2.1.2.2. Tipos de Reforços

O tipo de reforço utilizado na produção de materiais compósitos de matriz polimérica assume particular relevância nas propriedades finais exibidas pelo produto. Os reforços usados neste tipo de matrizes classificam-se do seguinte modo:

- **Fibras:** contínuas, descontínuas ou *'wiskers'*, englobados numa matriz;
- **Laminados:** apresentam camadas alternadas de diferentes materiais;
- **Partículas:** os materiais são equiaxiais, podendo apresentar forma esférica;

Existem vários tipos de reforços, tais como a fibra de vidro (a mais utilizada), de carbono, aramídicas, poliamidas, poliésteres, cerâmicas ou naturais. As fibras podem apresentar-se sob as formas de *'roving'*, manta, tecido, pré-impregnado, pré-formas ou compostos de moldação (Durão, 2010b).

O *'roving'*, apresenta-se sob a forma de uma bobine enrolada helicoidalmente, constituída por um cordão de filamentos contínuos. Porém, podem ter mais do que um tipo de fibra, passando a designar-se por *'roving'* híbrido (Starr, 2000).

Os **tecidos**, dependendo do tipo de entrelaçado usado na sua produção, conferem propriedades específicas aos compósitos, visando a melhoria das suas performances mecânicas (Durão, 2010b).

As **mantas**, são fibras distribuídas aleatoriamente e associadas com uma solução especial em emulsão ou em pó, que concede firmeza e deve ser solúvel na fase da impregnação. Poderão ser constituídas por filamentos cortados, filamentos contínuos ou mantas de superfície (Fibrolux, 2012).

Os **pré-impregnados** resultam da pré-impregnação em resina dos reforços atrás mencionados, podendo ser do tipo termoendurecível ou termoplástico. Já as fibras unidirecionais são utilizadas para definir as propriedades do compósito na moldação manual ou automática (Durão, 2010b).

As **pré-formas**, resultam na conformação de uma ou várias camadas de reforço com o *'design'* semelhante ao que deverá possuir a peça (Starr, 2000).

Os **compostos de moldação** são obtidos a partir de fibras curtas ou longas, impregnadas com resina. Normalmente, são usados para a moldação por injeção ou moldação por compressão (Durão, 2010b).

Por fim, temos as **cargas** e os **aditivos**, cada um com propósitos específicos. No caso das cargas, destinam-se sobretudo a diminuir o preço do compósito mantendo a volumetria desejada, melhorar a resistência a quente e a resistência química. Apresentam normalmente boa capacidade de dispersão na matriz, baixa densidade, baixa percentagem de humidade, possibilitam a melhoria das propriedades pós-cura e permitem ainda a introdução de motivos decorativos (Durão, 2010b).



Figura 4 – ‘Roving’, tecido e manta (Corning, 2012)

Tabela 1 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras (Adaptado de Rocarbone, 2012)

Fibra	Tipo	Densidade g/cm ³	Tensão máxima, GPa	Módulo de Young, GPa	Alongamento até à rotura, %
Vidro	E-glass	2,54	3,0 – 3,8	75,8 – 80,7	4,5 – 4,9
	S-2 glass	2,48	4,3 – 4,6	88,3 – 91,0	5,4 – 5,8
Carbono	PAN-SM	1,8	3,4 – 4,8	221 – 241	1,5 – 2,2
	PAN-IM	1,8	4,1 – 6,2	290 – 297	1,3 – 2,0
	PAN-HM	1,9	4,1 – 5,5	345 – 448	0,7 – 1,0
	Pitch-LM	1,9	1,4 – 3,1	172 – 241	0,9
	Pitch-HM	2,0	1,9 – 2,8	379 – 621	0,5
	Pitch-UHM	3,8	2,4	690 – 965	0,3 – 0,4
Aramida	Twaron 1000	1,45	3,1	121,3	3,7
	Kevlar 29	1,44	3,6	82,7	4,0
	Kevlar 49	2,49	3,6	130,3	2,8
	Kevlar 149	2,54	3,5	185,5	2,0
Polietileno PE	Spectra 900	0,97	2,6	79,3	3,6
	Spectra 1000		3,1	100,7	3,3
	Spectra 2000		3,3	124,1	2,8
Polifenileno Benzobisoxazole PBO	Zylon AS	1,54	5,8	180,0	3,5
	HM	1,56	3,6	270,3	2,5

Alguns aditivos vocacionados essencialmente para a melhoria de algumas propriedades específicas, tais como a melhoria da resistência ao fogo, diminuição da contracção da matriz no período de cura e diminuição da emissão de voláteis (melhorando assim a qualidade do ar no ambiente de trabalho), incrementam a tenacidade e a resistência

aos raios ultravioletas e diminuem a sensibilidade ao efeito da corrente estática, entre outros (Durão, 2010).

2.1.3. Tipos de Plásticos Reforçados

Os plásticos reforçados, dentro da família dos materiais compósitos, são, provavelmente, aqueles que apresentam um maior número de aplicações e uma utilização mais frequente, também como consequência da diversidade de produtos e técnicas de fabrico existentes e da óptima relação entre a resistência patenteada e o peso exibido. Normalmente, a nomenclatura utilizada no material está estritamente ligada ao tipo de reforço que utiliza. Assim, os tipos de plásticos reforçados mais usuais são:

- Plásticos reforçados com fibra de vidro;
- Plásticos reforçados com fibra de carbono;
- Plásticos reforçados com fibra aramídica;
- Plásticos reforçados com fibras naturais, com menor percentagem de utilização, não sendo por isso menos importantes, tais como o sisal, etc.

As vantagens dos polímeros reforçados poderão ser observadas no quadro-síntese da figura seguinte:



Figura 5 - Principais vantagens dos polímeros reforçados (Adaptado de Fibrolux, 2012)

2.1.3.1. Os Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro

A fibra de vidro é o tipo de reforço mais utilizado mundialmente. É usado pela indústria em geral, assim como para fins específicos. Dada a evolução tecnológica existente, surgiram novos tipos de fibra de vidro, tornando-se actualmente um dos materiais mais versáteis, com elevado desempenho mecânico e baixo custo.

Os Fenícios e os Egípcios, foram dos primeiros povos a utilizar o vidro sob a forma fibrosa que, juntamente com resinas de origem natural, possibilitavam a produção de objectos e artefactos decorativos e que foi um processo precursor dos compósitos de hoje (Starr, 2000).

Trata-se de um material constituído principalmente por dióxido de silício (SiO_2), aparecendo ainda associado a outros óxidos, os quais auxiliam a fusão do vidro de forma a facilitar a sua passagem nas fiavras, local onde são produzidos os filamentos (Silva, 2010). A sua característica mais predominante é a óptima aderência fibra/matriz, possuindo ainda boas propriedades dieléctricas e uma relação desempenho mecânico/custo altamente atractiva (Silva, 2010).

Existem vários tipos de fibras de vidro, conforme se poderá constatar no quadro abaixo, estando os mesmos classificados segundo letras.

Tabela 2 - Propriedades dos diferentes tipos de fibras de vidro

Tipo	Propriedades
A	Fibra altamente alcalina, com boa resistência química, fracas propriedades eléctricas e de baixo módulo de elasticidade.
C	O principal componente é o borossilicato sódico, tem excelentes propriedades químicas e como principal aplicação as telas superficiais de estruturas anticorrosivas.
D	Possui óptimas propriedades dieléctricas e, devido a este facto, é usada essencialmente em aplicações electrónicas de alto desempenho.
E	Composta por cálcio, alumina e silicato de boro, é a fibra mais usada em aplicações de uso geral, tem baixo conteúdo alcalino, possui excelentes propriedades eléctricas e boas propriedades mecânicas.
L	Tem alto teor em chumbo. É comum a sua aplicação como protector de radiação em instalações de Raios-x e possui alta resistência mecânica.
M	Como tem na sua composição berílio, não é permitida a sua comercialização. Contudo, possui um alto módulo de elasticidade, cerca de 113 GPa.
R	Possui composição química semelhante ao tipo S. apresentando menor teor de SiO_2 , o que se traduz numa redução de cerca de 15% na sua resistência à tracção e alongamento, à temperatura ambiente. O módulo de elasticidade é idêntico ao apresentado pelo tipo S.
S	Composta por silicato de alumínio e magnésio, é usada em estruturas de alto desempenho, mas a sua aplicação maioritária é na indústria da aeronáutica. Possui grande resistência à tracção e elevado módulo de elasticidade, aliados a um bom comportamento à fadiga, temperatura e humidade.

Os tipos de fibra de vidro com maior utilização industrial, são os tipos E e S. O primeiro possui uma resistência específica e módulo de elasticidade inferiores aos do tipo S, porém, não só devido às suas qualidades como também ao seu baixo custo, o campo de aplicação é extremamente vasto. No entanto, quando são requeridas exigências estruturais de relevo, são usadas as fibras de vidro do tipo S, pois são mais resistentes e por consequência, mais caras. Quando está em causa a segurança das pessoas, o factor preço é secundário, passando para primeiro lugar o factor estrutural. O seu campo de aplicação centra-se na indústria aeronáutica (Aviação, 2012) e em todo o tipo de indústrias onde existam estruturas que exigem elevada rigidez. Normalmente, quando uma estrutura metálica é substituída por outra em PRFV, essa substituição fica a dever-se a questões de resistência mecânica. Contudo, poderá também ser motivada por uma maior resistência à corrosão destes materiais, leveza, facilidade de montagem ou por um conjunto das qualidades atrás mencionadas.

As fibras de vidro são menos resistentes do que as fibras de carbono e tem um módulo de elasticidade inferior. Por isso mesmo, não se aplicam em estruturas onde a exigência de rigidez é maior. A seguir são enumeradas algumas das principais propriedades das fibras de vidro mais utilizadas em materiais compósitos.

Tabela 3 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras de vidro (Adaptado de Durão, 2010b)

Propriedades	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm^3)	2,6	2,49	2,55
Módulo de Young (GPa)	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3	5,2
Coef. de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5,0	2,9	4,0

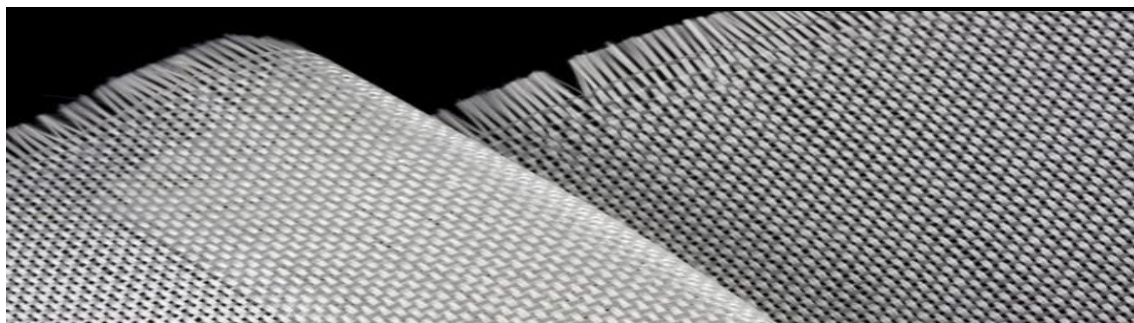


Figura 6 - Tecido de fibra de vidro (Rocarbon, 2012)

A forma sob a qual a fibra de vidro é mais utilizada é o *'roving'* de filamentos contínuos, embora também se utilize sob a forma de tecido, mantas e véus. Com esta diversidade de formatos de apresentação da fibra de vidro, é possível constituir um perfil de resistência de acordo com os requisitos do cliente, pois facilmente se pode colocar a fibra no sentido transversal, longitudinal ou oblíquo, por forma a satisfazer o cliente não só ao nível do desempenho como de custos.

2.1.3.2. Os Plásticos Reforçados com Fibra de Carbono

O número de aplicações que usam fibras de carbono é bastante menor do que aquelas que utilizam a fibra de vidro, muito embora sejam mais leves e possuam uma maior rigidez e resistência. O seu preço é altamente penalizador, pois é bastante elevado comparativamente às fibras de vidro. Contudo, actualmente, com os recentes desenvolvimentos no processamento das fibras de carbono, os preços tiveram uma descida acentuada (Starr, 2000). Este tipo de fibras, para além dos atributos atrás mencionados, possui também baixo coeficiente de dilatação térmica e boa condutividade eléctrica e térmica, sendo usadas em estruturas onde é exigida elevada resistência mecânica, elevada estabilidade dimensional, aliadas ou não à condução de electricidade ou calor (Silva, 2010).

Dada a sua extrema leveza, elevada resistência específica e alto módulo de elasticidade, tem na indústria aeronáutica e aeroespacial o seu mais vasto campo de aplicação (Aviação, 2012).

Apresentam como desvantagens assinaláveis o elevado preço, poder padecer de corrosão galvânica em contacto com os metais e uma menor resistência ao choque (Silva, 2010).

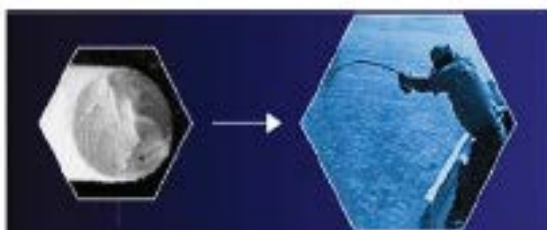
As fibras de carbono são produzidas a partir de precursores orgânicos. As mais utilizadas são as PAN (Poliacrinolitrila), obtidas através da decomposição pelo calor ou pirólise, sendo carbonizadas a temperaturas de cerca de 1000°C, produzindo um segundo produto com alto teor em carbono. Seguidamente ocorre a grafitação, que consiste num aquecimento entre 2000 e 3000°C, o qual promove um alinhamento ordenado dos cristais de carbono no interior da fibra, que dá origem a um filamento de diâmetro e leveza microscópica, com elevadíssima resistência mecânica (Rocarbon, 2012). Também são utilizadas as fibras PITCH, que resultam dos resíduos da destilação do petróleo (carvão de hulha), convenientemente tratados. São obtidas por um processo, que tem início através da eliminação de impurezas do precursor, seguindo-se a adição de determinados aditivos e solventes que serão agitados e

aquecidos a uma temperatura compreendida entre 350 e 450°C, numa atmosfera de gás inerte durante cerca de 20 horas, até se formarem gotas pastosas, forma que permite fiar os filamentos. Segue-se a cura térmica através da reacção por oxidação, que consiste em retirar calor da fibra. Esta operação é executada numa atmosfera oxidante até cerca de 200 - 300°C, passando para a carbonização que dura cerca de 10 segundos, no máximo, a uma temperatura compreendida entre os 1000 e 1500°C. Finalmente ocorre a grafitação, numa atmosfera com argón ou azoto, a uma temperatura de cerca de 2500 - 3000°C (Matsumoto, 1985)

Este processo de produção é mais simples e menos oneroso do que as PAN. A matéria-prima é substancialmente mais barata, contudo são de qualidade inferior. Por isso mesmo, não se aplicam em certas indústrias em que as exigências estruturais são mais elevadas.

Existe um outro precursor para as fibras de carbono, que é o 'Rayon', produto sintético do qual resultam fibras de baixo módulo. Estas fibras são usadas essencialmente na construção civil, permitindo a obtenção de melhores propriedades mecânicas, quando misturadas com o betão, com custos muito inferiores aos seus antecessores (Starr, 2000; Fitzer, 1989)

PAN: Tamanho de grão muito pequeno, permite flexibilidade, resistência mecânica extremamente elevada e boa condutividade eléctrica



PITCH: Tamanho do grão grande, permite elevada rigidez, boa resistência mecânica, condutividade eléctrica e térmica excelente



Figura 7 - Imagens da secção transversal de fibras do tipo PAN e PITCH

Comercialmente as fibras de carbono são classificadas de acordo com a sua rigidez, conforme indicado na tabela seguinte.

Tabela 4 - Classificação das fibras de carbono (Starr, 2000)

Tipo	Módulo de Young (GPa)
SM -- Módulo standard	<265
IM --- Módulo intermédio	265 – 320
HM -- Módulo elevado	320 – 440
UHM – Módulo muito elevado	> 440

Segue-se uma tabela onde se quantificam algumas propriedades dos diferentes tipos de fibras de carbono.

Tabela 5 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras de carbono (Durão, 2010b)

Propriedades	PAN	PITCH	Rayon fibers
Densidade (g/cm ³)	1,8	2,0	1,7
Módulo de Young (GPa)	200-400	400	415-680
Tensão de rotura (MPa)	2480-3100	1550	2070-2760
Deformação na rotura (%)	0,6-1,2	1-1,5	0,5-0,6
Coef. de expansão térmica axial (10 ⁻⁶ /°C)	-0,7 a -0,5	-1,6 a -0,9	-

Como se pode verificar pela tabela anterior, as fibras PAN possuem uma maior tensão de rotura e uma menor deformação relativamente às fibras do tipo PITCH, contudo os módulos de elasticidade poderão ser idênticos.

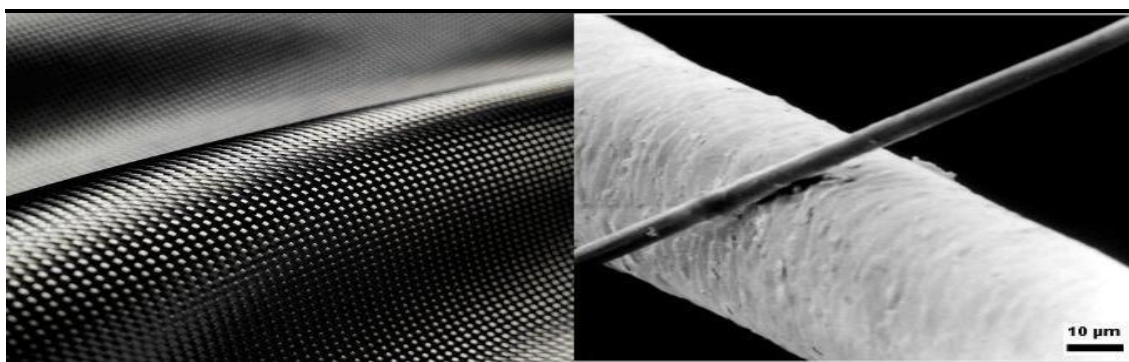


Figura 8 - Tecido de fibra de carbono e um filamento (Rocarbon, 2012)

2.1.3.3. Plásticos Reforçados com outros tipos de fibra

As fibras aramídicas, mais conhecida por fibras de Kevlar (marca registada da empresa Dupont), possuem características distintas das fibras de vidro e das fibras de carbono (Rocarbon, 2012).

Produzidas à base de poliamidas aromáticas, são cerca de 40% mais leves e duas vezes mais rígidas do que as fibras de vidro do tipo E e, relativamente ao alumínio, são cerca de dez vezes mais rígidas (Rocarbon, 2012). Possuem excelente resistência mecânica, química, ao impacto, à fadiga e a temperaturas elevadas, têm uma boa relação rigidez/peso e óptima capacidade de amortecimento a vibrações (Durão, 2010; Rocarbon, 2012). Os factores negativos a considerar são a baixa resistência à compressão e à flexão, assim como alta sensibilidade ao corte interlamelar (Durão, 2010). Devido à sua excelente resistência ao impacto, é aplicado no fabrico de coletes à prova de bala, devido à blindagem e à absorção de

impacto conseguidas (Rocarbon, 2012). Segue-se uma tabela com algumas das propriedades das fibras aramídicas.

Tabela 6 - Características técnicas de diferentes tipos de fibras aramídicas (Adaptado de Durão, 2010)

Propriedades	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149
Densidade (g/cm^3)	1,44	2,49	2,53
Módulo de Young (GPa)	83	130	185,5
Tensão de rotura (MPa)	3600	3600	3500
Deformação na rotura (%)	4,0	2,8	2,0
Coefficiente de expansão térmica axial ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	-2,0	-2,0	-



Figura 9 - Tecido em Kevlar produzido por Dupont (Rocarbon, 2012)

2.1.4. Outras propriedades dos materiais compósitos de matriz polimérica

A exposição a longo prazo dos PRF a temperaturas elevadas e ambientes húmidos, dão origem a mudanças irreversíveis da estrutura e propriedades do polímero da matriz, ou seja, ao envelhecimento. Há um grande número de publicações sobre os efeitos da temperatura elevada e ambientes húmidos nas propriedades mecânicas dos PRF utilizados em aplicações militares e aeroespaciais, fabricados por outros métodos que não a pultrusão (Starr, 2000; Durão, 2010b), mas existem poucas publicações, sobre o efeito do ambiente nas propriedades mecânicas dos perfis com fibra pultrudidos PRF. A necessidade de tal investigação é óbvia, porque a cinética da polimerização da matriz durante a pultrusão em outros métodos de fabrico pode ser diferente. O projecto de vigas pultrudidas em plástico reforçado com fibra é muitas vezes condicionado pelos limites de deformação em serviço, portanto, torna-se necessário avaliar com precisão as tensões de flexão. Aniskevich (Aniskevich, 2012) procedeu à avaliação experimental das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de vidro (PRFV) pultrudidos, fabricados à base de resina de poliéster e fibras de vidro do tipo E, sob a acção de ambiente gravosos, tais como imersão em água a 20 e 66°C. Os resultados

provaram que, a longo prazo, a imersão em água de amostras planas de PRFV / compósito de poliéster, cortado de flanges e almas de perfis pultrudidos com formato em “I”, provoca coeficientes de difusão e incremento do volume diferentes segundo os três eixos principais do compósito. O que apresenta maior valor situa-se na direcção do eixo da fibra, enquanto o mais baixo se direcciona na transversal. A diferença observada na cinética de ganho de massa e de mudança de volume, permitiu avaliar o volume de poros cheios com água. Estes aumentam com o incremento do teor de humidade total no compósito. A dependência do ganho de massa (W_p) em função do volume de poros cheios de água (V_p) poderá ser observada na figura seguinte, tendo por base amostras da alma e as flanges de vigas pultrudidas. A função pode ser representada por duas secções lineares, com um ponto de intersecção correspondente a $W_p = 0,7\%$ e $V_p = 0,8\%$.

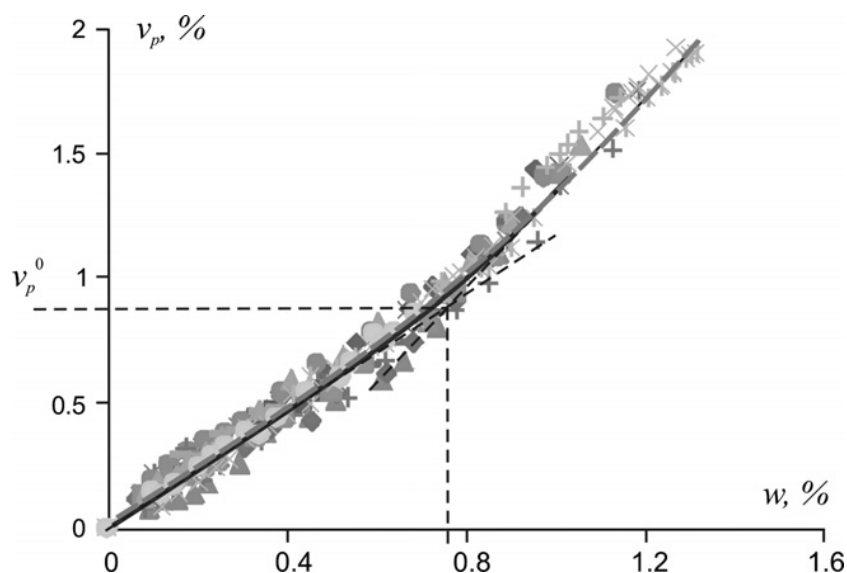


Figura 10 - Teor de volume de poros cheios de água como uma função do ganho de massa a 20°C, para amostras cortadas da alma (linha pontilhada) e flanges (linha sólida), (Aniskevich, 2012)

Foram recolhidos grande número de dados das amostras, cortadas a partir das flanges. Nas extremidades com menor densidade, mostraram menores valores de elasticidade e de tensão. Relativamente aos efeitos da humidade absorvida sobre as características mecânicas, não foram considerados por se encontrarem nas extremidades. As amostras humedecidas até ao nível da saturação, mostraram uma diminuição no módulo de flexão e de tensão de 8% e 16,5%, respectivamente. Não foi verificado qualquer efeito da humidade absorvida sobre a resistência do compósito ao longo do eixo da fibra (Aniskevich, 2012).

2.1.5. Vantagens genéricas dos materiais compósitos de matriz polimérica

Poderão apontar-se como vantagens genéricas dos compósitos de matriz polimérica os seguintes factores:

- Apresentam densidade relativamente baixa;
- Maior facilidade no transporte e montagem de componentes e peças de dimensões apreciáveis;
- Melhor resistência à corrosão, fadiga e impacto;
- Permitem modelar as suas propriedades de acordo com as solicitações do projecto;
- Possuem uma boa resistência torsional.

2.1.6. Desenvolvimentos na aplicação de compósitos de matriz polimérica

Os polímeros reforçados com fibras (PRF) estão a ser cada vez mais utilizados em diferentes aplicações, com especial relevância nas indústrias da construção civil, transporte, aeronáutica e aeroespacial, entre outras (Correia, 2011).

O novo avião de passageiros Airbus A380 usa cerca de 22% (em peso) da sua estrutura em materiais compósitos. O arquiteto Peter Testa, efectuou uma apresentação sobre um protótipo de arranha-céus com base em materiais compósitos, referindo que os arquitetos procuram actualmente novos materiais para utilização na construção civil que permitam a construção de edifícios mais seguros, mais flexíveis e mais inteligentes.

O protótipo da Torre de Carbono encontra-se em desenvolvimento pela Peter Testa Arquitectos e usa materiais compósitos, num projeto que é radicalmente diferente das abordagens tradicionais da arquitectura. É fundamental a reflexão durante a execução dos projectos, de forma a tirar partido dos novos materiais de construção. A torre é um exemplo que permite repensar a concepção de construção, tirando proveito das propriedades dos novos materiais. Baseia-se numa estrutura helicoidal, pré-comprimida, formada por duas tesouras de encravamento que são retidas à tracção por um sistema de pavimento. Esta estrutura permite a remoção de todos os elementos estruturais verticais: dentro da construção não há colunas. A estrutura primária usa 24 fios trançados de fibras de carbono, num perfil pultrudido de secção transversal rectangular de 300 x 30 mm e é projectado para ser tecido no local, usando para o efeito sistemas robotizados de pultrusão (Jacob, 2004).



Figura 11 - Maquete da Torre de Carbono projectada por Peter Testa em 2005

Os polímeros reforçados com fibra têm atraído o interesse de muitos investigadores na área da engenharia civil, desde a década de 1980. Os PRF têm maior resistência e rigidez e são muito mais leves do que os materiais de construção tradicionais, tais como o betão e o aço, (Zi, 2007), o que, na prática, se traduz numa maior facilidade de movimentação dos diferentes componentes estruturais, permitindo assim uma instalação rápida e sem manutenção durante a vida útil de uma ponte. Nos últimos anos, os investigadores tendencialmente admitem que é a solução mais correcta para a renovação das infra-estruturas tradicionais. No entanto, até agora, estes materiais não conseguiram afirmar-se na construção de pontes. Têm sido utilizados apenas em projectos de demonstração em vias de baixo tráfego ou situações onde as estruturas estão sujeitas a cargas moderadas, como pontes pedestres. A área onde tem havido um crescimento notável é na construção da plataforma da ponte. Apesar das excelentes propriedades mecânicas, o uso de FRP em engenharia civil tem sido limitado a reforçar ou a reabilitar componentes estruturais existentes, devido ao preço mais elevado dos materiais (Arduini, 1997; Einde, 2003). À medida que os preços decrescem, têm sido feitas várias tentativas para fabricar os principais elementos estruturais, como vigas e plataformas, utilizando apenas PRF (Zi, 2007; Davalos, 1996; Park, 2005; Salim, 1997).

Reeve (Reeve, 2001) e Burgoyne (Burgoyne, 1997) identificaram algumas das questões que impedem o uso generalizado de materiais compósitos em pontes. A principal é o custo inicial. Também existem outros impedimentos menos importantes tais como o *'design'* e especificações-padrão. Actualmente, o custo inicial dos materiais compósitos é relativamente elevado, quando comparado com o custo do betão e do aço. Em *Queensland*, Austrália, o Departamento de Estradas Principais anunciou no dia 4 de Junho de 2007 que iria substituir 10 pontes de madeira em *Southern Queensland* por estruturas de betão, em vez de compósito de fibra, porque este material é actualmente ainda muito caro, mas não deixou de acrescentar que: "uma vez que a produção de materiais compósitos está a aumentar, o custo irá certamente cair e, sem dúvida, será um material muito competitivo que pode vir a ser usado no futuro". O aumento da competitividade destes materiais só pode ser alcançada através de processos de produção em grande volume, automatizados, tais como a pultrusão ou o enrolamento filamentar, que têm o potencial necessário para minimizar o custo unitário do produto final e fazer compósitos a preços competitivos, relativamente aos materiais tradicionais. O *'design'* é uma outra questão que afecta a introdução de materiais compósitos na indústria da construção. No entanto, a maioria dos engenheiros familiarizados com materiais compósitos não são da área da construção, enquanto os engenheiros civis têm tendência a pensar nos materiais compósitos como aplicáveis apenas à produção de pequenas peças industriais. Este dilema foi muito bem resumido por Burgoyne (Burgoyne, 1997), o qual referiu que: "Os compósitos são um novo material que eu não compreendo correctamente, portanto, vou usá-los na aplicação mais simples, que é como reforço. Vou criar um formato tradicional e vou substituir o aço por uma área de fibra com a mesma resistência ou dar a mesma rigidez global. Vou usar as fibras mais baratas que eu possa encontrar, combinada com a resina mais barata. Vou projectar a secção da mesma forma como fiz antes, mas uma vez que o objetivo do exercício é produzir uma ponte sem problemas de corrosão, todos os reforços devem ser não-metálicos. Vou comparar os custos da nova estrutura com as equivalentes estruturas tradicionais". Na verdade, esta é a abordagem que tem sido seguida no passado ao projectar vigas híbridas mistas (Deskovic, 1995), ou seja, todos esses projectos imitam o betão armado. Uma viga de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) é combinada com uma camada de betão, moldada sobre a flange superior e um fino plástico reforçado com fibra de carbono (PRFC) laminado adere à zona em tracção, como mostra a figura seguinte:



Figura 12 - Representação esquemática da montagem do conjunto Betão/PRFV/PRFC (Khennane, 2008)

O betão evita que o topo sofra encurvadura/deflexão quando sujeito à compressão, enquanto o PRFV lateral pode deflectir com a carga, funcionando como sensor e fornecendo a ductilidade necessária ao conjunto (Khennane, 2008).

É interessante notar que o material mais rígido - o laminado de carbono -, é concebido para falhar em primeiro lugar, como um alerta de falha. Com efeito, o laminado de carbono está a desempenhar o papel de aço que se encontra numa viga de betão armado. No entanto os projectistas não percebem que, limitando a quantidade de carbono que pode ser utilizado na secção transversal, estão a limitar a rigidez da viga. Como resultado disso, quando estas vigas são utilizadas numa ponte, elas têm de ser colocadas lado a lado, como mostrado na figura 13, devido à falta de rigidez inerente (Khennane, 2008).

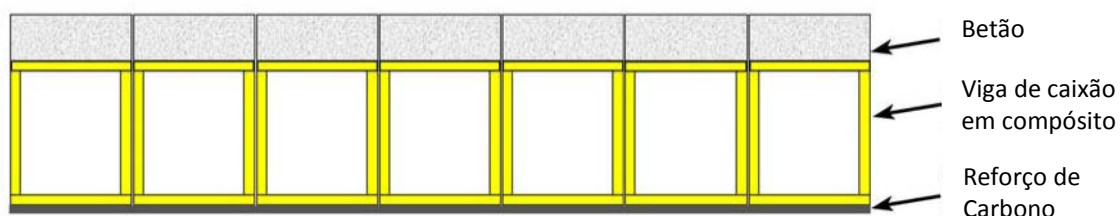


Figura 13 - Aplicação específica num tabuleiro de uma ponte, tendo por base a viga acima referenciada (Khennane, 2008)

O desenho da nova viga proposta é mostrado esquematicamente na Figura 14.

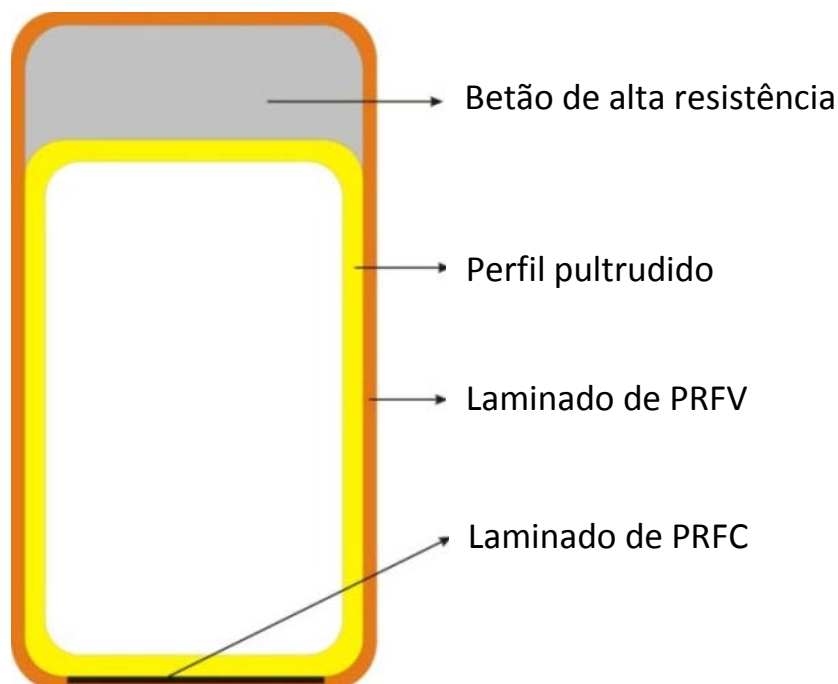


Figura 14 - Configuração proposta para uma viga híbrida de PRF-HPC (Kennane, 2008)

A secção é composta por um perfil pultrudido, um laminado de PRFV exterior com fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, um bloco de betão de elevado desempenho (HPC), e um laminado de PRFC. Para minimizar o custo da viga, é usada uma “caixa” em perfil pultrudido tubular em plástico reforçado com fibra de vidro, de uso comum. As “caixas” com paredes finas assim realizadas são muito eficientes para as vigas, pois têm uma elevada resistência à torção lateral e encurvadura. A utilização de betão de alto desempenho, em substituição do betão normal, irá resultar num aumento global da rigidez da viga e numa redução da sua profundidade, aumentando a sua capacidade de carga. Na prática, isso traduzir-se-á em vãos maiores, aumento do espaçamento entre vigas e secções relativamente finas (Khennane, 2008).

Os tabuleiros das pontes, normalmente são executados em betão e transmitem a carga dos veículos para as vigas. Muito embora os tabuleiros das pontes não possuam a mesma importância que as vigas, o seu peso representa cerca de 70% do peso total de uma ponte que se baseie em vigas de aço e plataforma de betão. Portanto, torna-se natural a ambição de considerar a construção de um tabuleiro com materiais mais leves, como plásticos reforçados com fibras (FRP). Tem-se verificado ultimamente a congregação de vários esforços de pesquisa, envolvidos no desenvolvimento de PRF, com vista à sua aplicação em pavimentos das pontes.

Os plásticos reforçados com fibras de vidro (PRFV) são mais leves e também muito mais fortes do que o betão. Portanto, as plataformas das pontes em PRFV, não necessitam ser peças maciças. Elas são fabricadas sob a forma de estruturas de paredes finas, com espaços vazios no seu interior. É evidente que os plásticos reforçados com fibras de carbono (PRFC) tem melhores propriedades mecânicas, mas a sua preferência é posta em causa, devido ao seu elevado preço. As plataformas de PRFV mais comuns são produzidas por pultrusão, processo em que as fibras de vidro são impregnadas em resina e puxadas para fora, através de uma fiação a uma temperatura elevada. As plataformas de PRFV são contínuas, na direcção da pultrusão e são construídas e colocadas na direcção longitudinal. Na direcção transversal, essas paredes finas estão convenientemente ligadas, para formar uma secção transversal.

A forma da secção fechada, pode ser triangular, rectangular ou trapezoidal. Estes formatos dependem do tipo de ligação, conforme indicado na figura 15. As plataformas de PRFV manifestam um comportamento quase linear até à capacidade máxima de carga, na direcção longitudinal. Todavia, na direcção transversal, os comportamentos são normalmente não-lineares (Qiao, 2001; Park, 2005; Salim, 1997). A não-linearidade depende substancialmente do tipo de secção transversal. Vários investigadores têm direccionado os seus estudos por forma a encontrar a secção transversal mais satisfatória. A forma triangular mostrada na figura 15c apresenta o melhor desempenho, devido a actuar como treliça. No entanto, os ângulos agudos não favorecem o processo de pultrusão. Por este motivo, o formato trapezoidal reúne um maior consenso, devido ao facto de existir um compromisso entre rectângulos e triângulos, sendo os mais frequentemente utilizados nas plataformas em PRFV (Zi, 2007).

Outro tipo de secção transversal usado é a estrutura tipo sanduíche. É constituída por uma placa fina, tanto na parte superior como na inferior, as quais se designam por flanges e, entre as quais existe uma estrutura do tipo favos de mel. A estrutura sanduíche foi concebida por forma a resistir à tracção e compressão nas suas faces exteriores, enquanto o núcleo resiste à deformação de corte. Existem vários tipos de materiais utilizados para o núcleo, entre os quais as células preenchidas com espuma de PVC e as estruturas em favo de mel, mas qualquer uma delas é muito cara para ser aplicada em estruturas de construção civil (Zi, 2007).

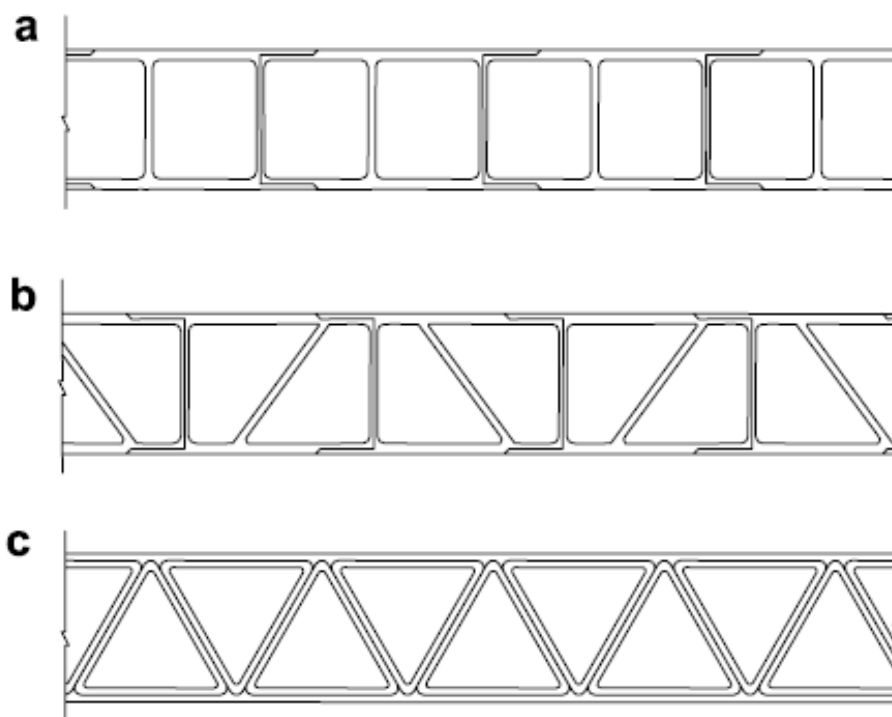


Figura 15 - Formatos de plataformas usadas (Zi, 2007)

Na Suíça, foi criado um plano para minimizar o ruído ferroviário há 15 anos atrás. Verificou-se que a sua eficiência ultrapassou aquilo que era expectável, o que veio a ditar a instalação de 300km de barreiras acústicas. Para tornar possível o uso de perfis pultrudidos em plástico reforçado com fibra de vidro como barreira de ruído, foi criada uma especificação relativa ao projecto e instalação, a qual foi preparada para aprovação de um protótipo. Veio a confirmar-se que os requisitos definidos nas especificações são razoáveis e podem ser cumpridos de forma viável pelos fabricantes deste tipo de produtos. O projecto resultou num compromisso coerente entre os requisitos de 'design', resistência e rigidez, permitindo encontrar uma solução que minimiza possíveis efeitos nefastos de impacto ambiental (Keller, 2007).

No entanto, as barreiras compostas por fibras de vidro e uma matriz de poliéster com um revestimento protector, mostraram que mesmo um pequeno número de riscos no revestimento, podem afectar fortemente a resistência a longo prazo do material PRFV, dentro da fundação de betão. Assim, para atender às especificações, verificou-se que é vital que as barreiras sejam sujeitas a um exigente programa de testes que inclui ensaios em grande escala de carga quási-estática e testes de fadiga e de durabilidade acelerada, com duração mínima de 6 meses.

O sistema aprovado compreende uma matriz de poliéster com resistência limitada à mistura entre os produtos alcalinos e a humidade pelos quais é atacado dentro da fundação de betão. Para compensar tal deficiência, deve ser aplicado um revestimento combinado do tipo PE-PU. Mesmo assim, os testes permitiram concluir que mesmo um pequeno número de arranhões no revestimento (que ocorrem durante a instalação) pode afectar fortemente a resistência a longo prazo do material. Assim, a resistência a estabelecer para o projecto deverá estar multiplicada por um factor de 2,41, enquanto a rigidez deve ser multiplicada por um factor de apenas 1,26. Também é recomendada a substituição do sistema poliéster/revestimento por um sistema 'Vinylester' (sem revestimento). Testes intensivos indicaram consideráveis reduções da resistência à flexão e ao corte, devido a deformação prematura das flanges e da alma. A resistência do material não pode ser plenamente explorada, como se verifica no caso dos postes de aço convencionais. Para além disso, verificou-se uma pequena redução da rigidez (7%) no sistema de fundações, durante a realização de 12 milhões de ciclos de fadiga, principalmente devido à fissuração do betão. O processo de aprovação mostrou que os requisitos da especificação da SBB (Swiss Federal Railways) são razoáveis e podem ser perfeitamente alcançados, dando lugar a um sistema coerente que concilia a resistência e rigidez necessárias com os valores do 'design' que visam criar o menor impacto ambiental possível, tanto na solução exposta como incorporada, tanto em aplicações de curto como de longo prazo. Com base neste projecto, verifica-se que as barreiras de PRFV podem ser projectadas na prática de acordo com os códigos existentes, sem necessidade de conhecimentos específicos da teoria correspondente aos PRFV (Keller, 2007). Com a aplicação do método de pultrusão, o fabrico em grande escala de perfis com diferentes formas e secções transversais, destinados a estruturas em que o seu peso é crítico, tais como convés dos navios, superestruturas como pontes e edifícios, passou a ser viável (Anishevich, 2012).

Um estudo elaborado com base em duas pesquisas, permitiu desenvolver dois sistemas híbridos para aplicações estruturais. O primeiro estudo descreve a aplicação de placas pultrudidas em cofragens permanentes de tabuleiros de pontes e auto-estradas, onde as placas são usadas/ligadas com betão para produzir uma placa sólida de 200 mm de espessura. Estas placas são normalmente utilizadas em plataformas rodoviárias. O segundo estudo descreve o uso de placas pultrudidas no tabuleiro de pontes pedonais, as quais são unidas com um cimento próprio para a sua ligação ou com betão vazado no local, dando lugar a lajes ocas de 75 mm de espessura, idênticas aos tabuleiros de pontes pedonais construídos em madeira.

Foram realizados testes nas vigas das placas híbridas para investigar a carga e mecanismos de transferência entre a placa pultrudida e as sobreposições de cimento para ambas as profundidades em estudo, respectivamente 75 e 200 mm. A partir da análise da capacidade de condução da carga e falha nos mecanismos das placas híbridas, concluiu-se que essas placas são sistemas híbridos viáveis, tanto para estradas rodoviárias como para tabuleiros de pontes pedonais. Um tabuleiro da ponte, usando placas deste sistema híbrido com 200 mm de profundidade, foi recentemente construído numa estrada em Wisconsin, EUA. Compostas por fibra de vidro reforçada com poliéster e resina, e com nervuras em *Vynlester*, as placas pultrudidas são produzidos pela grande maioria das empresas de pultrusão comerciais, para uso em plataformas de PRF e sistemas de escadas. Nos EUA são conhecidos pelos seus nomes comerciais, como *SafPlank* e *SafDeck*, quando produzidos pela *Strongwell*, *SuperPlankTM* e *Tuf-dekTM* quando fabricados pela *Creative Pultrusions* ou por *Deckboard* quando produzidos pela *Bedford*. As placas pultrudidas possuem normalmente um rebordo próprio, no género de um sulco longitudinal, que permite que as placas sejam montadas numa grande plataforma ou sob a forma de tabuleiro. Elas podem ser fornecidas como um epóxico na superfície superior, para melhorar o atrito e facilitar o deslocamento de viaturas e pessoas sobre as mesmas. Nas novas aplicações descritas nesse trabalho, as pranchas pultrudidas são utilizadas na sua posição invertida, com a superfície sólida virada para baixo e as nervuras voltadas para cima (Bank, Oliva, Bae, Bindrich, 2010).

O custo total para uma vida de 20 anos comparando GRP de aço e aço inoxidável

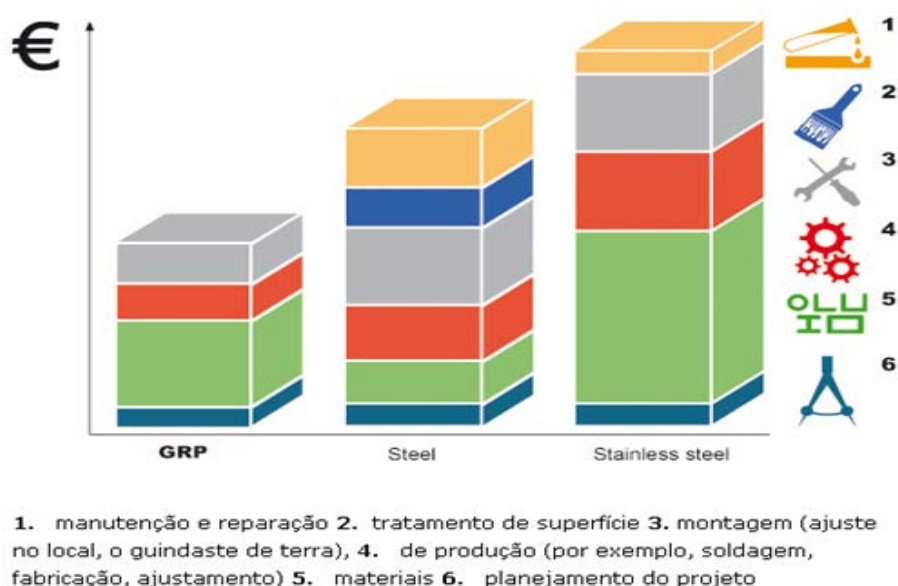


Figura 16 - Estudo comparativo entre os FRP e o aço comum e aço inoxidável (Adaptado de Fibrolux, 2012)

2.1.7. Investigações mais recentes na área dos materiais compósitos com vista a aplicações específicas

A indústria de compósitos está a produzir actualmente uma vasta gama de produtos à base de PRFV que incluem tiras e folhas de reforço, barras de reforço, perfis estruturais, painéis sanduíche, placas moldadas e tubos. A gestão dos resíduos de materiais à base de PRFV, especialmente aqueles que são produzidos com resinas termoendurecíveis, são críticos para a indústria dos compósitos, já que estes materiais são de difícil reprocessamento. Portanto, a maioria dos resíduos termoendurecíveis, é presentemente enviada para aterro, apesar do impacto ambiental negativo causado. Atendendo a que a produção destes resíduos tende a aumentar fortemente à medida que novas aplicações vão sendo criadas para este tipo de material, tornam-se necessárias novas soluções para gerir esta situação. Têm sido efectuados estudos com vista a explorar a viabilidade da incorporação dos resíduos mais pequenos, gerados durante o processo de fabrico de peças e produtos em PRFV em misturas de betão. Os testes foram realizados para avaliar as propriedades de misturas de betão, na qual entre 0% e 20% de areia foram substituídos por pequenos resíduos de PRFV. Embora a incorporação de elevadas proporções de resíduos piorem o desempenho do betão, em termos de propriedades mecânicas e durabilidade, parece possível a incorporação de baixas proporções de PRFV, viabilizando a sua reutilização em betão, particularmente em aplicações não estruturais, tais como betão arquitectónico ou lajes para pavimentos, onde as propriedades mecânicas requeridas são menos exigentes (Correia, 2011).

A utilização do processo de pultrusão para fabricação de compósitos de polímeros reforçados com fibra (PRF) incorporando sensores ópticos foi também alvo de desenvolvimento. O objectivo passa pelo uso de materiais compósitos inteligentes para monitorização de estruturas e pontes. Sensores de fibra óptica podem ser incorporados com êxito durante a pultrusão de barras de PRF. Através desse sistema, foi possível monitorizar a saída dos sensores de tensão através da fibra óptica incorporada durante a pultrusão de hastes de compósito. Estas podem fornecer informações extremamente úteis sobre a formação de tensões induzidas pelo processo de pultrusão dentro da fieira e, depois, em funcionamento. Para verificar a operação dos sensores ópticos incorporados em perfis estruturais pultrudidos Inteligentes, realizaram-se ensaios mecânicos e a saída dos sensores de fibra óptica foi comparada com os valores obtidos através do uso de um extensómetro durante ensaios de tracção e ensaios cíclicos de fadiga (Kalamkarov, 1999).

Os sensores de tensão através de fibra óptica foram também incorporados com sucesso em compósitos de fibra de vidro e de carbono, no processamento por pultrusão. Esta aplicação especial dá origem à utilização de compósitos reforçados inteligentes, que irão monitorizar as tensões em estruturas inovadoras de engenharia civil. A avaliação destes compósitos reforçados inteligentes com sensores incorporados é realizada, englobando ensaios mecânicos à temperatura ambiente, bem como sob condições de baixa e alta temperatura. Nestes testes, verificou-se que a tensão de saída dos sensores de fibra óptica incorporados estava de acordo com o sinal de saída dos extensómetros montados na superfície dos perfis. O comportamento à fadiga oligocíclica nestes compósitos inteligentes foi também explorado. Por fim, foi também avaliado o desempenho a longo prazo dos compósitos inteligentes, sob cargas constantes em ambientes alcalinos, simulando as condições encontradas nas estruturas de betão (Kalamkarov, 2000).

Os sensores de tensão de fibra óptica apresentam inúmeras vantagens quando comparados com o método tradicional de medida, baseado em extensómetros, tais como: perdas de resistência mínimas, elevada resistência à corrosão, cablagens reduzidas ao mínimo, dimensões bastante reduzidas, o que implica pouca ou nenhuma perturbação para a estrutura a ser monitorizada, e a capacidade de se fazerem medições de deformação, isentas de qualquer anomalia. Existem dois tipos de sensores que são os mais usados actualmente: o sensor de *Fabry-Perot* e o sensor de *Bragg-Grating*. Os sensores de fibra óptica têm sido utilizados para monitorizar o estado das estruturas de diferentes tipos de material, tais como o aço, alumínio, betão e materiais compósitos.

Os sensores de fibra óptica podem ser montados numa superfície da estrutura ou numa amostra de teste, do mesmo modo que os tradicionais medidores de alumínio. Um adesivo adequado é usado para ligar o sensor ao substrato. As características do adesivo são muito importantes, pois deve garantir eficazmente a transferência dos dados a partir do substrato para o sensor. A relevância desta nova pesquisa, envolve a produção de materiais compósitos inteligentes, em que o elemento óptico de monitorização é incorporado dentro do material compósito durante a sua fabricação.

O sensor incorporado é assim bem protegido contra ambientes externos mais agressivos, bem como do manuseamento durante as fases de construção. Poderão ser apontados como exemplo de estruturas de compósitos que podem beneficiar com os sensores de tensão de fibra óptica incorporados os cabos de PRFC das pontes suspensas, barras de PRFV para betão de reforço em ambientes corrosivos e cabos de pré-esforço em PRFV ou PRFC.

Ficou já demonstrado que existe uma transferência efectiva de tensão do material compósito anfitrião para o elemento sensor, usando sensores ópticos embebidos.

Os sensores de fibra óptica e os materiais compósitos inteligentes têm demonstrado um futuro promissor na substituição dos medidores tradicionais de tensão em materiais, não existindo, no entanto, dados suficientes para analisar o seu comportamento a longo prazo, como é o caso dos medidores tradicionais, que são facilmente afectados pelo meio ambiente.

Para aplicações civis e marítimas, os materiais compósitos, associados a sensores ópticos vão encontrar, por adição, tensões residuais, condições climatéricas adversas, fortes gradientes de temperatura, humidade excessiva e elevada exposição química. Uma aplicação típica pode ter um tempo de vida esperado de mais de 50 anos. Os investigadores pretendem assim acelerar os testes de envelhecimento, para obter informações no que diz respeito à fiabilidade a longo prazo dos sensores de fibra óptica.

O desempenho global dos sensores de fibra óptica e suas ligações está fortemente dependente da forma como estes são montados: na superfície ou incorporados. Quando incorporados, os sensores tem um nível muito mais elevado de protecção do que os montados à superfície e a matriz de resina do compósito protege-os contra possíveis ataques químicos (Kalamkarov, 2000).

2.1.8. Técnicas de produção mais usuais em materiais compósitos de matriz polimérica

Os compósitos à base de plástico reforçado com fibras de vidro podem ser fabricados com recurso a diversas técnicas de produção, dependendo da qualidade pretendida, da série ou séries de peças a realizar, da geometria, do produto e dos materiais em que vai ser fabricado.

Atendendo a que é sempre um produto heterogéneo, constituído por uma matriz, normalmente fornecida no estado líquido e por reforços, que poderão apresentar-se sob diversas formas, também estes poderão ter uma palavra a dizer na selecção do processo.

Segue-se uma tabela que, em termos genéricos, nos elucida sobre quais os processos mais utilizados para o fabrico de materiais compósitos, quer com matriz termoendurecível, quer termoplástica.

Tabela 7 - Processos de fabrico mais utilizados (Adaptado de *Mazumdar, 2001*)

Processos de produção de materiais compósitos poliméricos			
Termoendurecíveis		Termoplásticos	
Fibras curtas	Fibras contínuas	Fibras curtas	Fibras contínuas
Moldação por			
SMC	Enrolamento Filamentar	Injecção	Termoformação
BMC	Pultrusão	Sopro	Compressão
Injecção	RTM		Autoclave
Pistola	Manual		Diafragma
Injecção de resina	Autoclave		Fita de Enrolamento
Estrutural	Revestimento Enrolado		

Seguidamente serão abordados de forma genérica os principais processos de fabrico de materiais compósitos termoendurecíveis, com particular incidência na pultrusão, pelo facto de ter sido este o processo utilizado na obtenção dos perfis híbridos, que são objecto de análise nesta dissertação.

Considerando alguns dos processos acima indicados, assim como outros que pela sua relevância são utilizados frequentemente, irão ser aprofundados os seguintes processos:

- Moldação Manual (*Hand lay-up*)
- Moldação com Pistola (*Spray lay-up*)
- Moldação por Vácuo (*Vacuum bagging*)
- Injecção de Compósitos de Matriz Polimérica
- Compressão
- Termoformação
- Pultrusão
- Técnicas de Colocação de Fibras
- Enrolamento Filamentar

2.1.8.1. Processos Manuais

2.1.8.1.1. Moldação Manual ('Hand lay-up')

Também conhecido por '*Wet lay-up*', foi a primeira técnica utilizada e, nos dias de hoje, continua a ser o processo mais utilizado na produção de pequenas séries e peças de grande superfície. É o método mais económico, não exige mão-de-obra especializada, nem de grandes investimentos. Contudo, é trabalhoso e de baixa cadência de produção.

Basicamente, consiste em aplicar o reforço sobre a superfície do molde, seguindo-se a impregnação das fibras com resina, com a ajuda de um pincel, de um rolo ou de uma espátula, que possui também a função de compactar as fibras, fazer uma distribuição uniforme da resina e eliminar as bolhas de ar. O processo de cura pode ser efectuado à temperatura ambiente, numa estufa ou num forno. Depois de curado, é retirado do molde. Apresenta um acabamento liso apenas em uma das superfícies. Pelo facto de se tratar de um molde aberto, existem preocupações ambientais a ter em conta, devido à libertação de gases voláteis.

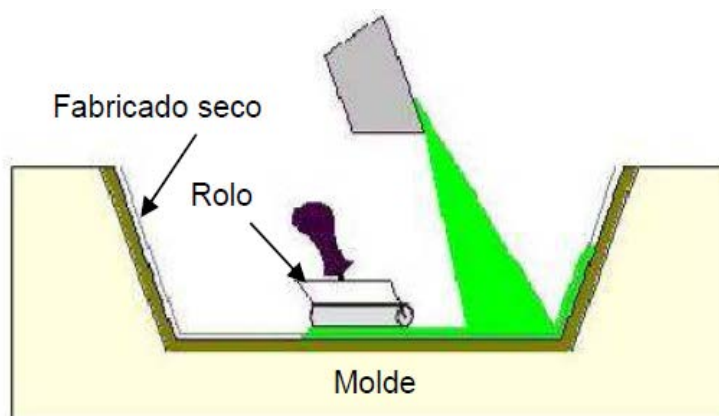


Figura 17 - Esquema do processo de moldação manual de PRF (Adaptado de Franco, 2008)

Devido à simplicidade deste processo e de baixo investimento necessário, é bastante usado para a produção de protótipos, assim como de peças simples ou complexas, pelo facto da concepção do molde ser bastante fácil relativamente a outros processos de fabrico e porque a cura se pode fazer à temperatura ambiente. Este processo é também bastante utilizado na indústria naval, no fabrico de tanques de armazenagem e piscinas, entre outros.

2.1.8.1.2. Moldação à Pistola ('Spray lay-up')

A moldação à pistola é um processo intermédio entre a moldação manual e a mecanização, resultando na primeira versão mecanizada do processo manual, idêntico ao processo 'wet lay-up'. A única diferença reside na aplicação do reforço e resina no molde. É um processo mais rápido do que o seu antecessor. Consiste na aplicação de um agente desmoldante na superfície do molde, seguido de um revestimento de 'gel-coat' que, depois de endurecido, recebe a projecção de fibras cortadas sobre a superfície do molde, impregnadas com resina, através de uma pistola de ar comprimido, sendo necessário passar o rolo na superfície projectada de fibra e resina, para eliminar as bolhas de ar criadas, assim como uniformizar a espessura e suavizar a superfície do laminado. Contudo para efectuar uma boa pulverização e impregnação, a resina deverá ter uma viscosidade da ordem de 3 a 5 Poise a 25°C. Poderá ser misturada com agentes de enchimento, seguindo-se a secagem, que poderá ser feita à temperatura ambiente ou num forno, sendo finalmente retirado do molde. Com a utilização de pistolas específicas, conseguem-se padrões de pulverização mais controlados e uma menor emissão de gases voláteis.

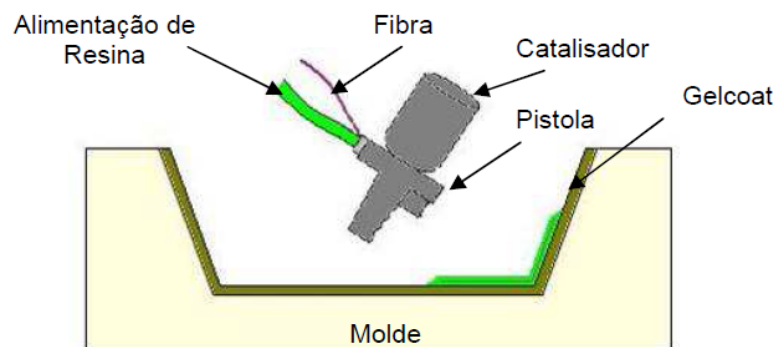


Figura 18 - Esquema do processo de moldação à pistola (Adaptado de Franco, 2008)

Este processo, não permite elevadas fracções volúmicas de fibras. É usado normalmente na produção de peças de médio e grande formato, e com formas simples, quando as mesmas não requerem grande resistência específica. É um processo económico, pois as ferramentas, bem como o tipo de material utilizado, são de baixo custo. Tem a sua maior aplicabilidade na indústria naval e de mobiliário, no fabrico de piscinas, tanques de armazenamento, etc.

2.1.8.1.3. Moldação por Vácuo ('Vacuum bagging')

A moldação por vácuo é também conhecida por '*prepeg lay-up*'. É uma evolução do processo manual, sendo basicamente executado da mesma forma, só que neste caso a peça a produzir é envolvida por uma bolsa em plástico, à qual são ligados tubos, válvulas e bomba de vácuo, os quais têm por finalidade a extracção do ar dentro da bolsa, criando-se uma atmosfera de depressão que ajuda a consolidar a peça, minimizando as bolhas de ar e o excesso de resina é retirado através de filmes absorventes, o que reduz a quantidade de produtos voláteis na cura.

A cura é realizada num forno ou num autoclave. Este processo proporciona um produto final do qual resultam peças de boa qualidade e com bom acabamento em ambas as superfícies.

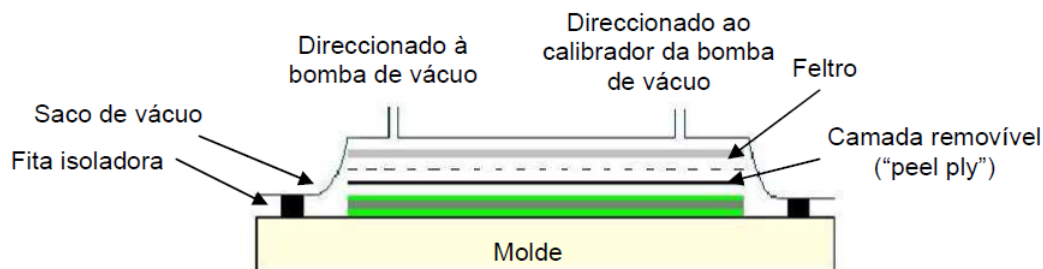


Figura 19 - Esquema do processo de moldação por vácuo (Adaptado de Franco, 2008)

Este processo permite a concepção de peças com formas complexas e de alto teor mássico de fibras, sendo adequado à produção de protótipos. Apesar dos moldes serem económicos, o mesmo não se pode dizer do equipamento, principalmente do autoclave, pois são bastante dispendiosos. É um processo trabalhoso e as peças produzidas com '*prepegs*' apresentam um custo mais elevado. É bastante utilizado na indústria aeroespacial, naval, no fabrico de equipamentos desportivos, entre outros.

2.1.8.2. Injecção de Compósitos de Matriz Polimérica

2.1.8.2.1. Moldação por Transferência de Resina ('RTM - Resin Transfer Molding')

Também conhecida por "Infusão de resina", constitui uma evolução dos processos até agora descritos, já que é uma forma mecanizada de produção de peças. Existem algumas variações deste processo, sendo mencionadas as mais usuais.

Este processo utiliza um molde dividido em duas partes: macho e fêmea. Na parte fêmea do molde são colocados os reforços, os quais se apresentam normalmente sob a forma de “pré-formas”, sendo o molde firmemente fechado com a parte macho. Segue-se a injeção de resina pressurizada para o interior do mesmo, por um ou mais orifícios, impregnando as fibras que se encontram no interior. Em determinados casos, o calor poderá ser aplicado directamente no molde, para encurtar o tempo de cura.

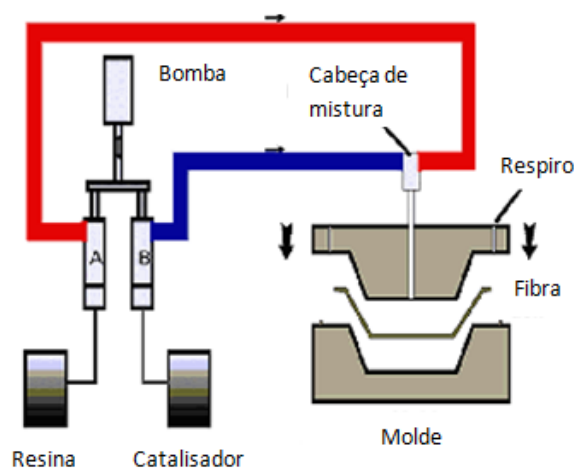
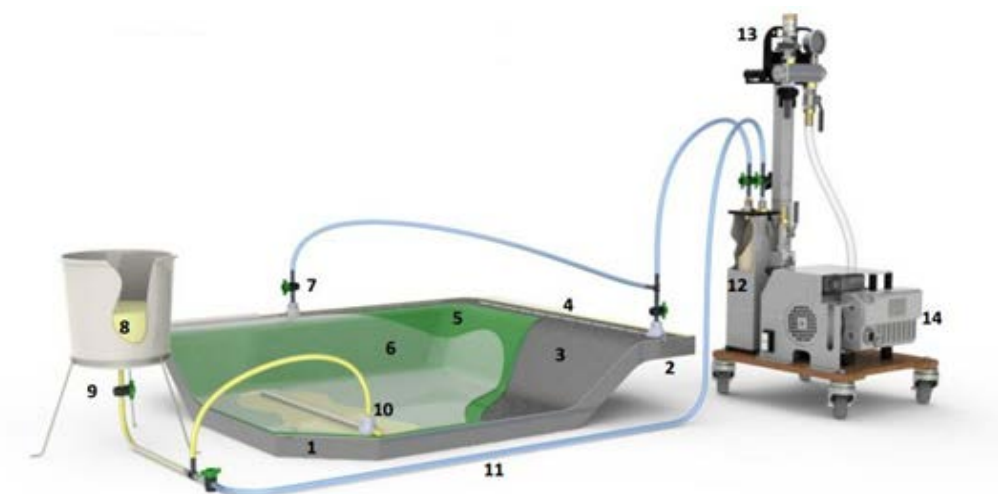


Figura 20 - Esquema do processo por RTM (Ctihuatai, 2008)

Este processo pode ser utilizado para produzir pequenas e grandes estruturas complexas. As peças obtidas possuem excelente acabamento em ambas as superfícies e muito boa qualidade. É adequado para a produção de pequenas e médias séries de peças, sendo um processo bastante utilizado na indústria automóvel, aeronáutica e equipamentos desportivos, entre outros.

2.1.8.2.2. Moldação por Transferência de Resina com Vácuo Assistido ('VARTM - Vacuum Assisted Resin Transfer Molding')

Este processo é uma variante do processo RTM, que mistura o processo anterior com a moldação por vácuo. Utiliza um molde aberto onde são colocadas as fibras, seguindo-se a colocação do contramolde. O mesmo deve ser executado com materiais translúcidos, pois permite verificar a circulação da resina e confirmar se o reforço se encontra posicionado correctamente. De seguida procede-se à colocação da película que irá vedar o molde, permitindo que seja efectuado o vácuo, para depois entrar então a resina por via da gravidade ou com o auxílio de uma bomba injectora. O circuito de vácuo é totalmente distinto do circuito de introdução de resina. A cura faz-se normalmente à temperatura ambiente.



Legenda:

1 – Molde estanque e pré-tratado com desmoldante	7 – Válvula de controlo do vácuo
2 – Vedação flangeada	8 – Tanque de resina
3 – Material laminado seco colocado no molde	9 – Válvula de controlo de resina
4 – Linha de vácuo permeável montada sob o saco de vácuo	10 – Ponto de entrada da resina
5 – Material descartável “peel ply”, aplicado por cima do laminado	11 – Opcional, linha de vácuo para pré-evacuação
6 – Saco de vácuo que poderá ser de nylon sendo este descartável ou de filme de borracha de silicone sendo este reutilizável	12 – Vasilhame que recebe os excessos de resina
	13 – Sistema de controlo do vácuo
	14 – Bomba de vácuo

Figura 21 - Representação esquemática do processo VARTM (Vacmobiles, 2012)

Devido ao facto de ser um processo efectuado em molde fechado, as emissões de gases voláteis praticamente não se fazem sentir. Consegue-se obter peças com elevado desempenho estrutural, porque podem ser utilizadas fracções volúmicas de fibra de cerca de 70%. Normalmente usa-se este processo para fazer grandes estruturas, como por exemplo cascos de barcos.

2.1.8.2.3. Moldação por Injecção de Resina Estrutural ('SRIM - Structural Resin Injection Molding')

Processo idêntico ao RTM, com a diferença de que são utilizadas duas resinas como matriz. Antes de serem injectadas no molde, as duas resinas são mescladas numa câmara de mistura a alta velocidade, que fazem gerar uma alta pressão de cerca de 30 MPa. Contudo, só são injectadas no molde com uma pressão inferior a 1 MPa, evitando assim uma acção de lavagem das fibras no ponto de introdução da resina.

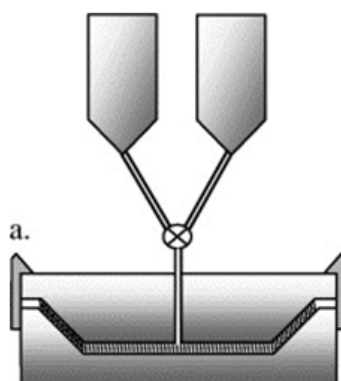


Figura 22 - Representação esquemática do processo SRIM (Rijswijk, Bersee, 2007)

Este processo é usado na indústria automóvel, pelo facto de se conseguir grandes volumes de produção a custos reduzidos, podendo ser utilizado tanto para a fabricação de peças pequenas como grandes, com formatos complexos.

2.1.8.2.4. Moldação por Infusão de Resina Composta ('SCRIM - Seemann Composite Resin Infusion Molding')

Este processo é semelhante ao VARTM, residindo nas condições de vácuo e na distribuição de resina as principais diferenças relativamente ao processo atrás descrito. Devido à acção constante do vácuo e à eficácia do mesmo, consegue-se a compactação das camadas de fibra e a ausência de ar nos espaços vazios antes de ser introduzida a resina. Esta mesma é injectada através de um sistema patenteado pela Seemann que, conjuntamente com a acção do vácuo, resulta numa impregnação plena. Os circuitos de vácuo e da distribuição de resina são distintos.

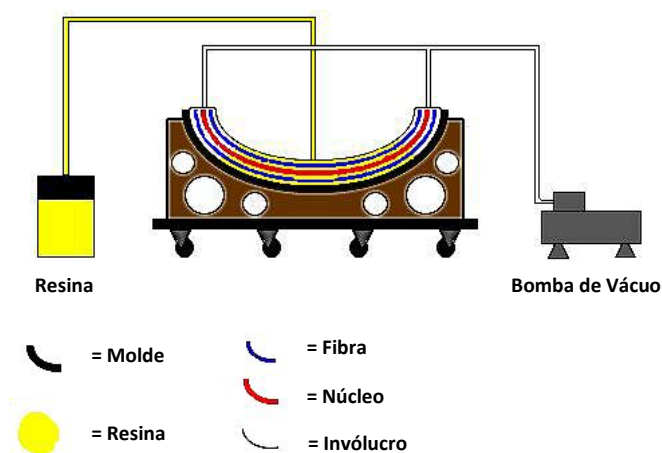


Figura 23 - Diagrama esquemático do processo SCRIM (Brust, 2005)

Os maiores campos de aplicação deste processo são a indústria naval em estruturas de médio e grande porte, na indústria automóvel e na aeroespacial, entre outras, sendo que as suas vantagens residem na possibilidade de controlar o peso das peças a fabricar, no manuseamento da matéria-prima a seco durante o seu processamento e na ausência de emissões de estireno para o meio ambiente.

2.1.8.3. *Moldação por Compressão de Compósitos de Matriz Polimérica*

É um processo com algumas semelhanças à estampagem metálica, sendo que a principal diferença reside na acção do molde que por compressão uma só vez, no caso dos materiais compósitos, enquanto na estampagem uma peça pode ser sujeita à compressão várias vezes. Existem três tipos de formato de matéria-prima utilizado neste processo, a saber:

- SMC (*'Sheet Molding Compound'*);
- BMC (*'Bulk Molding Compound'*);
- TMC (*'Thick Molding Compound'*).

O processamento destes três formatos de matéria-prima é basicamente idêntico. Contudo, existem alguns detalhes, desde a pressão de compressão, temperatura e formato dos moldes que variam conforme o formato da matéria-prima a utilizar. Por isso mesmo irá ser realizada uma pequena análise sobre composto de moldagem de folha (SMC), o qual é preparado previamente, antes de ser colocado no molde. Apresenta-se sob a forma de um laminado e resulta da mistura de resina com aditivos específicos, materiais de enchimento e fibras de reforço, que depois são cortados com formato rectangular em conformidade com a peça a obter, sendo submetidos a uma semicura, que tem por finalidade proporcionar uma pequena consolidação da placa. São conhecidos tecnicamente por cargas.

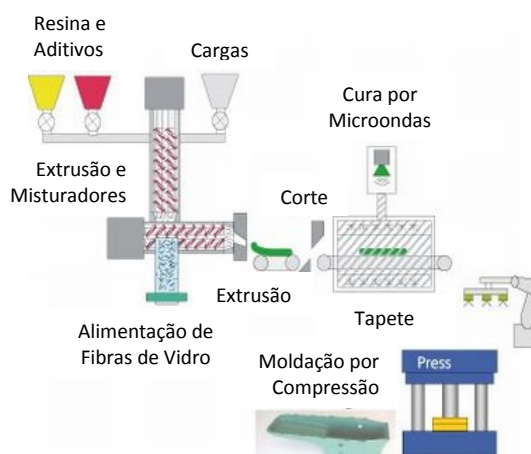


Figura 24 - Diagrama esquemático do processo da compressão de compósitos de matriz polimérica (Fraunhofer ICT, 2012)

Normalmente os moldes encontram-se pré-aquecidos. A carga é colocada no interior do molde fêmea e, por acção de compressão do molde-macho, a mesma começa a fluir, preenchendo as respectivas cavidades por acção do calor e da pressão, seguindo-se o processo de cura, no fim do qual é aberto o molde para a remoção da peça.

As peças obtidas por este processo, são finas e tem na indústria automóvel a sua maior aplicabilidade, pois podem ser obtidos grandes volumes de produção, com preços bastantes competitivos. Contudo, toda a indústria em geral usa peças obtidas por este processo.

2.1.8.3.1. Processo de Revestimento Enrolado ('Roll Wrapping Process')

O método de revestimento enrolado é um processo similar ao '*prepeg lay-up*', excepto no que se refere ao molde, em que, neste caso, passa a ser um mandril cilíndrico ou cónico. Habitualmente neste processo usa-se um pré-impregnado sob a forma de fita ou de '*roving*', que é enrolado num mandril, segundo uma dada geometria, de acordo com as especificações da peça a obter. No final do enrolamento, o mandril é envolvido por uma tela que tem por finalidade consolidar o enrolamento efectuado, sendo a cura efectuada da mesma forma que no processo similar.



Figura 25 - (a) Diagrama esquemático em corte do método de revestimento enrolado e (b) mandril utilizado no processo (Kim, Lee, 2006)

Este processo tem a sua maior aplicação em formas tubulares, tais como tacos de golfe, quadros de bicicletas e canas de pesca, entre outras. Por este meio conseguem-se obter peças com elevada resistência mecânica, pois permite a utilização de altas fracções volúmicas de fibra. Este processo permite ainda obter elevadas cadências de produção.

2.1.8.3.2. Moldação por Injecção ('Injection Molding')

O método de moldação por injecção é um processo segundo o qual se obtém os maiores índices de produção, relativamente a qualquer dos outros processos existentes. A matéria-prima utilizada é fornecida sob a forma BMC (granel), sendo carregada numa tremonha que alimenta um veio sem-fim que roda no interior de uma câmara cilíndrica, sendo esta aquecida, o que torna a matéria-prima menos viscosa, à medida que circula na câmara, ficando num estado que possibilita a sua injecção nas cavidades do molde aquecido. Depois de uma quantidade fixa de material ter preenchido o molde, o mesmo permanece fechado sob a acção de uma pressão e temperatura até que a cura se processe. No final, o molde é aberto e a peça é ejectada. O ciclo de processamento é totalmente automático.

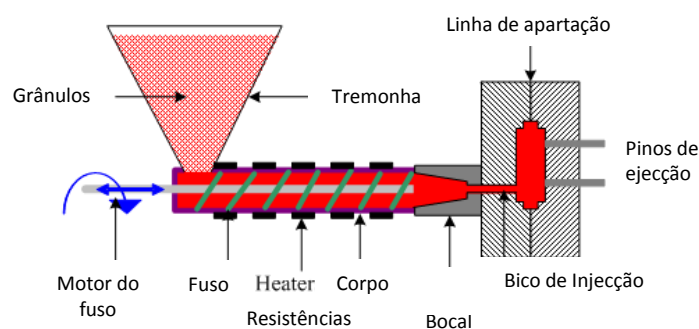


Figura 26 - Diagrama esquemático do processo de moldação por injecção (Kopeliovich, 2012)

Uma vez que a fibra utilizada é curta, as peças obtidas não possuem elevados requisitos estruturais. Este processo é aplicado maioritariamente em materiais compósitos termoplásticos, contudo, não é de desprezar a sua utilização em materiais compósitos termoendurecíveis. Normalmente usa-se para o fabrico de pequenas peças, podendo, no entanto, ser aplicado na fabricação de peças grandes. A sua cadência produtiva é mais elevada do que em qualquer outro processo. No entanto, poderá ser ainda maior se forem usados moldes de cavidades múltiplas, isto é, se o dimensionamento do molde assim o permitir. A produtividade pode ser incrementada consoante o número de cavidades do molde, fazendo baixar o custo das peças quando é usado um maior número de cavidades. É na indústria automóvel que se verifica a sua maior aplicabilidade, verificando-se a sua utilização também na indústria eléctrica, nomeadamente em electrodomésticos, ferramentas eléctricas, etc..

2.1.8.3.3. Processo por Enrolamento Filamentar ('Filament Winding Process')

É um processo idêntico ao 'Roll Wrapping', pois ambos utilizam mandris cilíndricos, sendo no entanto diferentes no que respeita à matéria-prima utilizada. O processo utiliza 'rovings' impregnados ou não, montados num bastidor, local a partir do qual se verifica o seu desenrolamento dos 'rovings' sob tensão. Os mesmos são direccionados por uma unidade de guiamento das fibras, que as dirige para o enrolamento no mandril, que é o elemento responsável pelo traccionamento dos 'rovings'. Esta mesma unidade comporta o recipiente da resina que banha as fibras, as quais são impregnadas quando traccionadas pelo mandril. A geometria de disposição das fibras no mandril será realizada de acordo com os requisitos estruturais solicitados no projecto da peça a obter. Esta mesma geometria resulta da combinação da velocidade de translação do sistema de guiamento das fibras, com a velocidade de rotação do mandril. Devido a esta combinação de velocidades, conseguem-se obter enrolamentos circunferenciais, helicoidais e polares. Devido à evolução tecnológica, já existem unidades de guiamento que se movem ao longo dos eixos XX' , YY' e ZZ' , rodando ainda em torno desses mesmos eixos que, aliado a um software específico, permite variações geométricas na disposição das fibras até agora impensáveis, aumentando consideravelmente o campo de aplicação deste processo.

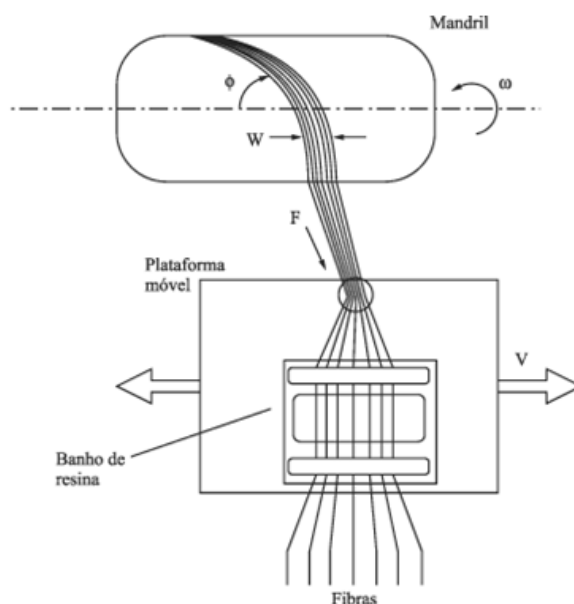


Figura 27 - Diagrama esquemático do processo por enrolamento filamentar

A cura pode ser realizada à temperatura ambiente, com auxílio de um forno ou de um autoclave.

Este processo é adequado ao fabrico de peças tubulares, podendo ser automatizado, desde que haja necessidade de grandes produções, baixando assim o custo efectivo das peças. Verifica-se que o seu maior campo de aplicação é em condutas, assim como depósitos de pressão, tanques de armazenamento químico e indústria aeroespacial, entre outras.

2.1.8.4. Pultrusão de Compósitos de Matriz Polimérica: Breve introdução

É um processo semelhante à extrusão, usando no entanto forças de tracção enquanto na extrusão se utiliza essencialmente compressão. Neste processo, o material é puxado através da fieira, enquanto na extrusão o material é empurrado através de uma fieira, neste caso mais curta e resistente.

Este processo não é indicado para fabricar perfis de paredes finas, nem perfis com ângulos acentuados, mas sim formas o mais arredondadas possível, pois deste modo consegue-se uma melhor distribuição de material durante o seu processamento, resultando, na prática, numa melhor distribuição de esforços no perfil. O material mais usado como reforço é o 'roving' de fibra de vidro do tipo E, mas também podem ser utilizadas fibras de carbono ou aramidadas. Adicionalmente, quando se pretende melhorar a sua resistência bi ou multidireccional, usam-se mantas e tecidos.

A resina mais utilizada é o poliéster insaturado, porque tem uma boa reactividade e é de fácil processamento. As resinas de *vinylester* epóxicas tem propriedades melhoradas, contudo são de difícil processamento e as velocidades de tracção são mais lentas devido à sua baixa reactividade.

A pultrusão é utilizada essencialmente para o fabrico de perfis ocos ou maciços de secção transversal constante, pois é com este tipo de processamento que a sua rentabilidade é máxima, tornando assim os seus custos bastante competitivos. Este processo permite a realização de tubos, calhas, perfis, vigas, gradeamentos, pavimentos, etc.. Todo este material tem aplicações na indústria automóvel, da construção civil, ferroviária, aeronáutica, etc..

Visto ser o processo visado neste trabalho, será tratado com mais pormenor adiante.

2.1.9. Técnicas de Controlo de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Os materiais compósitos de matriz polimérica poderão ser sujeitos a diversos tipos de ensaios, com vista à sua caracterização, tendo por base as propriedades que são mais importantes para cada tipo de aplicação e/ou solicitação.

O ensaio de tracção, normalmente aplicado em compósitos providos de fibras unidireccionais, permite determinar a tensão de rotura, o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson*. Os dois últimos serão calculados com base no valor registado no extensómetro durante o ensaio. A velocidade do ensaio é determinante na obtenção de valores credíveis. Assim, e com vista a tornar os resultados reprodutíveis, são utilizados os procedimentos recomendados pelas normas. No caso dos ensaios de tracção, são utilizadas geralmente as normas ASTM D3039 ou ISO 527.

No caso particular dos tubos obtidos por pultrusão, que são normalmente utilizados em aplicações estruturais em que a resistência à flexão é um atributo importante, torna-se de vital importância testar esses mesmos perfis à flexão. O ensaio de flexão em 4 pontos, permite determinar o módulo de flexão, segundo a norma ASTM D 790 ou ISO 14125, considerando para o efeito taxas de deformação de cerca de 1% por minuto.

Os métodos térmicos, com sistemas remotos de imagem com recurso à radiação de Infravermelhos (IV) são bastante usados para a avaliação não destrutiva de materiais e estruturas (Balageas, Krapez, Cielo, 1986; Meola, 2007). Estes métodos, consistem geralmente na estimulação térmica do objecto em análise e monitorização da variação de temperatura da superfície, durante o aquecimento transiente ou fase de arrefecimento. A análise engloba a condução do calor em sólidos (Carslaw, 1959). A energia térmica propaga-se por difusão sob a superfície, enquanto uma câmara de infravermelhos monitoriza a variação de temperatura ao longo da superfície visualizada. Evidentemente que, para um aquecimento uniforme da superfície, no caso de um material homogéneo, a distribuição de temperatura é também uniforme. A presença de um defeito a uma dada profundidade, interfere com a transmissão térmica, causando variações de temperatura locais. Portanto, a termografia de infravermelhos (TIV) permite avaliar defeitos através da estimativa de variação da temperatura ou contraste térmico induzido. Foi assumido que a perda de contraste térmico é proporcional ao cubo da profundidade do defeito, e que o menor raio do defeito detectado deve ser, no mínimo, uma a duas vezes maior do que a profundidade a que este se encontra situado a partir da superfície (Maldague, 2002). Recentemente, verificou-se que a espessura do defeito também desempenha um papel essencial, devido ao facto de um raio do defeito grande, poder ser dificilmente distinguível se for muito fino (Meola, 2007). Um factor que condiciona o sistema é a relação entre o ruído e o sinal. Assim, a visibilidade do defeito, depende de vários factores que envolvem a geometria do defeito, principalmente a relação entre o diâmetro e a espessura, assim como as características térmicas relativas, tais como a condutividade e expansão térmicas. A simulação por via térmica é frequentemente utilizada, sendo a sensibilidade do sistema de imagem de infravermelhos usada para controlar os defeitos no material instalado. Devido ao facto de não existir contacto, permite um rápido mapeamento

da superfície em 2D, apresentando-se como uma ferramenta extremamente útil no campo dos ensaios não-destrutivos de materiais e produtos manufacturados. Apesar disso, a Termografia de Infravermelhos ainda não está completamente explorada. Depois de vários anos de uso e muitos artigos científicos publicados, a apresentação de resultados obtidos com a TIV, continua a causar surpresa. E ainda assim, há muitos que perguntam se a TIV é eficaz para determinados tipo de avaliação e se é capaz de detectar um dado defeito específico, num dado material. Geralmente, não é possível uma resposta imediata, porque se torna necessário efectuar testes preliminares de viabilidade e, isso acarreta normalmente um desperdício de tempo e dinheiro (Meola, 2007).

2.2. A Pultrusão

2.2.1. O Processo de Pultrusão

Conforme referido anteriormente, a pultrusão é uma técnica singular na fabricação de perfis moldados em contínuo. O processo caracteriza-se pelo reduzido uso de mão-de-obra, pela elevada eficácia na conversão das matérias-primas e por permitir a aplicação directa dos perfis sem necessidade de qualquer acabamento, dada a elevada qualidade superficial e a possibilidade de serem fabricados com a cor desejada. Dada a especificidade do processo, permite a fabricação de perfis longos, de secção transversal constante, com elevados índices de produtividade, que resulta na fabricação de perfis de alta qualidade com custos extremamente reduzidos (Suratno, 1998).

As fibras de reforço, na forma de filamentos contínuos (*'roving'*), mantas ou véus, são colocadas num armazém próprio, sendo puxadas através de placas-guia, sendo seguidamente impregnadas através da passagem por um banho de resina numa tina. Vários reforços de fibra, incluindo mechas contínuas ou fio contínuo-mantas, podem ser combinados no processo de pultrusão. Podem ser utilizados altos teores em fibra, na ordem dos 85% em peso, proporcionando alta resistência e rigidez na direcção longitudinal ao eixo das fibras. Véus de superfície sintéticos produzem um acabamento rico em resina na superfície dos perfis pultrudidos, melhorando a qualidade superficial do perfil pultrudido. As fibras de vidro do tipo E são completamente molháveis numa resina de baixa viscosidade, cujo banho, para além de conter o polímero, poderá ainda possuir iniciadores de peróxido, cargas minerais, inibidores ultravioleta (UV) e outros aditivos para adaptar o desempenho do compósito à base de PRF. Pode ser ainda adicionado estireno ao banho de resina, o qual tem por finalidade diminuir a viscosidade da resina e promover a cura. Normalmente as resinas já contêm este produto, contudo, por vezes há necessidade de fazer certos ajustes à composição. A adição de inibidores visa retardar o início da cura, aumentando assim o tempo em que a resina se mantém gelatinosa. Os aditivos proporcionam propriedades específicas às peças a obter, tais como protecção contra a acção dos raios ultra violetas, inibidores de chama, pigmentos e corantes que se destinam a colorir o material a executar e a protegê-lo contra os raios solares. Os lubrificantes podem ter acção interna e externa. A primeira visa modificar a força de coesão intermolecular, reduzindo a viscosidade sem alterar as propriedades mecânicas da resina, enquanto a segunda visa facilitar a desmoldagem.

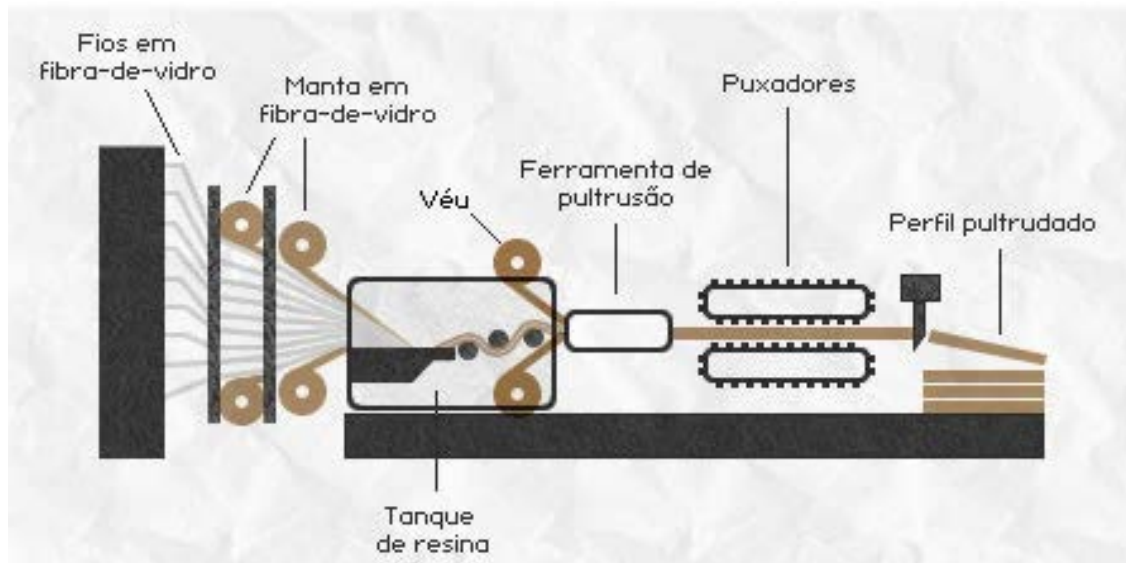


Figura 28 - Diagrama esquemático do processo de pultrusão (Cogumelo, 2005)

Os reforços impregnados em resina, são puxados através da fieira com velocidades de 0,3 a 1,5 m/min, em produções estáveis (Stewart, 2002), passando por um sistema de placa pré-molde, no qual começam a adquirir a forma ideal para entrarem na fieira de uma forma perfeitamente ordenada. A entrada da fieira possui uma forma cônica para remover o excesso de resina, o que permite uma entrada de material mais facilitada. Na parte inicial da fieira, poderá ser colocado um canal de refrigeração através de passagem de água, para evitar a solidificação prematura do material. O calor necessário à polimerização do material é fornecido por placas de aquecimento colocados sobre as superfícies superior e inferior do molde ou, mais recentemente, por resistências cilíndricas embebidas na fieira. Segue-se a zona de arrefecimento até à temperatura ambiente, no final da qual o perfil se encontra perfeitamente solidificado, sendo traccionado a uma velocidade constante por um sistema contínuo, designado normalmente por *'puller'* (lagarta ou puxadores) e finalmente é cortado nos comprimentos pretendidos.

Desenvolvida nos anos 50's, o processo é adequado para elevadas produções de perfis compósitos de matriz polimérica com alto conteúdo de fibra. É um processo com óptima relação custo-benefício, próprio para a produção de perfis estruturais em compósitos de alta resistência, simples ou complexos, que tem ganho cada vez mais mercado na substituição da madeira, alumínio e aço, num crescente número de aplicações em todo o mundo. (Stewart, 2002).

Quando o processo é examinado em pormenor e se constata o número de parâmetros que podem afectar a qualidade do processo e do produto final, verifica-se que a eficiência é elevada. Os parâmetros envolvidos podem variar desde os básicos, como a velocidade do processo, aos mais complexos, como a reticulação da reacção da resina na fieira. Mais importante do que os parâmetros individuais, são as relações existentes entre os diferentes parâmetros. Devido à complexidade do problema, as descrições matemáticas compactas mais usuais aplicáveis à maioria dos processos, não conseguem ser aplicadas com sucesso em ambientes de produção comercial por pultrusão. Assim, alguns trabalhos de investigação recorreram ao uso de *redes neurais artificiais* (RNA) para a modelação do processo de pultrusão, tendo por base dados reais e verificando o seu potencial para controle inteligente da máquina. Estes estudos permitem obter informações bastante precisas sobre a importância das conexões entre os diferentes parâmetros do processo, considerados de forma individual, sem que haja um apurado conhecimento empírico do processo. Tais desenvolvimentos podem levar a uma maior compreensão do processo, reduzindo o tempo de desenvolvimento do produto e aumentando a capacidade de produção e eficiência do processo.

A permanente evolução tecnológica, permite uma maior exploração comercial do processo de pultrusão, através do processo de aumento da capacidade e eficiência (Gibson, 1989). As RNA foram utilizadas amplamente em situações complexas, como reconhecimento de voz, modelação de processos, controlo e visão guiada através de robótica (Thilbault e Grandjean, 1992). Este trabalho demonstrou que as RNA podem ser um bom método de modelar o processo complexo de pultrusão e permitir a predição de propriedade com base nos parâmetros e características do processo e parâmetros do material (Wright, 1995). A fim de melhor validar a aplicação das RNA aplicadas a este processo, é necessário desenvolver ainda muitos mais estudos de modelação, utilizando mais dados e tipos de materiais, com base na gama normalmente usada em termos industriais.

Há um grande espaço para o uso '*offline*' de validação de modelos baseados em RNA's, com vista a aumentar a capacidade do processo de pultrusão. O modelo poderá apoiar o projecto de novos perfis, permitindo a optimização dos parâmetros e o estabelecimento das condições ideais de '*setup*'. A modelação de processos pode auxiliar na criação de configurações óptimas do processo para o custo desejado, optimizando a qualidade e a velocidade. Além disso, o modelo poderia também identificar as ligações mais importantes entre o processo e a qualidade do produto, permitindo um maior desenvolvimento e investigação para uma mudança radical da capacidade do processo. Através do conhecimento das relações entre o material, os parâmetros do processo e a qualidade do material, o modelo pode ser usado para monitorização da qualidade e controlo do processo (Wilcox, 1998).

Para produzir produtos pultrudidos, com elevada reprodutibilidade e de alta qualidade, é importante adaptar e controlar o processo de pultrusão. Para conseguir um grau de cura uniforme em toda a secção transversal de um produto, a temperatura do perfil dentro da fieira de pultrusão é um aspecto essencial. É importante, portanto, desenvolver modelos mecânicos para simular o processo de pultrusão e, por sua vez, proceder ao ajuste desses processos. À medida que os reforços impregnados de resina entram no molde, o calor é transferido a partir da parede da fieira para o conjunto de fibras+resina. Devido à baixa condutividade térmica da mistura, a temperatura no centro do material é mais baixa do que perto da parede da matriz. No entanto, quando a temperatura na mistura atinge um nível crítico, em que o catalisador se torna activo, a reacção de cura começa a gerar calor através de uma reacção exotérmica, o que faz com que a temperatura do centro passe a ser maior do que perto das paredes da fieira. O perfil de temperatura no material compósito dentro da fieira é, portanto, um compromisso entre a transferência de calor efectuada a partir das resistências (internas ou externas) e a reacção exotérmica. Vários modelos de processamento têm sido desenvolvidos, para obter uma compreensão fundamental do processo de pultrusão. Usando um método de simulação baseado em elementos finitos (Han e Lee, 1986), aplicaram um modelo cinético empírico, tendo por base uma dada espessura constante da parede e o perfil correspondente de temperatura. Foram estudadas características variáveis na pultrusão, tais como o tipo de resina e de fibra, tipo de catalisador e a velocidade do processo. Outros autores concluíram que os parâmetros cinéticos necessitam ser desenvolvidos individualmente para cada par de material e perfil de secção transversal pultrudida (Suratno, 1998).

Nos últimos anos, em particular, vários investigadores têm realizado desenvolvimentos numéricos e experimentais, em diferentes problemas relacionados com o processo de pultrusão, concentrando a sua atenção na análise da transferência de calor e cura, sobre o incremento de pressão na zona cónica da matriz e em problemas relacionados com a impregnação das fibras de reforço por termoplásticos. Com base em estudos efectuados (Carlone, 2006), foram já propostos alguns modelos de impregnação microscópica ou macroscópica durante o processo de pultrusão, usando matriz termoplástica (Haffner, 1998; Kim, 2001).

Uma das maiores restrições comerciais da pultrusão tem sido a falta de compreensão da interligação entre os parâmetros do processo de pultrusão e a qualidade final do produto (Gibson, 1989). A limitada compreensão empírica, baseada na experiência prática, está disponível, mas é necessário obter informações mais detalhadas do processo, quantificáveis, assim como as correspondentes relações (Han, 1986).

A abordagem de alguns autores à modelação e optimização de processos envolve várias etapas. A primeira é uma análise dos parâmetros importantes para o processo. A segunda etapa, visa desenvolver uma melhor compreensão das relações entre esses diferentes parâmetros e o efeito que têm sobre a qualidade do produto final ou tudo o que é critério para o sucesso, baseado nos vários ensaios industriais. A etapa final destina-se a modelar o processo com base no processo inicial, parâmetros do material e correlação com a qualidade do produto (Sumerak, 1994). A modelação aumenta, por esta via, a compreensão do processo actual, para que possam ser conseguidas melhorias de eficiência. A abordagem usual para a modelação do processo de pultrusão centra-se nos efeitos térmicos da fieira e do comportamento da reacção de reticulação.

Para Gorthala (Gorthala, 1991), o processo de cura na pultrusão foi descrito como sendo dependente apenas do tempo e temperatura, ou seja, temperatura e velocidade. Vários investigadores, incluindo Gibson (Gibson, 1989) e Han (Han, 1986), têm estudado a relação tempo '*versus*' temperatura do material, à medida que este passa através da fieira. As suas abordagens são ambas baseadas num problema de transferência de calor transiente, incorporando uma geração de calor interna.

As vigas de PRFV estão sujeitas a degradação quando sujeitas a carga permanente ou condições ambientais muito adversas. As baixas temperaturas alteram a capacidade de carga e a capacidade de resistência à deformação das vigas. A fragilidade das vigas é acelerada quando as mesmas são expostas a cargas contínuas e temperaturas baixas.

A necessidade de materiais duráveis com vista a aplicações estruturais actuais é uma realidade, com vista a tentar minimizar as despesas de manutenção consideráveis que as infra estruturas de materiais de construção convencionais normalmente acarretam. Por exemplo, a corrosão é um factor importante que influencia a longo prazo o desempenho das vigas de aço. Os compósitos de matriz *polimérica reforçada com fibra de vidro* (PRFV), são uma forte alternativa para tais materiais. Tal como os perfis de aço estrutural, os perfis pultrudidos de PRFV, podem ser abertos ou fechados. Os benefícios das aplicações dos perfis de PRFV, abrangem a alta resistência, a resistência ao meio ambiente, durabilidade reforçada a longo prazo, custo do factor mão-de-obra, tempo de construção acelerada, menor custo de transporte e despesas de manutenção reduzida. Os perfis pultrudidos de GFRP, são já comumente utilizados em aplicações de engenharia civil, incluindo edifícios, pontes e torres de transmissão. O seu comportamento tem sido amplamente estudado, principalmente no que toca aos módulos de flexão e de corte (Khan, 2012).

2.2.2. Desenvolvimentos Recentes na Pultrusão

Normalmente conhecida como pultrusão Bent, pultrusão 3D ou manipulação após processamento (*'Post-Die'*), este é um método de pultrusão onde o processo de cura ocorre fora do processamento normal. Tem como resultado baixas forças de tracção e permite a manipulação da pultrusão durante o seu processamento. Durante a fase de produção, a fibra embebida em resina é puxada e, ao passar na câmara de aquecimento, a resina aplicada adere à fibra, originando de seguida o processo de cura que ocorre já fora da zona de aquecimento, sendo necessário, nestas condições, forças de tracção extremamente elevadas para puxar a fibra, o que obriga a possuir equipamentos com maior potência instalada e mais caros. Um trabalho de estudo de viabilidade realizado por alguns investigadores, permitiu verificar que o processo de cura depende fortemente da irradiação de raios ultravioleta nas fibras embebidas em resina. A aplicação desta radiação permite uma maior regularidade na aderência da resina à fibra e retira o excesso de resina contida no conjunto, dando origem a forças de tracção inferiores na pultrusão. Consequentemente, poderão ser usadas máquinas menos potentes e dispendiosas. A pultrusão pode ser controlada logo que seja submetida aos raios UV e antes da cura total, possibilitando um maior controlo sobre as propriedades dos produtos pultrudidos com este processo auxiliar (Britnell, 2003).

Os compósitos reforçados à base de fibras naturais têm sido alvo de muito interesse por parte da comunidade científica e do mercado na última década. Isto fica a dever-se essencialmente ao facto destes materiais serem amigos do ambiente, possuírem uma maior facilidade de reciclagem, e apresentarem propriedades específicas interessantes. Gensewich (Gensewich, Riedel, 1999), referiu que a pultrusão pode ser realizada com fibras naturais utilizando diferentes tipos de matrizes. Dependendo da fibra natural usada, os perfis exibiram propriedades específicas equivalentes às apresentadas pelos compósitos reforçados com fibra de vidro. Isto faz com que os reforços à base de fibras naturais se tornem fortes candidatos à substituição dos reforços mais tradicionais, apresentando um elevado potencial para aplicações na indústria automóvel e na construção civil (Karus, 2002; Nichel, 2003) Na verdade, eles já são usados em vários componentes de automóveis, tal como foi demonstrado por vários fabricantes, como por exemplo a *Daimler-Chrysler* e *BMW*, entre outros. Os diferentes tipos de fibras disponíveis poderão ser de linho, *'kenaf'*, *'ramine'*, cânhamo, juta, ou outras fibras duras, tais como caroá ou sisal (Angelov, 2007).

2.2.3. Aplicações da Pultrusão

A Indústria europeia de pultrusão teve um desempenho brilhante, com um crescimento significativo na primeira década do século XXI. De acordo com um relatório elaborado pela *Associação Europeia de Tecnologia de Pultrusão (EPTA)*, compilado a partir de um levantamento efectuado junto de empresas industriais, mostrava que as estimativas para a produção europeia de compósitos pultrudidos atingiria quase 23 000 toneladas no ano 2000, ou seja, quase o dobro do valor atingido em 1994, onde a produção se ficou pelas 12 000 toneladas. A indústria da construção continua a ser o maior mercado para produtos pultrudidos em termos de volume de produção (37% em 2000), sendo também esperado um maior aumento no mercado em que estes produtos aparecem agrupados com outros mais convencionais. Aplicações com um óptimo potencial de crescimento incluem a construção em geral (revestimento, bordos de telhados, etc.) e reforços de estruturas, entre outros. O mercado onde a resistência à corrosão é mais valorizada representa o segundo destino mais importante em termos de futuro crescimento para este tipo de produtos. Espera-se que o crescimento nesta área venha a suceder essencialmente através de produtos como passarelas e grelhas, onde a disponibilidade de produtos-padrão aumentou significativamente, o que deu um forte impulso, embora futuros crescimentos nesta área vão depender essencialmente dos progressos levados a cabo na normalização dos produtos em betão, estruturas de janelas e outras aplicações. Outro mercado em crescimento para os produtos pultrudidos são as torres de retransmissão, sendo já usados neste tipo de aplicação nos EUA e estando agora a ganhar mercado na Europa. O mercado marítimo é relativamente pequeno em termos de volume mas, o sector 'offshore' deverá oferecer oportunidades significativas para os produtos pultrudidos, com aumento das exigências em termos de resistência ao fogo e à corrosão. A sensibilização para os benefícios dos produtos pultrudidos também se está a espalhar para o sector dos produtos destinados a zonas da ola marítima. O mercado eléctrico já está bastante desenvolvido no que toca a produtos pultrudidos, pelo que é esperada uma queda da quota global de compósitos pultrudidos. No entanto, existem ainda duas áreas do mercado eléctrico onde estes produtos estão a registar crescimento: caminhos de cabos e escadas (uma história de sucesso nos EUA). No entanto, diferenças nos padrões e critérios de aprovação de país para país, impedem um maior desenvolvimento dos produtos pultrudidos neste segmento de mercado. Os transportes também apresentam um bom potencial de crescimento, através da aplicação em painéis interiores e exteriores de camiões e autocarros e na indústria ferroviária, nomeadamente em material circulante, que está em actualização em toda a Europa. Em

conclusão, a EPTA adverte que, embora o futuro parece promissor para pultrusão na Europa, o crescimento depende de inúmeros factores, tais como: crescimento económico estável na região, estabilidade no preço das matérias-primas, avanços tecnológicos contínuos e sustentados, desenvolvimento de novas tecnologias de produção e crescimento da consciência ambiental. A EPTA espera encorajar os pultrusores de pequena dimensão a formar alianças estratégicas em actividades de marketing, com vista a atingir outros tipos de mercado e em outros continentes. Uma maior cooperação entre os fornecedores de matéria-prima e os fabricantes de produtos pultrudidos é também aconselhável. (Industry News, 1998).

Com a aplicação do método de pultrusão, o fabrico em grande escala de perfis PMC (*Perfis de Matriz Compósita*), com secções transversais diversas, destinadas a estruturas em que o seu peso é crítico, tais como convés dos navios ou superestruturas como pontes e edifícios, tornou-se também viável (Aniskevich, 2012).

No mercado norte americano de construções rápidas, os chefes de família não gostam de despendar tempo na manutenção das suas casas. Muitos dos proprietários estão dispostos a gastar algum dinheiro extra em produtos que lhes assegurem pouca ou nenhuma manutenção. Além disso, o alto custo da mão-de-obra faz com que os empreiteiros, nos períodos de garantia, evitem qualquer tipo de intervenção. Estas duas situações determinam a procura de materiais de construção que reduzam o tempo de manutenção e despesas. Esta tendência, criou uma oportunidade para os compósitos pultrudidos mostrarem a sua mais-valia relativamente aos materiais tradicionalmente usados na construção civil. Perfis em PRFV usados nas janelas, ganharam grande notoriedade por não necessitarem de manutenção durante cerca de 20 anos e são agora reconhecidos por apresentarem um desempenho superior em termos de resistência, estabilidade dimensional e isolamento térmico. Os perfis pultrudidos lineares estão também a encontrar um forte campo de aplicação na substituição de vigas de madeira estruturais em casas de madeira, tendo sido recentemente incorporados na construção de edifícios por um dos maiores construtores americano, segundo a empresa *'America Premier'*. A economia em mão de obra, através da consolidação de peças e facilidade de instalação, em última análise, permite reduzir o custo de construção de uma casa quando comparado com a construção típica usada nas casas em madeira (Martin, 2006).

As pranchas pultrudidas são produzidas pelas empresas de pultrusão mais importantes do mundo e são utilizadas principalmente como pisos para plataformas. Estes painéis altamente otimizados, têm potencial para ser utilizados em muitas outras infra-estruturas para os mais diversos fins. No entanto, a sua rigidez à flexão é normalmente demasiado baixa para poderem ser utilizados em auto-estradas e pontes pedestres, devido aos requisitos de amplitude dos tabuleiros. No entanto, quando usado de forma combinada com o betão ou

materiais de cimento numa forma híbrida, estes materiais passam a apresentar um elevado potencial, podendo ser utilizados de forma mais ampla.

2.2.4. Os Produtos Pultrudidos

Devido às características próprias do processo de pultrusão, os produtos obtidos por este processo de fabrico caracterizam-se por serem normalmente longos e de secção transversal constante. Isto advém do facto de ser um processo em que a formação do produto decorre de forma contínua, adaptando-se assim perfeitamente ao fabrico de barras, perfis e tubos com as mais diversas formas e secções. Os produtos pultrudidos poderão ser divididos em dois grandes grupos: normalizados e personalizados.

Os perfis normalizados, muito comuns nas empresas de pultrusão, resultam na sua maioria da cópia de perfis em aço, alumínio ou plástico já existentes no mercado. Pelo facto de existir uma grande variedade de perfis, a sua aplicação torna-se possível nas mais diversas áreas. Normalmente, estes perfis em PRFV são reforçados no sentido transversal por mantas de fibra de vidro e no sentido longitudinal por fibra de vidro de filamento contínuo (*‘roving’*), sendo o perfil envolvido por um véu (manta de fibra de vidro fina) que tem como objectivo melhorar a sua qualidade superficial, aumentar a sua resistência à temperatura e incrementar a resistência ao envelhecimento pelos raios UV (Fibrolux, 2012) A matriz destes produtos compósitos é a resina, que será seleccionada de acordo com as características pretendidas para o fim a que se destina o perfil.

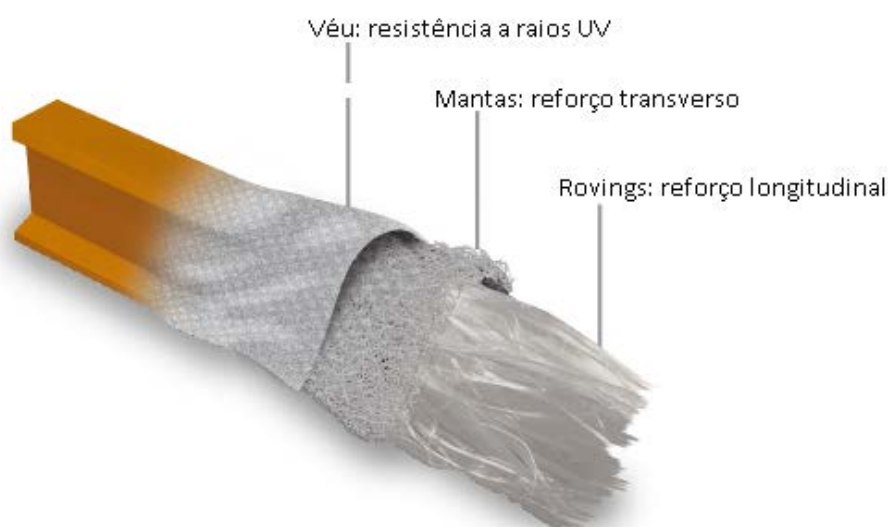


Figura 29 -Vista do perfil em corte (Adaptado de Fibrolux, 2012)

Os perfis personalizados são produzidos segundo as especificações dos clientes, atendendo a necessidades particulares. Eventualmente, alguns destes perfis poderão, ao fim de alguns anos, passar a pertencer aos perfis normalizados, devido ao facto de serem produzidos regularmente e de não se ter verificado ao longo do tempo alterações das suas propriedades geométricas e/ou mecânicas e do seu uso passar a tornar-se mais generalizado.



Figura 30 - Exemplos de perfis personalizados (Adaptado de Fibrolux, 2012)

Normalmente, o processo de fabrico deste tipo de perfis encontra-se condicionado pelas dimensões máximas permitidas pela feira colocada na máquina.

2.2.5. Vantagens dos Produtos Pultrudidos

A lista de benefícios apresentados pelos produtos pultrudidos, tal como já referido anteriormente, incluem: leveza, alta resistência, estabilidade dimensional em condições normais de humidade e temperatura, resistência à corrosão, baixa manutenção, isolamento eléctrico e bom isolamento térmico. Para além destas propriedades, temos que considerar os benefícios inerentes à disponibilização de comprimentos longos contínuos (Martin, 2006).

Tal como já referido anteriormente, entre outras vantagens, os produtos pultrudidos caracterizam-se por apresentar custos relativamente baixos, sendo de fácil manuseamento e rápida instalação. Um aspecto negativo na utilização de produtos compósitos de matriz polimérica, em geral, é o seu desempenho em ambientes quentes e/ou húmidos. Quando os mesmos são expostos a uma temperatura elevada e/ou ambiente húmido, os seus constituintes sofrem variações dimensionais e no estado de tensão a que ficam sujeitos, devido à expansão térmica e humidade induzida (Aniskevich, 2012).

Existem inúmeras oportunidades no mercado dos EUA para placas finas pultrudidas, mas o potencial de crescimento julga-se estar no desenvolvimento de perfis estruturais, especialmente para a construção de pontes e aplicações em grandes infra-estruturas gerais. Componentes pultrudidos com valores de resistência mecânica idênticos aos materiais tradicionais podem pesar menos cerca de 50% do que as ligas de alumínio e menos cerca de 75% do que o aço. A procura pela pultrusão é cada vez maior em diversas infra-estruturas, tais como a construção, meios de transporte, componentes sujeitos a corrosão (em ambiente marítimo ou não), isolamentos eléctricos, etc.. A maioria das empresas dedicadas à pultrusão utiliza resinas termoendurecíveis líquidas, mas os termoplásticos estão a ganhar terreno relativamente aos termoendurecíveis. Fios de fibra de vidro pulverizados com resinas termoplásticas também estão sendo usados na pultrusão de componentes estruturais, como por exemplo na indústria automóvel (Stewart, 2002).

2.2.6. A Pultrusão Híbrida

Alguns investigadores afirmam que a diferença entre as vigas de compósitos híbridos e os materiais convencionais é que os materiais de PRF oferecem uma maior resistência à corrosão e uma vida útil mais prolongada. Além disso, devido ao seu peso reduzido, ao transporte e custo de montagem, as vigas de compósito híbrido, oferecem vantagens assinaláveis. E por último, satisfazendo os requisitos de utilização típicos, conduzem à concepção de vigas que podem fornecer capacidade de carga adicional para além do que é regulamentado.

A pultrusão híbrida assume inúmeras vertentes, embora raramente esteja em linha com a orientação deste trabalho. Efectivamente, o termo '*híbrido*' é aplicado nas mais diversas situações, tais como: utilização de mais do que um tipo de reforço, utilização de estruturas em PRFV em conjunto com outros tipos de estruturas mais convencionais, etc.. Apesar da exaustiva procura bibliográfica realizada, não foi encontrado qualquer trabalho dedicado à realização de perfis pultrudidos ociosos que possuam no seu interior, outro material com propósitos bem definidos. Assim, e não querendo deixar de fazer reflectir a procura realizada, são seguidamente abordadas outras aproximações à pultrusão híbrida realizada por outros investigadores.

Um dos trabalhos consultados relata a pultrusão de um fio de polipropileno reforçado com linho, a partir de linho descontínuo e polipropileno fibras. Esta foi a primeira tentativa de pultrudir este material. Perfis transversais rectangulares, foram produzidos com sucesso usando uma linha de pultrusão concebida pelos autores desse trabalho. Foram realizados vários ensaios com fios providos de dois diferentes teores de fibra de linho, e usando vários conjuntos de parâmetros de pultrusão. Nestes ensaios, fez-se variar essencialmente a temperatura de pré-aquecimento da fiação e também a velocidade a que os perfis foram traccionados, visto serem estes os parâmetros mais relevantes. O trabalho teve como objectivo futuro a introdução de fibras naturais em perfis de compósitos à escala industrial.

Foi realizada uma caracterização completa de cada perfil, a fim de analisar a influência dos parâmetros de processamento sobre a qualidade do perfil. As propriedades mecânicas foram avaliadas através da realização de ensaios de flexão em três pontos, assim como testes de impacto seguindo a metodologia Charpy (Angelov, 2007).

Outro estudo visou o desenvolvimento de um trilho destinado a ser usado em vias ferroviárias de alta velocidade, sob o conceito de uma viga de material compósito híbrido, como sendo um elemento estrutural. Esta viga é composta por três componentes essenciais a considerar: um elemento externo (concha), o reforço de compressão e reforço de tracção. A estrutura exterior (concha) é um reservatório formado por um *Perfil Reforçado em Fibra (FRP)*. O reforço de compressão consiste em betão de cimento 'Portland' que é bombeado para uma conduta de perfilado dentro da viga, em forma de concha. O reforço de tracção consiste em fibras de vidro, carbono ou aço, ancorados nas extremidades da viga. Os resultados do projecto mostram que a viga de materiais compósitos pode ser fabricada com custos de ferramenta mínimos e que as mesmas podem ser previsivelmente concebidas, para satisfazer os requisitos de resistência e facilidade de manutenção da *Associação Americana de Engenharia Ferroviária e Manutenção de Vias (AREMA)*. O estudo do custo por unidade de comprimento indica que a viga de compósito híbrido pode ser economicamente viável relativamente ao betão ou vigas de uma ponte ferroviária. Com estes e outros benefícios inerentes, as vigas de compósitos híbridos oferecem uma alternativa interessante a considerar, na construção de novas pontes ferroviárias, bem como na reconstrução do inventário existente no sistema ferroviário (Hillman, 2003).

No estudo consultado, o primeiro passo que os investigadores decidiram estabelecer foi o estudo dos custos métricos associados à construção de uma ponte ferroviária. Os projectos com materiais convencionais foram reunidos para avaliar os custos típicos da ponte. Na elaboração destes projetos, foi realizada uma pesquisa com os caminhos-de-ferro de classe 1, para decidir a distribuição de vãos e tipos de materiais dentro dos sistemas existentes. Esta informação foi analisada para determinar o mercado alvo a que se poderia destinar o

desenvolvimento deste produto híbrido. Como as outras fases do projecto foram concluídas, tornou-se possível desenvolver projectos de pontes comparáveis, usando as vigas de compósito híbrido. Estes projectos foram utilizados para estabelecer os custos métricos do produto “IDEA”, proposto para comparação com os materiais convencionais. Por fim, foi estudado o ciclo de vida, comparando os custos para as pontes do caminho-de-ferro usando materiais convencionais, com os custos de materiais de compósitos híbridos (Hillman, 2003).

Várias são as conclusões que se podem tirar de cada etapa dessa investigação. Com respeito aos custos métricos, as vantagens económicas das vigas de compósitos híbridos dependem do comprimento das mesmas. Para vãos mais curtos, as vigas de compósitos híbridos parecem ser mais económicas do que as de aço, enquanto para vãos mais longos, tem como vantagem serem mais leves e os custos de montagem serem menores, relativamente às vigas de betão pré-esforçado. Em qualquer caso, verifica-se que, quer para vãos com o comprimento de cerca de 9,15 metros, que é considerado um comprimento com algum significado, quer para pontes ferroviárias (mercado da substituição para o qual foi direccionado esse estudo), os perfis baseados em compósitos híbridos mostram ser mais adequados. Relativamente ao projecto, a principal conclusão diz respeito ao comportamento estrutural da viga de compósito híbrido, onde a apetência para uma mais fácil manutenção da estrutura parece assumir o papel mais relevante. Foi desenvolvida uma folha de cálculo, para facilitar a avaliação simultânea dos estados limites da concepção para os componentes críticos. Ao longo do desenvolvimento, foi possível iniciar a formulação de alguns conhecimentos profissionais, que podem tornar mais rápido o projecto, no caso de uma aplicação específica. Descreve-se em seguida, algumas indicações que podem permitir ao projectista tomar decisões sobre a composição da viga, possibilitando a concepção da mesma com diferentes níveis de exigência:

- Determinar a geometria da secção transversal;
- Fazer uma estimativa inicial sobre a altura necessária para as vigas de pontes ferroviárias;
- Fazer uma estimativa inicial sobre a largura da viga, tendo como base 1/3 a 1/2 da altura. As dimensões exteriores da viga, ajudam a estabelecer o número de vigas estruturais na secção transversal;
- Fazer uma avaliação prévia, sobre a espessura do PRF e componentes da flange. Este detalhe ajuda o projectista a ter uma ideia prévia da espessura aproximada do laminado de PRF, por camada de tecido;
- Ajustar as dimensões do canal de compressão e quantidade de reforço até que os critérios de deflexão sejam cumpridos;

- Verificar se a capacidade para suportar o momento máximo está satisfeita. Ajustar o reforço às tensões de tracção e compressão exigidas;
- Verificar a capacidade ao corte em 10% do comprimento da viga. Aumentar a espessura da alma da viga, se necessário;
- Calcular a tensão vertical na viga e comparar a capacidade do material do núcleo e mantas;
- Calcular as tensões nos locais de amarração da viga;
- Determinar a geometria na zona da amarração, para contrabalançar a reacção de rolamento com compressão e tracção, sem introduzir desequilíbrios indesejáveis.
- Outras conclusões que podem ser extraídas a partir do trabalho analítico e experimental, estão relacionadas com a avaliação da carga partilhada pelas forças de corte, entre a compressão do reforço e as teias de PRF.

Ficou mais uma vez provado, a partir dos testes realizados, que a tensão de corte nas vigas é transportada essencialmente pelas fibras, e que a acção de arqueamento quando sujeito à compressão oferece um escoamento redundante para a carga. Apesar do êxito desta investigação, ainda existem áreas que merecem uma pesquisa mais aprofundada e aprimorada. Uma das áreas que merece uma investigação suplementar, é a diferença económica entre a fibra de carbono e o aço, quando utilizados como reforço. Com base nos critérios de desempenho estrutural e no facto de que o reforço representa, para o caso das fibras em carbono, um custo de cerca de 25% do preço total do material da viga, verifica-se que, mesmo assim, o projecto poderá ser economicamente viável. Outra área que merece uma investigação mais aprofundada é a possível substituição de todas as ferramentas internas por um mandril reciclável, material que, por ser mais leve, facilita o transporte e a montagem. As tarefas de ajuste do processo passarão obrigatoriamente por uma análise e redefinição das metodologias, como é inevitável com qualquer tipo de produto (Hillman, 2003).

Algumas das questões levantadas pelos engenheiros das Ferrovias Classe 1 dos E.U.A. que merecem uma investigação mais aprofundada, incluem os seguintes itens:

- Fragilidades e erros nas metodologias para a reparação e manutenção;
- Exigir resistência aos raios UV por 80 ou mais anos de serviço;
- Efectuar testes adicionais de carga, para melhor quantificar a resistência ao corte, esmagamento / encurvadura das teias e estados limite de fadiga e tensão;
- A avaliação à fadiga deverá considerar a realização de um mínimo de 2 milhões de ciclos;

- Teste dos sistemas de vigas múltiplas para verificar a distribuição de cargas na secção transversal da ponte;
- Estudar os efeitos dos ciclos térmicos;
- Além disso, constituir e documentar técnicas não destrutivas de avaliação.

Muitas destas questões podem ser ou já foram tratadas com a evolução dos materiais compósitos mais recentes. Os clientes, bem como os engenheiros que lhes dão apoio, devem ser consultados sobre o desenvolvimento futuro dos testes de programas experimentais para garantir que as preocupações críticas lhes são dirigidas. Além das questões técnicas, vários representantes das ferrovias têm expressado as suas preocupações sobre a própria natureza das vigas de compósito híbrido. Uma análise cuidadosa terá que ser realizada no desenvolvimento da produção para este produto, a fim de atenuar as preocupações sobre a inconveniência em relação à sua aplicação. A conclusão mais importante é simplesmente que o conceito por detrás deste produto “IDEA” funciona. A fase experimental confirmou a capacidade de concepção e fabrico de uma viga de compósito híbrido, que pode ser usada como um componente estrutural numa ponte ferroviária. No entanto, esta conclusão não deverá dispensar testes adicionais, que devem ser realizados para confirmar que estes resultados podem ser reproduzidos de forma sólida. No entanto, os princípios de engenharia que definem o comportamento estrutural são tão simples como as ferramentas e o processo de produção usado para o fabrico das vigas (Hillman, 2003).

2.2.6.1. Produtos Híbridos à Base de PRFV: evolução mais recente

Durante os últimos anos, a consciência ecológica e outras questões ambientais levaram ao desenvolvimento de compósitos de materiais com base em recursos renováveis, como fibras naturais, amigas do ambiente e de baixo custo relativamente às fibras sintéticas, tais como fibras de vidro, fibras de carbono, e à utilização de polímeros com base em recursos renováveis, para o desenvolvimento de verdadeiros biocompósitos. Alternativamente, têm sido desenvolvidos compósitos poliméricos totalmente recicláveis. Actualmente, estão surgindo um grande número de materiais com aplicações bastante interessantes. A indústria preconiza o uso de ecocompósitos, como uma maneira de servir o meio ambiente e ao mesmo tempo permitir poupar peso e reduzir os custos. Cabos de fios ‘Cordenka’ têm sido aplicados com sucesso para reforçar a injeção por moldação de compósitos de polipropileno (Weigel, 2002; Ganster, 2006). As propriedades mecânicas, como a força de tracção e resistência ao impacto são superiores às propriedades mecânicas dos compósitos de fibra curta de vidro padrão. Outras vantagens relativamente aos reforços de fibra de vidro são a redução de peso

(densidade da celulose é de $1,5 \text{ g/cm}^3$, enquanto a da fibra de vidro é de $2,5 \text{ g/cm}^3$), reciclagem melhorada e reduzida abrasividade que beneficia as máquinas do processo de injeção. Contudo, as propriedades de rigidez e os valores de distorção ao calor dos compósitos tendem a ser demasiado baixas para algumas aplicações importantes, tais como os interiores dos automóveis. As fibras naturais, por outro lado, são conhecidas por aumentar a rigidez dos compósitos e em menor grau a resistência mecânica, enquanto as propriedades de impacto se caracterizam por ser relativamente reduzidas, ficando na gama de 20 kJ/m^2 para o linho (Snijder, 2000). Portanto, uma combinação de fibras artificiais e de fibras naturais, para reforço de compósitos híbridos em PP, parece ser o caminho mais promissor para atingir um perfil de propriedades equilibrado. A juta é uma das mais importantes agro-fibras (fibras lignocelulósicas), tendo atraído a atenção mundial como reforço potencial dos polímeros, devido às suas propriedades intrínsecas, tais como a baixa densidade, módulo de tensão elevado e baixo alongamento na ruptura. A sua rigidez e resistência específica são comparáveis aos da fibra de vidro. Apesar destas vantagens, a primeira vez em que se confrontou a aplicação da fibra celulósica com compósitos de plástico verificou-se a incompatibilidade de fase durante a mistura de fibras celulósicas hidrofílicas com a matriz de polímero hidrofóbico. A mercerização das fibras naturais é uma das técnicas usadas para melhorar a adesão interfacial entre fibras e matriz (Mohanty, 2000).

Alguns compósitos híbridos foram realizados com juta, juta mercerizada, celulose sintética de alta tenacidade e fios de cabo de pneus '*Cordenka*' de diferentes proporções, usando um processo de pultrusão e posterior moldagem por injeção. Estes mesmos compósitos foram também produzidos a fim de analisar as suas propriedades. O material utilizado como matriz foi um copolímero de bloco de *Polipropileno* (PP) e um *Ácido Maleico* (MAPP), o qual foi usado como um agente de acoplamento. Este compósito continha cerca de 25% de fibra. Foram avaliadas as propriedades mecânicas, tais como a resistência à tracção e flexão, módulo de elasticidade à tracção e flexão, e resistência ao impacto Charpy. Determinou-se ainda a *Temperatura de Distorção ao Calor* (HDT). Foi obtida uma resistência relativamente elevada para este tipo de material (70 MPa) e excelente resistência ao impacto (80 kJ/m^2), quando utilizado o reforço de '*Cordenka*' puro. A substituição parcial de juta por *cordenka*, leva a um incremento das propriedades de rigidez do compósito, bem como da *Temperatura de Distorção ao Calor* (HDT). Foram obtidos valores acima de 105°C nas composições com 25%, 50%, 75% e 100% de juta, para uma carga global de fibra de 25%. Por outro lado, a resistência ao impacto diminui com o aumento da percentagem de juta, tendo sido obtidos valores na ordem dos 22 kJ/m^2 quando da utilização de juta pura (Khan, 2009). Conseguem-se obter boas propriedades para um compósito com 25% de juta e 75% de '*Cordenka*', mantendo a resistência ao impacto em 79 kJ/m^2 . A mercerização das fibras de juta

proporcionou melhorias moderadas nas propriedades dos compósitos. Tanto a juta como a 'Cordenka' proporcionam boa adesão da matriz.

Esse trabalho acabou por demonstrar que as propriedades dos perfis com 'Cordenka' como reforço da matriz de polipropileno podem ser adaptadas, através de uma substituição parcial da 'Cordenka' por fibras naturais tais como a juta. A rigidez e as *Temperaturas de Distorção ao Calor* (HDT) aumentam com o incremento da proporção de juta, enquanto a tensão e a força de impacto diminuem. O melhor perfil, com propriedades equilibradas, poderá ser obtido pela incorporação de 25% de juta, num compósito com uma carga de 25% de fibra, no total. A resistência à tração, temperatura de distorção ao calor e resistência ao impacto Charpy, têm valores de 72 MPa, 3,2 GPa a 106°C, e 79 kJ/m², respectivamente. A mercerização das fibras de juta acarreta melhorias moderadas nas propriedades mecânicas, sendo considerável o incremento na resistência à tração (6%), respeitante a compósitos de fibra não tratados (Khan, 2009).

3. Desenvolvimento

3.1. *Enquadramento do trabalho prático e caracterização da empresa de acolhimento*

Conforme referido na introdução deste trabalho, a necessidade que esteve na origem deste projecto prendeu-se com a realização de dois equipamentos que fossem capazes de ser acoplados a uma máquina de pultrusão já existente, e que permitisse a alimentação de pré-formas de diferentes materiais e resíduos da pultrusão, sobre os quais fosse posteriormente pultrudido o tubo exterior, dando assim origem a um produto pultrudido híbrido, com propriedades melhoradas segundo determinadas vertentes, com vista a aplicações específicas onde se pretende incrementar o isolamento térmico e/ou acústico, assim como melhorar o momento de inércia do novo produto, sem que o peso seja significativamente afectado.

A empresa que quis desenvolver este projecto foi a ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., sediada na Maia, a qual, conforme o nome indica, se dedica principalmente à pultrusão de semiprodutos, embora possua interesses em outras áreas ligadas aos materiais compósitos de matriz polimérica, nomeadamente na produção de peças por moldação manual, VARTM e Infusão. É uma PME (Pequena ou Média Empresa) com um número de colaboradores variável em função do volume de trabalho, mas que normalmente não ultrapassa as 50 pessoas. Está Certificada segundo a Norma ISO 9001: 2008. Foi pioneira no fabrico através do processo de pultrusão em Portugal, sendo ainda a única empresa no nosso país que produz de forma corrente por este processo. Tem estado ligada a vários projectos de investigação e desenvolvimento (I&D) com várias instituições do ensino superior, com vista a manter-se na vanguarda do desenvolvimento na área dos materiais compósitos de matriz polimérica.

Este trabalho foi inserido num projecto de investigação científica financiado através do programa de apoio QREN – Quadro de Referência Estratégico Nacional, possuindo o número de referência N.º 21557 e o acrónimo '*HybridPultrusion*'.

3.2. *Equipamento de Pultrusão já existente*

O equipamento de pultrusão já existente na ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. resulta de uma construção inicial, realizada há mais de 10 anos, a qual tem sido sujeita a diferentes

atualizações, devido há necessidade de adaptação do equipamento, face aos pedidos dos perfis solicitados pelos diferentes clientes, e das melhorias que foram sendo introduzidas no equipamento com vista à melhoria do seu funcionamento, visando uma melhor qualidade, aumento de produtividade e um melhor controlo da gestão do processo.



Figura 31 - Vista geral do equipamento

3.2.1. Layout do equipamento já existente

O equipamento de pultrusão existente na ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. do qual foram mostradas imagens na secção anterior, poderá ser visto de forma esquemática na figura seguinte:

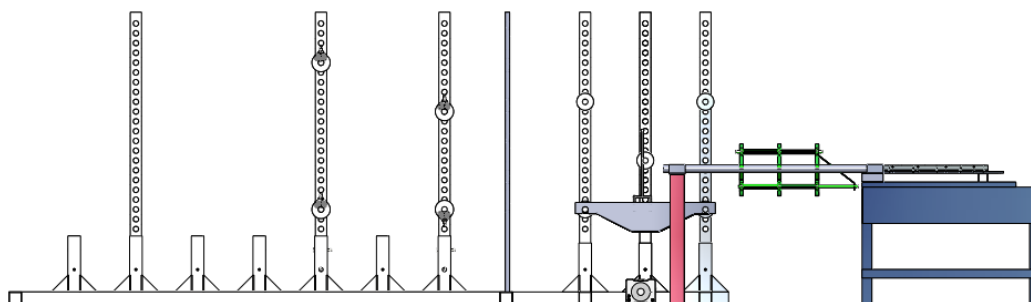


Figura 32 - Representação esquemática do 'layout' da máquina de pultrusão

Com base na figura esquemática, e atendendo a que o funcionamento do equipamento se dá da direita para a esquerda na imagem, teremos o local de armazenamento do *'roving'* (não representado na figura, e que estaria ainda mais à direita), a estrutura de suporte das mantas e dos véus, a plataforma de pré-guiamento dos fios de *'roving'* antes de serem conduzidos para a tina, a passagem dos fios de *'roving'* através dos garfos da tina, o guiamento do *'roving'* já embebido em resina, a entrada da fieira, a fieira e, ainda mais à esquerda, teríamos os *'pullers'*, responsáveis pelo traccionamento dos perfis pultrudidos e a secção de corte automático dos perfis acabados de produzir.

Atendendo a que se pretende que os perfis híbridos sejam construídos em torno de pré-formas ou de resíduos de pultrusão, estas têm que ser alimentadas imediatamente antes da fieira. Assim, e tomando ainda por referência a imagem esquemática do equipamento de pultrusão, os novos equipamentos a construir deverão ser inseridos no local onde se verifica o guiamento do *'roving'*, necessitando coexistir com o mesmo.

3.2.2. Condições de acoplamento dos novos sistemas

Atendendo aos requisitos inicialmente traçados para o projecto no geral, poderemos particularizar para o caso presente, estabelecendo os seguintes factores como vitais para uma capaz interligação entre o novo equipamento e o já existente:

- O novo equipamento terá que estar sincronizado, em termos de velocidade, com o equipamento já existente, já que os *'pullers'* irão exercer força de tracção sobre um conjunto pré-forma+perfil pultrudido (ou seja, perfil pultrudido híbrido, quando, em simultâneo, o motor de alimentação das pré-formas está a exercer uma força de compressão sobre as mesmas, da qual deverá resultar um movimento uniforme e sincronizado;
- Os alimentadores deverão proporcionar um correcto alinhamento da alimentação com a matriz, assegurando que o eixo de alimentação é colinear com o eixo da cavidade da matriz e a velocidade/caudal estão sincronizadas.

3.3. Sistema de Pultrusão Híbrida tendo por base pré-formas

Atendendo a que se pretende preencher o interior dos tubos a produzir através de pultrusão, e considerando ainda que o processo de fabricação é contínuo, o preenchimento do núcleo será realizado através de pré-formas dos materiais que desejarmos utilizar como núcleo, previamente cortados ou conformados e alimentados de forma contínua ao sistema, em que o tubo pultrudido será produzido em torno dessa mesma pré-forma.

No caso presente, a empresa tinha como requisito inicial utilizar barras de material pré-adquiridas, que se adaptassem directamente às dimensões interiores do tubo rectangular a produzir. Assim, o equipamento que se deseja construir terá que permitir o armazenamento e alimentação contínua desses perfis, de dimensões perfeitamente definidas.

O produto final assim obtido terá como mais-valias:

- Um incremento do Momento de Inércia, o que beneficia de sobremaneira o dimensionamento destes perfis, pois os mesmos são geralmente aplicados tendo como solicitação principal a flexão, situação que é fortemente beneficiada pelo incremento do Momento de Inércia;
- Os benefícios do incremento do Momento de Inércia não serão afectados de forma significativa pelo incremento do peso correspondente à introdução da pré-forma;
- Jogando com os materiais do núcleo, poderemos conseguir ganhos significativos em termos de isolamento acústico, o que é extremamente favorável à aplicação deste tipo de perfis em divisórias e plataformas interiores em edifícios;
- Os mesmos materiais das pré-formas poderão ainda ser seleccionados tendo em vista o incremento do isolamento térmico, o que poderá ser um forte argumento comercial na sua aplicabilidade em estruturas externas de edifícios, onde a poupança de energia possa ser um requisito a ter em conta;
- Visto as alterações de peso não serem significativas, são mantidas as restantes vantagens gerais dos perfis pultrudidos, nomeadamente a facilidade de transporte e montagem;
- A introdução da pré-forma não acarreta qualquer problema para outras propriedades típicas dos materiais compósitos de matriz polimérica, nomeadamente a forte resistência à corrosão e a possibilidade de serem fabricados com a cor final desejada pelo cliente;

- Desde que os remates dos perfis sejam devidamente cuidados, não se prevê a necessidade de quaisquer operações suplementares de manutenção, pelo facto do perfil se encontrar preenchido com uma pré-forma de outro material. Naturalmente, no caso de aplicação em estruturas exteriores, a montagem passará a assumir importância significativa, com vista a evitar o acesso de humidade ao núcleo do perfil;

Desta forma, prevê-se que o produto assuma um forte acréscimo de competitividade e o seu campo de aplicação seja igualmente incrementado, com o maior número de argumentos comerciais de que passará a dispor, graças às novas propriedades que passará a patentear.

3.3.1. Anteprojecto das soluções preconizadas

Com base na necessidade evocada pela empresa ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., que assenta no conteúdo da secção anterior, e tendo como foco apenas o equipamento para a produção de perfis híbridos com base em pré-formas, foi elaborada uma lista de premissas a que o equipamento deveria obedecer (caderno de encargos), as quais serviram de base ao anteprojecto, conforme é seguidamente indicado:

- A estrutura deverá ser simples, prática e fiável, usando preferencialmente componentes normalizados;
- Integração completa e eficaz no processo produtivo existente, permitindo o acoplamento e desacoplamento fácil da nova estrutura;
- Facilidade no estabelecimento e realização das operações de manutenção;

- Os sistemas de comando deverão permitir uma completa compatibilidade entre o sistema já existente e a nova estrutura;
- O novo equipamento poderá dispor de energia eléctrica e ar comprimido, disponíveis nas instalações da empresa e já ligados ao equipamento principal;
- Apesar de se pretender uma estrutura leve, a mesma deverá poder suportar os choques inevitáveis num sistema produtivo, onde se lidam com materiais volumosos e pesados;

- O acoplamento do novo equipamento deverá garantir que a alimentação da pré-forma se irá processar de forma completamente alinhada com a feira instalada no equipamento principal;
- O novo equipamento deverá permitir o armazenamento de uma quantidade apreciável de barras de cortiça ou de poliuretano, evitando que o equipamento esteja continuamente a necessitar ser alimentado;
- Este armazém de matéria-prima deverá ser transparente, para permitir que os colaboradores vão analisando a necessidade de alimentação do equipamento com nova matéria-prima;
- O motor de acionamento deverá possuir a protecção eléctrica necessária para que não se verifique qualquer acidente com ignição da resina e respectiva inflamação da mesma (protecção ATEX);
- Deverá ser tido em consideração o arranque do processo, através do acionamento de um cilindro pneumático que proceda à introdução do início de cada uma das barras de pré-formas no sistema de alimentação;
- O sistema de tracção das barras de pré-formas deverá exercer a força necessária sobre as mesmas, sem as esmagar, já que a resistência da cortiça é diferente da patenteada pelo poliuretano rígido;
- Deverá ser levada em consideração a força de atrito de deslizamento das pré-formas umas sobre as outras ao longo do sistema de armazenamento. Para tal, deverá ser considerado o coeficiente de atrito de cada um desses materiais sobre eles mesmos;
- Os armários de comando eléctrico e pneumático deverão estar convenientemente protegidos na parte inferior do equipamento;
- Apesar de algumas restrições existentes devido à necessidade de acoplamento entre os dois equipamentos, deverão ser salvaguardados todos os aspectos de ergonomia possíveis, por forma a minimizar esforços desnecessários e a evitar eventuais doenças profissionais;
- A parte superior do equipamento deverá suportar possíveis ferramentas que possam ser necessárias à montagem e afinação do equipamento;
- A parte inferior do equipamento deverá ser fechada, de forma a que não seja aproveitado esse espaço para arrumações desnecessárias;
- A estrutura deverá estar dimensionada por forma a que um operador suba ao tampo superior, sem que se verifique qualquer dano na estrutura;
- Custo reduzido em todas as vertentes (componentes e fabricação).

Com base nestas premissas, começaram por ser elaborados os primeiros esboços, dos quais se dão conta nas figuras que seguidamente são mostradas.

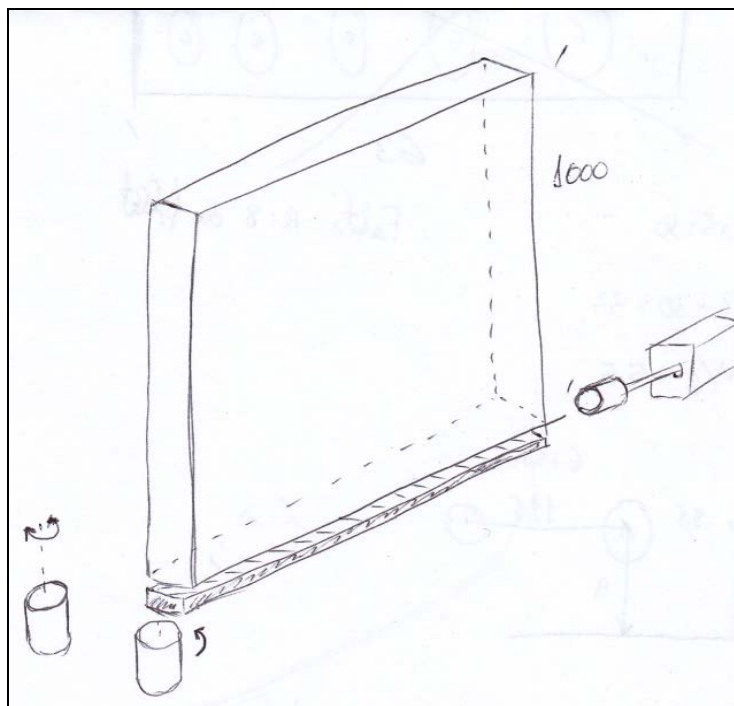


Figura 33 - Esboço inicial da estrutura 1 (1)

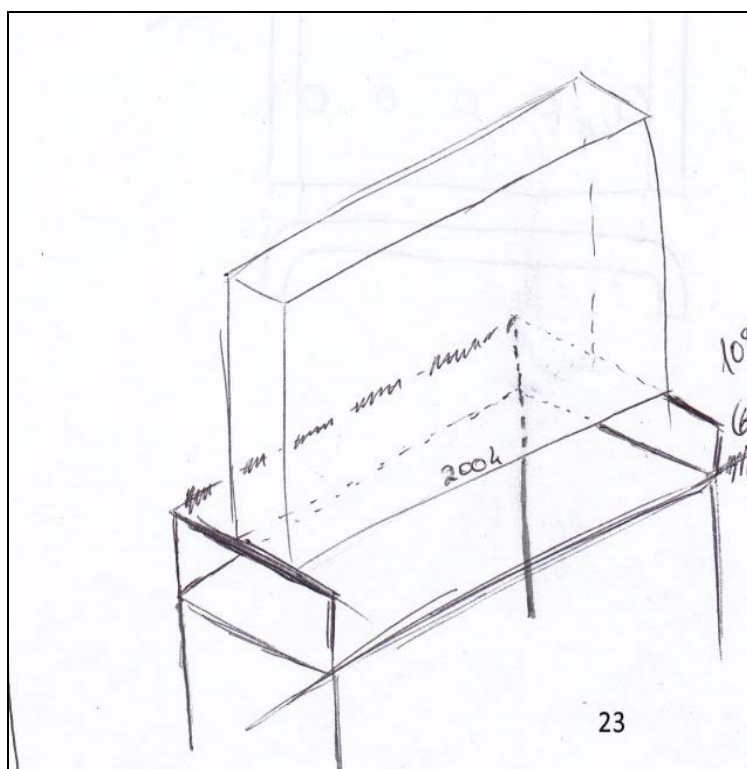


Figura 34 - Esboço inicial da estrutura 1 (2)

Os esboços mostrados resultam de um processo iterativo de elaboração → discussão → alteração → apresentação de nova proposta. O processo evoluiu de uma forma conjunta e, depois de todas as iterações, o conjunto seleccionado adoptou a forma seguinte:

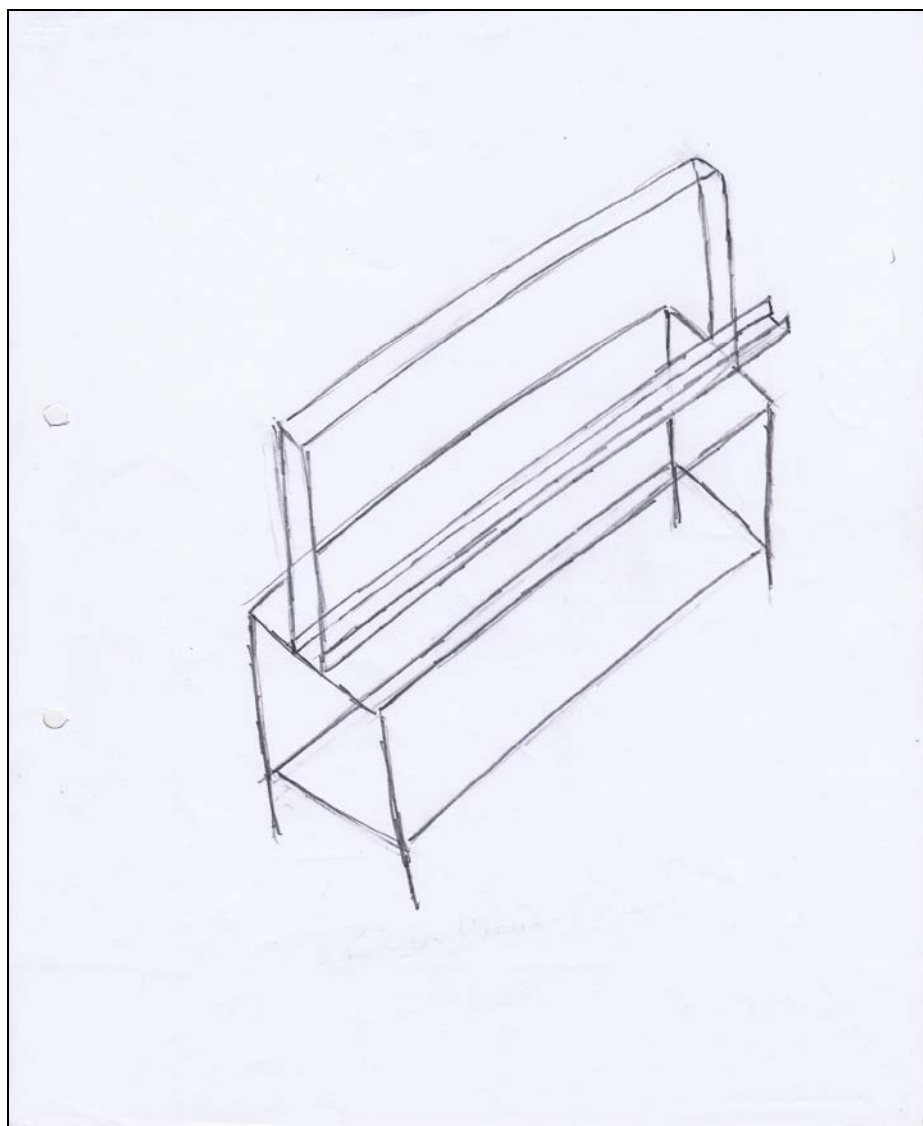


Figura 35 - Esboço final da estrutura 1

Foi com base no esboço mostrado na figura anterior, que mereceu a aprovação da empresa, que o projecto se veio a desenvolver, conforme será seguidamente referido.

3.3.2. Projecto e cálculo das soluções preconizadas

3.3.2.1. Esforços aplicados à estrutura

Tendo em consideração as premissas anteriormente listadas, teremos ainda que considerar o efeito do peso próprio e de eventuais solicitações externas.

Como abordagem geral ao projecto, foi considerado um perfil-tipo, normalmente aplicado pela empresa em outras situações, e do qual havia 'stock', como base de trabalho.

Foi estudado o efeito das solicitações sobre esses perfis, e a abordagem foi feita de forma a permitir a análise das deformações (flechas) impostas à estrutura, tendo por base o desenho inicial. No caso de se verificar que as deformações seriam superiores ao admissível, seria equacionada uma das seguintes vias:

- Adopção de um perfil mais robusto;
- Resedinho da estrutura, por forma a incrementar a sua rigidez, caso este reforço fosse de encontro às necessidades detectadas.

Para facilitar a percepção do projecto, o conjunto total foi dividido em subconjuntos.

O primeiro subconjunto a considerar foi a estrutura correspondente ao armazém de matéria-prima (pré-formas). O mesmo assumirá a configuração presente na figura seguinte (Figura 36), sendo necessário proceder aos cálculos para selecção dos perfis necessários e validação dos resultados.

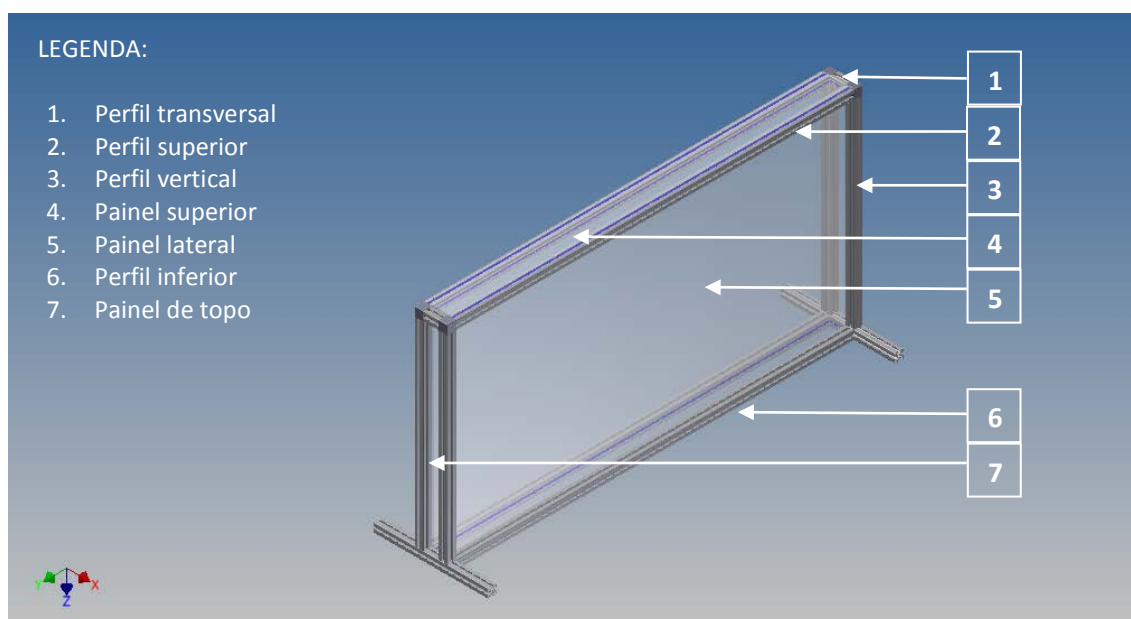


Figura 36 - Representação da estrutura correspondente ao armazém da matéria-prima (pré-formas)

Como se pode verificar pela figura acima, temos o compartimento de armazenagem, que possui perfis longitudinais superiores (Figura 36-2), inferiores (Figura 36-6) e verticais (Figura 36-3), revestido com painéis de acrílico (Figura 36-4, 5 e 7), com a excepção da parte inferior que corresponde ao acesso à calha com roletes que guia as pré-formas e no topo do lado direito que corresponde ao lado por onde se processa o carregamento do armazém de matéria-prima.

O segundo subconjunto diz respeito à estrutura inferior que, neste caso, é a estrutura-base. O mesmo assumirá a configuração presente na figura seguinte (Figura 37), sendo necessário proceder aos cálculos para selecção dos perfis necessários e validação dos resultados.

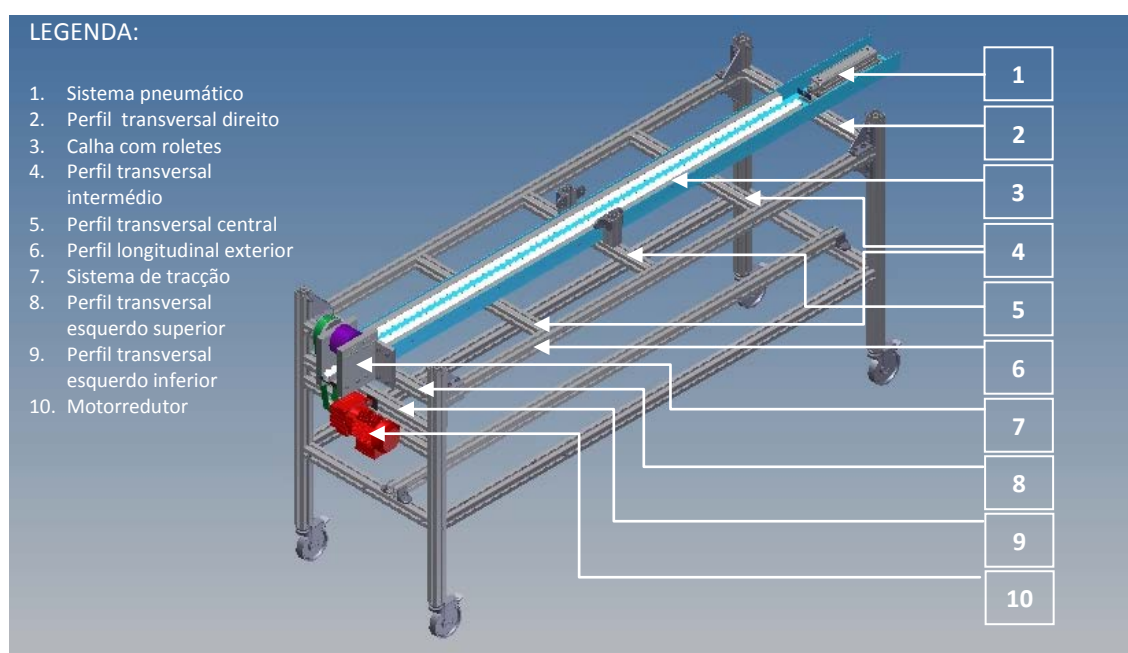


Figura 37 - Aspecto da parte inferior da estrutura

Como se pode verificar pela figura acima, a estrutura-base, comporta a calha com roletes que encaminha as pré-formas para a fieira (Figura 37-3), sendo auxiliada pelo sistema pneumático (Figura 37-1) e de tracção (Figura 37-7). Esta mesma calha assenta na parte superior da estrutura-base, nos perfis transversais. O sistema de tracção (Figura 37-7) encontra-se fixo nos perfis transversais superiores do lado esquerdo (Figura 37-8), encontrando-se o moto-reductor (Figura 37-10), fixo nos perfis transversais inferiores (Figura 37-9) do mesmo lado. O espaço abaixo da calha com roletes até aos perfis longitudinais que antecedem as rodas que servirão de movimentação à estrutura é ocupado com armários que se destinam à parte eléctrica, pneumática e possíveis ferramentas.

Analisando a estrutura, com o objectivo de simplificar a verificação dos valores de carga admissível nos perfis, iremos considerar para esta prova apenas o perfil mais crítico, isto é aquele que está sujeito a cargas mais elevadas e que possui maior vão. Para esta verificação iremos utilizar os critérios usados pela Bosch Rexroth, que se encontram no Anexo III.

Uma vez confirmado que o perfil seleccionado cumpre com os requisitos utilizados nos critérios da Bosch Rexroth, todos os outros perfis serão validados pelo facto de se encontrarem submetidos a cargas de valor inferior ao perfil referenciado e de possuírem menor vão.

Colocaremos a hipótese acidental da presença de uma pessoa (com 150 kg), situada a meio vão do perfil referenciado e verificaremos o seu comportamento mecânico.

Pelo que nos é dado verificar na figura 37-6, os perfis longitudinais exteriores, são dos que possuem maior vão e suportam maior carga, pois, através dos perfis transversais recai o peso do armazém de matéria-prima, parte do peso da estrutura superior e do sistema de guiamento das pré-formas.

Iremos proceder inicialmente ao cálculo dos esforços existentes na estrutura, seguindo-se a determinação das reacções em função dos esforços já calculados e finalmente seleccionaremos o perfil que consideramos mais crítico, para verificar se a sua deformação é ou não superior à deformação admissível (para verificação do seu comportamento mecânico).

3.3.2.1.2. Esforços aplicados à parte superior da estrutura

Com vista a estudar os esforços aplicados à estrutura, procedeu-se ao cálculo do peso de cada um dos elementos estruturais considerados no equipamento, assim como o peso máximo de matéria-prima que poderá estar contido no armazém do equipamento, relativamente a este último, procedeu-se à determinação do peso máximo de perfis rectangulares de cortiça que poderiam estar armazenados no compartimento de 2 x 1 m, visto ser este o material que possuirá maior densidade, de entre aqueles que se prevêem venham a ser utilizados como pré-formas. Para tal, foram realizadas pesquisas no sentido de encontrar valores fiáveis para o peso específico da cortiça, quando trabalhada sob esta forma. Nesta pesquisa foram encontrados diferentes valores, atendendo à qualidade/porosidade da mesma. Assim, poderão ser esperados valores entre 180 e 240 kg/m³. Atendendo à incerteza sobre possíveis evoluções deste material e precavendo a utilização de cortiça com maior densidade ou outro material congénere, entendeu-se por bem considerar o valor de 400 kg/m³ (Anexo III) como valor-padrão para este cálculo.

$$\text{Volume} = 2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0,063 \text{ m} = 0,126 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = \rho \times V = 400 \text{ kg/m}^3 \times 0,126 \text{ m}^3 = 50,4 \text{ kg} \cong 500 \text{ N}$$

Considera-se que a carga determinada corresponde a um esforço uniformemente distribuído:

$$\text{Carga distribuída} = \frac{500 \text{ N}}{2 \text{ m}} = 250 \text{ N/m}$$

Portanto, teremos que considerar para efeitos de cálculo estrutural que o material contido no armazém provocará uma carga distribuída uniforme na estrutura, equivalente a 250 N/m.

Seguidamente, procedeu-se à determinação do peso dos painéis acrílicos laterais (Figura 36-5), que revestem o compartimento de armazenagem da matéria-prima. Tendo em conta que os painéis acrílicos se limitam a guiar as pré-formas para a calha com roletes, considera-se desprezável o esforço por encurvadura a que irão estar sujeitos. Foi seleccionada uma chapa acrílica com 5 mm de espessura, a qual apresenta a densidade de 1200 kg/m³ (Anexo III).

$$\text{Densidade} = 1200 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volume} = 2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0,005 \text{ m} = 0,01 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = \rho \times V = 1200 \text{ kg/m}^3 \times 0,01 \text{ m}^3 = 12 \text{ kg} \cong 120 \text{ N}$$

Considera-se que a carga determinada corresponde a um esforço uniformemente distribuído de:

$$\text{Carga distribuída} = \frac{120 \text{ N}}{2 \text{ m}} = 60 \text{ N/m}$$

Como temos dois painéis laterais, passa a corresponder a um esforço uniformemente distribuído de:

$$\text{Total} = 2 \text{ painéis} \times 60 \text{ N/m} = 120 \text{ N/m}$$

Segue-se o cálculo do peso do painel acrílico que cobre o compartimento de armazenagem (Figura 36-4). Utiliza-se o mesmo tipo de chapa acrílica usada nas partes laterais, a qual será comum a toda a estrutura.

$$\text{Volume} = 2 \text{ m} \times 0,165 \text{ m} \times 0,005 \text{ m} = 1,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = 1200 \text{ kg/m}^3 \times 1,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,98 \text{ kg} \cong 20 \text{ N}$$

Considera-se que a carga determinada corresponde a um esforço uniformemente distribuído de:

$$\text{Carga distribuída} = \frac{20 \text{ N}}{2 \text{ m}} = 10 \text{ N/m}$$

Finalmente, calculou-se o esforço provocado pelo painel acrílico de topo (Figura 36-7), que servirá de batente ao carregamento das pré-formas. Este esforço corresponde a uma carga pontual, pois esta encontra-se concentrada na parte esquerda da estrutura. Segue-se a determinação do peso do acrílico de topo:

$$\text{Volume} = 1,070 \text{ m} \times 0,077 \text{ m} \times 0,005 \text{ m} = 4,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = 1200 \text{ kg/m}^3 \times 4,12 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cong 0,5 \text{ kg} \cong 5 \text{ N}$$

Considera-se que esta carga é do tipo pontual, uma vez que se encontra concentrada junto do apoio esquerdo.

Prosegue-se agora com a determinação do peso dos perfis que têm influência directa nos esforços da estrutura.

O cálculo iniciar-se-á pelos perfis longitudinais superiores, do compartimento de armazenagem, os quais, segundo a ficha técnica do perfil BOSCH, (Anexo III), apresentam uma carga distribuída de 20 N/m relativa ao peso próprio.

$$\text{Comprimento total} = 2 \text{ m} \times 2 \text{ perfis} = 4 \text{ m}$$

Este comprimento de perfil corresponde a uma carga de:

$$\text{Carga} = 20 \text{ N/m} \times 4 \text{ m} = 80 \text{ N}$$

No caso dos perfis verticais, o conjunto de perfis situado do lado direito será exactamente igual ao conjunto colocado do lado esquerdo.

$$\text{Comprimento total} = 1 \text{ m} \times 2 \text{ perfis} = 2 \text{ m}$$

Este esforço corresponde a uma carga pontual, uma vez que os perfis se encontram na vertical:

$$\text{Carga} = 20 \text{ N/m} \times 2 \text{ m} = 40 \text{ N}$$

Os perfis transversais (Figura 36-1) que servem de fecho ao compartimento de armazenagem e que tem por comprimento a largura da pré-forma, não foram tidos em conta devido ao facto de serem pequenos e considerar-se desprezável o seu contributo para os esforços na estrutura.

Relativamente à parte inferior da estrutura, iremos contabilizar os esforços que têm influência no comportamento da estrutura. Iniciámos pelo sistema de tracção (Figura 37-7), que tem por finalidade o auxílio na introdução das pré-formas no interior da fieira, a qual pesa cerca de 9,5 kg (Anexo III), o que corresponde a cerca de 95 N.

Neste elemento temos um momento torsor provocado pela excentricidade do sistema de tracção, tendo em conta que a distância do centro de massa é de 0,085 m (0,170 m / 2), o que irá corresponder a um momento torsor de:

$$M_t = F \times b = 95 \text{ N} \times 0,085 \text{ m} \cong 8,1 \text{ N.m}$$

O moto-reductor (Figura 37-10), que faz movimentar o sistema de tracção, pesa 6 kg (Anexo III), o que corresponde a cerca de 60 N.

O momento torsor provocado pela excentricidade do moto-reductor, é devido ao facto do centro de massa do moto-reductor se situar a 0,068 m (0,065+0,003) do seu plano de fixação, o que irá contribuir para um momento torsor de:

$$M_t = F \times b = 60 \text{ N} \times 0,068 \text{ m} = 4,08 \text{ N.m}$$

O grupo de roletes, são comercializados com comprimentos de 2 e 3 m, apresentando um peso distribuído de 0,72 kg/m = 7,06 N/m, valor que foi arredondado para 7 N/m. Tendo em conta que são utilizadas três calhas de roletes em paralelo, na calha quinada em U, irá implicar uma carga distribuída de:

$$7 \text{ N/m} \times 3 \text{ calhas} = 21 \text{ N/m}$$

A calha quinada em U, que serve de suporte às calhas de roletes é executada em chapa de aço inox AISI 304 de 2 mm de espessura, que tem um peso específico de 8080 kg/m^3 (Anexo III), o qual corresponde a uma carga distribuída de:

$$\text{Volume} = 2,43 \text{ m} \times 0,264 \text{ m} \times 0,002 \text{ m} = 1,283 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = 8080 \text{ kg/m}^3 \times 1,283 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 11,290 \text{ kg} \cong 112,904 \text{ N}$$

$$\text{Carga distribuída} = \frac{112,904 \text{ N}}{2,43 \text{ m}} = 46,463 \text{ N/m}$$

O valor da carga distribuída da calha quinada em U foi arredondado para 47 N/m.

Seguidamente iremos calcular a força do cilindro pneumático (Figura 37-1) necessária, para deslocar a pré-forma de cortiça para o interior da feira. Tendo em conta que o compartimento de armazenagem comporta no máximo $\approx 50 \text{ kg}$ de cortiça e considerando um coeficiente de atrito da cortiça sobre cortiça de 0,97 (Anexo III), a força necessária para deslocar a pré-forma de cortiça será:

$$F_{\text{cilindro}} = 0,97 \times 50 \text{ kg} \times 9,81 \cong 476 \text{ N}$$

Este valor corresponde à força mínima para deslocar a pré-forma de cortiça. Precavendo uma ligeira folga na força do cilindro, considera-se um coeficiente de segurança de 1.5, o que faz com que tenhamos necessidade de uma força de accionamento de:

$$F_{\text{cilindro}} = 476 \text{ N} \times 1,5 = 714 \text{ N}$$

O cilindro com valor standard superior a 714 N correspondente ao fabricante FESTO é de 750 N (Anexo III), sendo portanto este o escolhido, o que dará um coeficiente de segurança de:

$$C.S. = \frac{750 \text{ N}}{476 \text{ N}} \cong 1,575$$

Segundo a ficha técnica do cilindro, este pesa cerca de $1 \text{ kg} \approx 10 \text{ N}$, e a protecção de chapa que o envolve pesa cerca de $2 \text{ kg} \approx 20 \text{ N}$ (Anexo III), o que dá uma carga de 30 N ($10 + 20$), num comprimento de cerca 0,34 m, originando uma carga distribuída de 87 N/m. Esta

mesma carga assenta na calha quinada em U de 47 N/m, que serve de suporte às calhas de roletes, resultando neste espaço uma carga distribuída de:

$$\text{Carga distribuída} = 87 \text{ N/m} + 47 \text{ N/m} = 134 \text{ N/m}$$

3.3.2.2. Análise das reacções nos apoios

Face aos esforços determinados anteriormente, iremos proceder ao cálculo das reacções na estrutura, tendo em conta as cargas existentes. Para facilmente identificar os perfis analisados, estes foram numerados, possibilitando assim uma rápida localização, como documenta a figura seguinte:

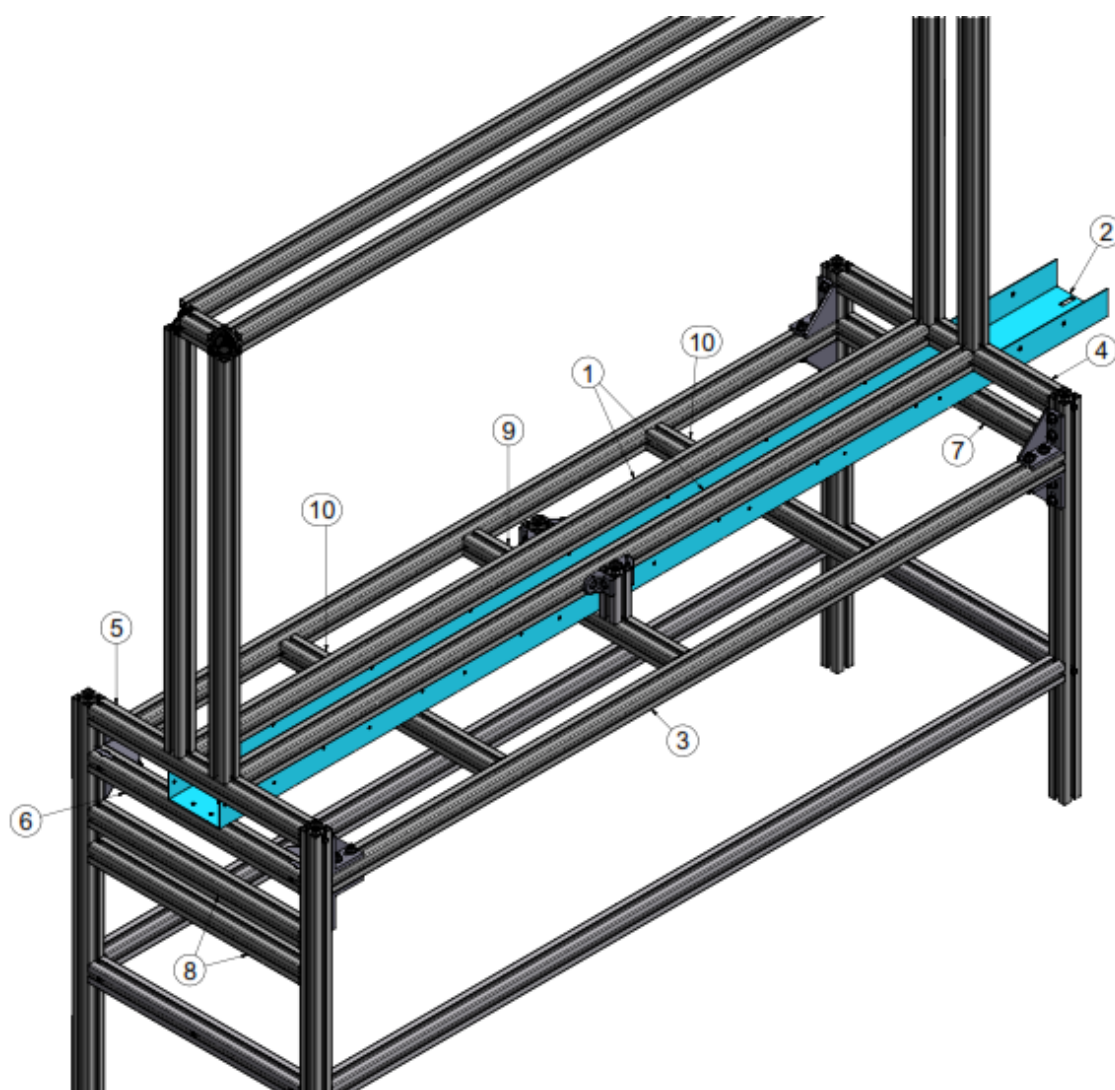


Figura 38 - Identificação dos perfis analisados

No cálculo destas reacções, foi usada a ferramenta informática Ftool, que nos permite obter as reacções e flechas nos perfis, em função das cargas aplicadas e do tipo de perfil utilizado. Trata-se de um software de análise estrutural bidimensional, que não permite a inserção dos momentos torsores. No entanto, estes mesmos são calculados em cada análise. Não é de prever efeitos dos momentos torsores de relevo, pois os esforços na estrutura não são suficientemente elevados, que nos obrigue a ter cuidados acrescidos. Os dados técnicos do perfil encontram-se no Anexo III e correspondem aos seguintes valores:

$$\text{Perfil } 45 \times 45; y = 45 \text{ mm} / 2 = 22,5 \text{ mm}$$

$$I_x = 14 \text{ cm}^4; I_y = 14 \text{ cm}^4; W_x = 6,1 \text{ cm}^3; W_y = 6,1 \text{ cm}^3; A = 7,5 \text{ cm}^2$$

$$E = 70000 \text{ MPa}; R_{p0,2} = 195 \text{ MPa}$$

1 Perfis longitudinais interiores (Figura 38-1)

Por forma a simplificar a análise das reacções dos apoios nas barras, considera-se a análise das duas barras como se fosse uma só. Foram contabilizados os seguintes esforços:

- Acrílicos laterais, 120 N/m (Figura 37-5).
- Acrílico superior, 10 N/m (Figura 37-4).
- Perfis longitudinais superiores, 80 N/m (Figura 37-2).
- Carga distrib. total sob os perfis longit. inferiores, $(120 + 10 + 80) = 210 \text{ N/m}$.
- Acrílico de topo no apoio esquerdo, 5 N (Figura 37-7).
- Perfis verticais no apoio esquerdo, 40 N (Figura 37-3).
- Carga do sistema de tracção no apoio esquerdo, 95 N (Figura 37-7).
- Carga total no apoio esquerdo, $(5 + 40 + 95) = 140 \text{ N}$.
- Perfis verticais no apoio direito, 40 N.
- Momento provocado pelo sistema de tracção no apoio esquerdo, 8,10 Nm.

O sistema resultou no seguinte diagrama de esforços:

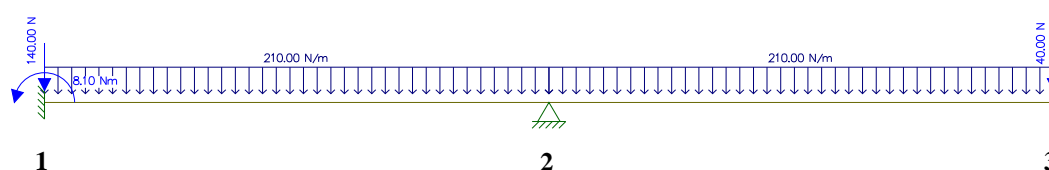


Figura 39 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis longitudinais inferiores

Assim, as reacções nos apoios são as seguintes:

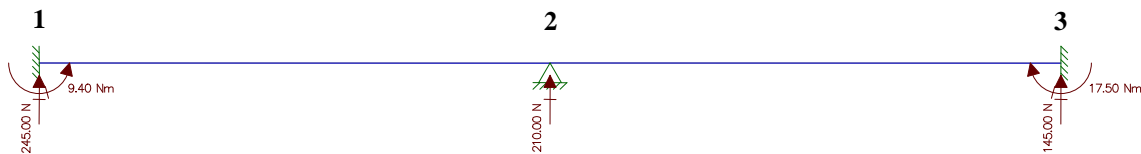


Figura 40 - Diagrama de reacções nos apoios correspondente aos perfis longitudinais inferiores

Tabela 8 - Reacções e flechas correspondentes aos perfis longitudinais inferiores

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	Rotações [rad]
1	245	9,40	0	0
2	210	0	0	≈ 0
3	145	-17,50	0	0

2 Carregamentos nos perfis transversais (Figura 38-2)

Os esforços que actuam nestes perfis, devem-se à carga máxima exercida pelas pré-formas de cortiça no compartimento de armazenagem, ao conjunto da calha e de grupos de roletes que irão encaminhar as pré-formas para a feira, ao sistema pneumático que auxilia na fase inicial a direccionar as pré-formas para os rolos de tracção e ao esforço resultante da análise 1 no perfil transversal central. Foram contabilizados os seguintes esforços:

- Pré-formas de cortiça, 250 N/m.
- Grupos de roletes, 21 N/m.
- Calha que comporta os grupos de roletes, 47 N/m.
- Carga distribuída nas barras transversais, $(250+21+47) = 318$ N/m.
- Carga distribuída devida ao cilindro pneumático, blindagem de protecção e calha, 134 N/m.
- Transmissão do esforço a meio-vão da análise 1, 210 N.
- Peso do sistema de tracção (apoio esquerdo), 95 N.
- Momento do sistema de tracção no apoio esquerdo, que é de 8,10 Nm.
- Força axial, resultante da actuação do cilindro, 750 N.

Volta a considerar-se o peso e o momento do sistema de tracção, pois não é fácil verificar qual é a distribuição de esforços, entre o perfil superior e o inferior do lado esquerdo, que servem de apoio ao referido sistema.

O sistema de cargas atrás referido resultou no seguinte diagrama de esforços:

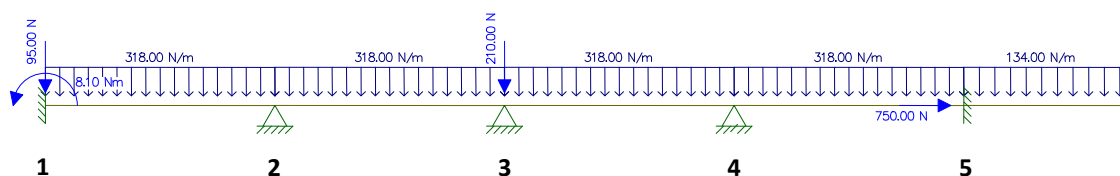


Figura 41 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis transversais

Assim, as reacções nos apoios obtidas são as seguintes:

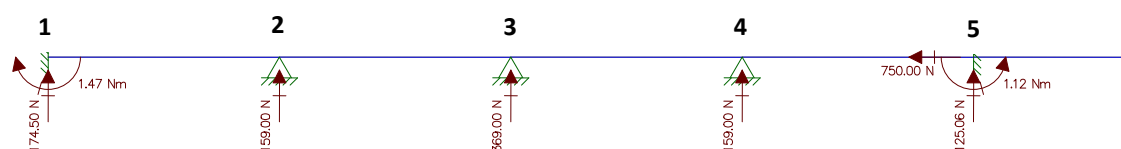


Figura 42 - Diagrama de reacções nos apoios correspondente aos perfis transversais

Tabela 9 - Reacções e flechas correspondentes aos perfis transversais

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	Rotacões [rad]
1	174,50	- 1,47	0	0
2	159	0	0	≈ 0
3	369	0	0	≈ 0
4	159	0	0	≈ 0
5	125,06	1,12	0	0
5	Reacção em x = - 750 N			

3 Perfis longitudinais exteriores (Figura 38-3)

Os carregamentos presentes nos perfis transversais intercalares são suportados pelos perfis longitudinais exteriores. Neste contexto foram contabilizados os seguintes esforços:

- As reacções obtidas no caso 2, nós 2, 3 e 4, resultam do apoio nos perfis transversais. Estas, por sua vez encontram-se ligadas aos perfis longitudinais exteriores, logo estas reacções são distribuídas de igual modo por estes dois perfis. Os valores a considerar são, do nó 2 - 79,50 N (159 / 2), nó 3 - 184,50 N (369 / 2), nó 4 - 79,50 N (159 / 2) e o peso do próprio perfil.
- O momento torsor devido às reacções dos perfis transversais é de:

$$Mt_{nós} = (79,5 \text{ N} + 184,5 \text{ N} + 79,5 \text{ N}) \times 0,311 \text{ m} = 106,829 \text{ Nm}$$

- O momento torsor devido ao peso próprio dos perfis é de:

$$Mt_{\text{peso dos perfis}} = 3 \times \left(0,577 \text{ m} / 2\right) \times 20 \text{ N/m} \times 0,311 \text{ m} = 5,384 \text{ Nm}$$

- Resultando um momento torsor total de:

$$Mt_{\text{total}} = 106,83 \text{ Nm} + 5,38 \text{ Nm} = 112,213 \text{ Nm}$$

Como o perfil se encontra encastrado nas suas extremidades, logo em cada apoio teremos um momento torsor de:

$$Mt = \frac{112,213 \text{ Nm}}{2} = 56,106 \text{ Nm}$$

O sistema resultou no seguinte diagrama de esforços:

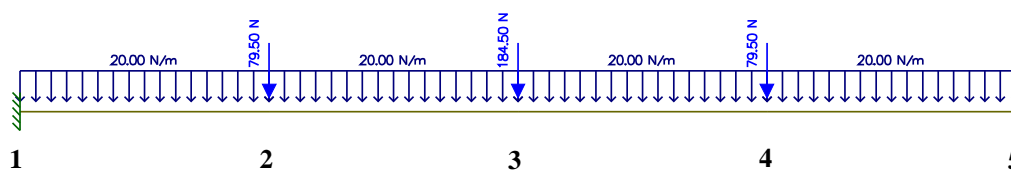


Figura 43 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis longitudinais exteriores

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

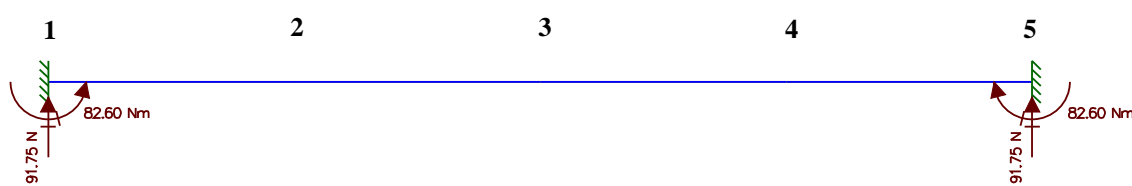


Figura 44 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente aos perfis longitudinais exteriores

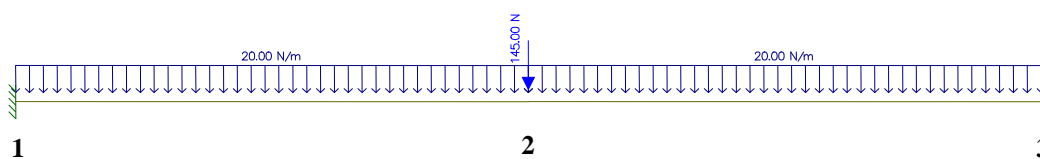
Tabela 10 - Reacções e flechas correspondentes aos perfis longitudinais exteriores

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	rotações [rad]
1	191,75	82,60	0	0
2	0	0	-0,651	$-1,811 \times 10^{-3}$
3	0	0	-1,207	≈ 0
4	0	0	-0,651	$-1,811 \times 10^{-3}$
5	191,75	-82,60	0	0

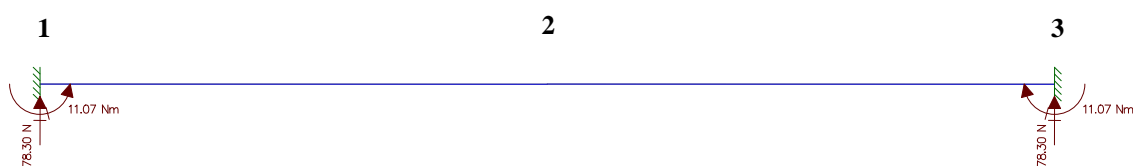
4 Perfil transversal direito superior (Figura 38-4)

Foram consideradas as reacções obtidas no caso 1, do lado direito e o peso do perfil referenciado. O perfil está sujeito a um esforço de 145 N (caso 1 – apoio 3) e a torção resultante do momento existente apresenta um valor de 8,75 Nm ($17,50 \text{ Nm} / 2$, caso 1 – apoio 3) por apoio, devido ao facto de o perfil se encontrar encastrado nas suas extremidades.

O sistema resultou no seguinte diagrama de esforços:

**Figura 45 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal direito superior**

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

**Figura 46 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal direito superior****Tabela 11 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal direito superior**

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	rotações [rad]
1	78,30	11,07	0	0
2	0	0	$-1,564 \times 10^{-2}$	≈ 0
3	78,30	-11,07	0	0

5 Perfil transversal esquerdo superior (Figura 38-5)

Foram consideradas as reacções obtidas no caso 1, do lado esquerdo e o peso do perfil referenciado. O perfil está sujeito a um esforço de 245 N (caso 1 – apoio 1) e a torção resultante do momento existente apresenta um valor de 4,70 Nm (9,40 Nm / 2, caso 1 – apoio 1) por apoio, devido ao facto de o perfil se encontrar encastrado nas suas extremidades.

O sistema resultou no seguinte diagrama de esforços:

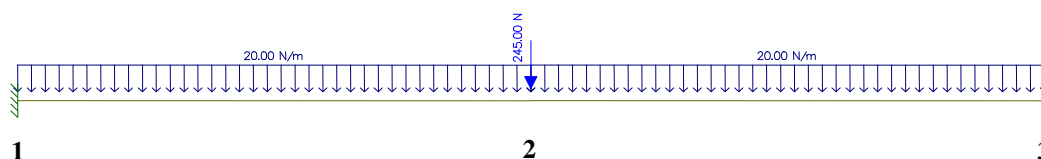


Figura 47 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal esquerdo superior

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

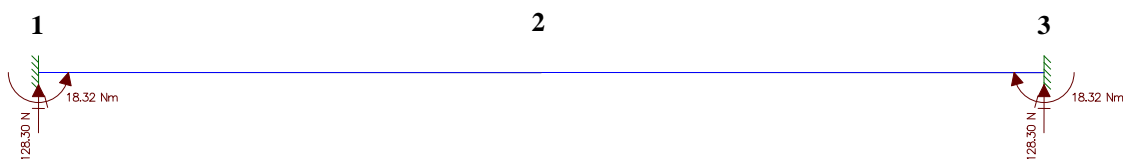


Figura 48 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal esquerdo superior

Tabela 12 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal esquerdo superior

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	Rotações [rad]
1	128,30	18,32	0	0
2	0	0	$-2,601 \times 10^{-2}$	≈ 0
3	128,30	-18,32	0	0

6 Perfil transversal esquerdo inferior (Figura 38-6)

Nesta análise existe a necessidade de verificar os esforços na vertical e na horizontal.

Na vertical, actuam os esforços resultantes das reacções obtidas no caso 2, do lado esquerdo e do peso do próprio perfil, que é de 20 N/m.

Na horizontal actua apenas o esforço, devido à força do cilindro pneumático que é de 750 N, no entanto o esforço aplicado é de 375 N ($750 \text{ N} / 2$), devido ao facto do esforço ser distribuído de igual modo pelos perfis transversais das extremidades (Figura 38 – 6 e7), porque a calha é aparafusada a estes dois perfis.

Assim, na primeira análise (vertical), o perfil está sujeito a uma carga de 174,50 N devido à reacção do caso 2 – apoio 1 e a torção resultante do momento existente apresenta um valor de 0,735 Nm ($1,47 \text{ Nm} / 2$, caso 2 – apoio 1) por apoio, devido ao facto de o perfil se encontrar encastrado nas suas extremidades.

O sistema resultou no seguinte diagrama de esforços:

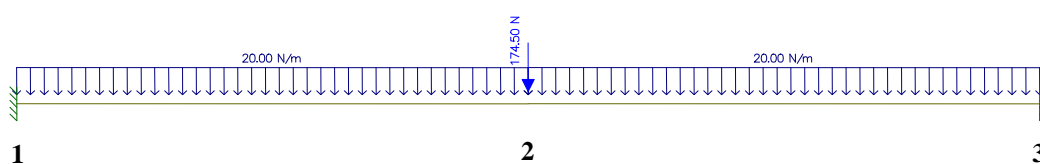


Figura 49 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

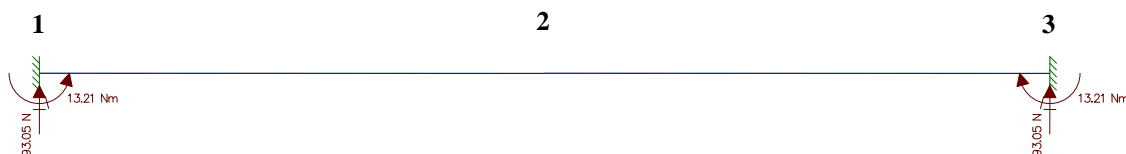


Figura 50 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior

Para a segunda análise (horizontal), foi considerada a força do cilindro pneumático, que é de 375 N, como esforço a que o perfil se encontra sujeito na horizontal. O 'software' não nos permite a inserção do esforço atrás mencionado na horizontal. Contudo, a aplicação do esforço na vertical, resultaria nas mesmas reacções, caso fosse permitida aplicação do esforço na horizontal.

O sistema resultou no seguinte diagrama de esforços:

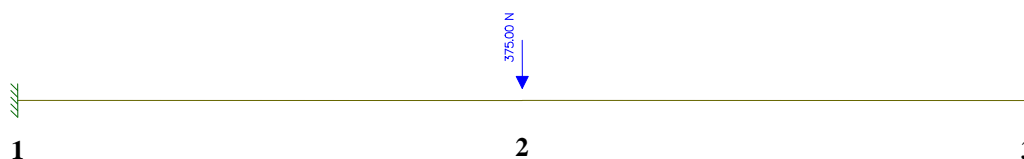


Figura 51 - Diagrama de esforços (horizontais) correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

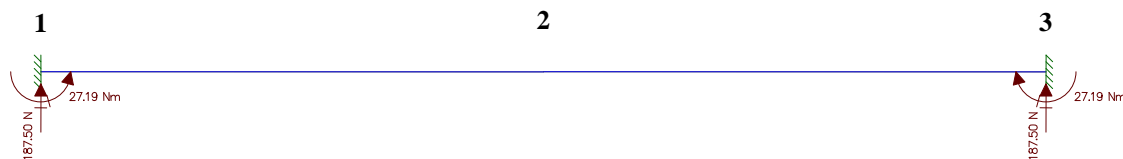


Figura 52 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal esquerdo inferior

Tabela 13 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal esquerdo inferior

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [m]	Rotações [rad]
1 (vertical)	93,05	13,21	0	0
2 (vertical)	0	0	$-1,870 \times 10^{-2}$	≈ 0
3 (vertical)	93,05	-13,21	0	0
1 (horizontal)	187,5	27,19	0	0
2 (horizontal)	0	0	$-3,889 \times 10^{-2}$	0
3 (horizontal)	187,5	-27,19	0	0

Na segunda análise (horizontal), foram registados nos apoios 1 e 3, os valores de $R_y = 187,50 \text{ N}$ e $M_f = 27,19 \text{ Nm}$, que são mais gravosos do que os valores obtidos na primeira análise (vertical) que foram respectivamente de $93,30 \text{ N}$ e de $13,25 \text{ Nm}$. Para a escolha das ligações entre perfis, serão considerados os valores obtidos na segunda análise (horizontal).

7 Perfil transversal direito inferior (Figura 38-7)

Para a análise do perfil transversal direito inferior foram seguidos procedimentos idênticos à análise anterior, porque o enquadramento dos esforços existentes é igual, verificando-se apenas diferenças nos valores considerados.

Assim, na primeira análise (vertical), o perfil está sujeito a uma carga de $125,06 \text{ N}$ devido à reacção do apoio no caso 2 – apoio 5, a torção resultante do momento existente apresenta um valor de $0,735 \text{ Nm}$ ($1,12 \text{ Nm} / 2$, caso 2 – apoio 5) por apoio e o peso do próprio perfil, que é de 20 N/m .

Nesta situação, o diagrama de esforços resultante é o seguinte:

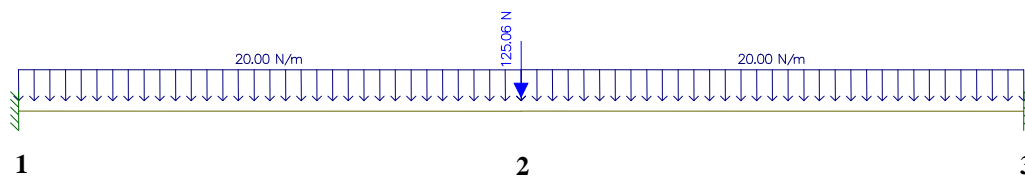


Figura 53 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal direito inferior

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

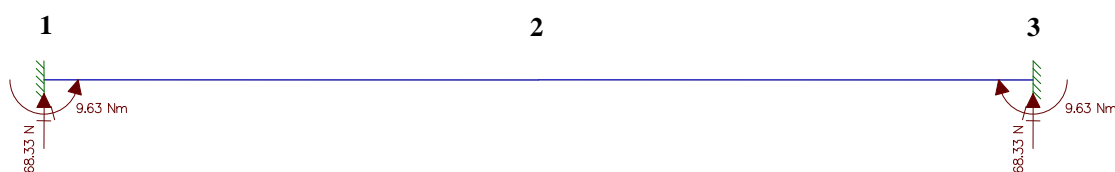


Figura 54 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal direito inferior

Para a segunda análise (horizontal), as reacções obtidas são iguais às do caso anterior e, portanto, aproveitaremos os valores de referência para elaborar a seguinte tabela:

Tabela 14 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal direito inferior

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	Rotações [rad]
1 (vertical)	68,33	9,63	0	0
2 (vertical)	0	0	$-1,357 \times 10^{-2}$	≈ 0
3 (vertical)	68,33	-9,63	0	0
1 (horizontal)	187,5	27,19	0	0
2 (horizontal)	0	0	$-3,889 \times 10^{-2}$	0
3 (horizontal)	187,5	-27,19	0	0

Na segunda análise (horizontal), foram registados nos apoios 1 e 3, os valores de $R_y = 187,5$ N e $M_f = 27,19$ Nm, que são mais gravosos do que os valores obtidos na primeira análise (vertical) que foram respectivamente de 68,33 N e de 9,63 Nm. Para a escolha das ligações entre perfis, será considerado os valores obtidos na segunda análise (horizontal).

8 Perfis transversais esquerdos inferiores (Figura 38-8)

Foram considerados os esforços devido ao peso do motor (60 N) e ao peso próprio do perfil. A torção devido ao momento provocado pelo peso do motor, apresenta um valor de 2,04 Nm (4,08 Nm / 2). Estes perfis foram analisados em conjunto.

O sistema resultou no seguinte diagrama de esforços:

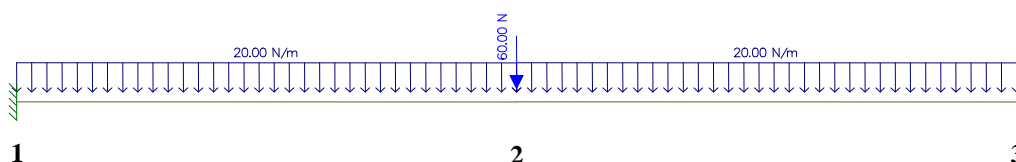


Figura 55 - Diagrama de esforços correspondente aos perfis transversais esquerdo inferiores

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

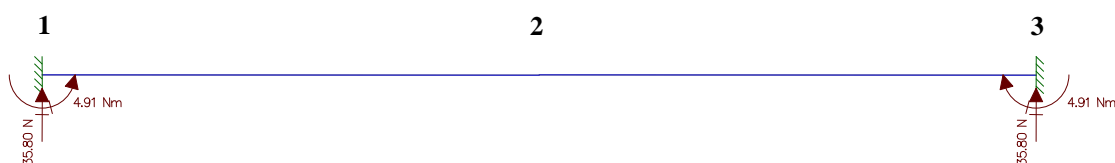


Figura 56 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente aos perfis transversais direito inferior

Tabela 15 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal direito inferior

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	Rotações [rad]
1	35,80	4,91	0	0
2	0	0	$-6,823 \times 10^{-3}$	≈ 0
3	35,80	-4,91	0	0

9 Perfil transversal central (Figura 38-9)

Foi considerada a carga resultante da reacção do caso 2 – apoio 3, no perfil transversal central, situada a meio-vão que corresponde a um esforço de 369 N e o peso do perfil referenciado.

Nesta situação o diagrama de esforços resultante é o seguinte:

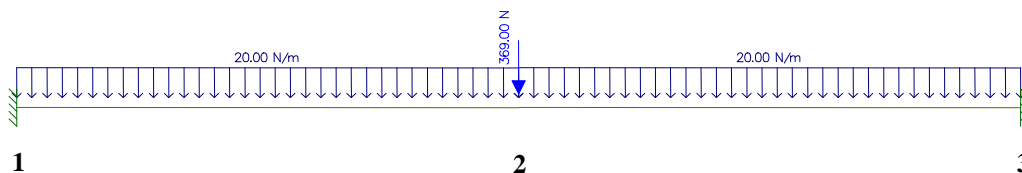


Figura 57 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal central

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

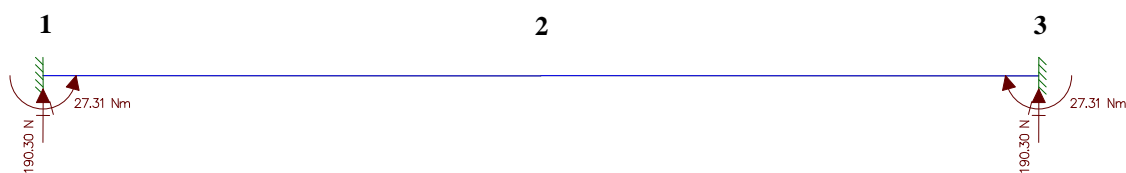


Figura 58 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal central

Tabela 16 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal central

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	rotações [rad]
1	190,30	27,31	0	0
2	0	0	$-3,886 \times 10^{-2}$	≈ 0
3	190,30	-27,31	0	0

10 Perfil transversal intermédio esquerdo e direito (Figura 38-10)

Como estes perfis são iguais, quer em termos de vão, quer em termos de esforços estruturais, será analisado um deles e os resultados obtidos serão comuns aos dois perfis.

Foi considerada a carga resultante da reacção do caso 2 – apoio 2, no perfil transversal intermédio esquerdo situado a meio-vão, dado que corresponde a um esforço de 159 N e ao peso próprio do perfil.

Neste caso, o diagrama de esforços resultantes é o seguinte:

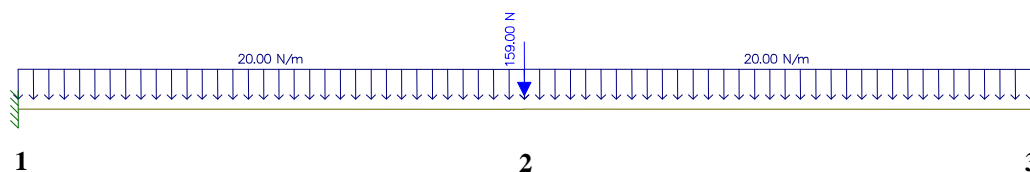


Figura 59 - Diagrama de esforços correspondente ao perfil transversal intermédio esquerdo

Assim, as reacções nos apoios/nós obtidas são as seguintes:

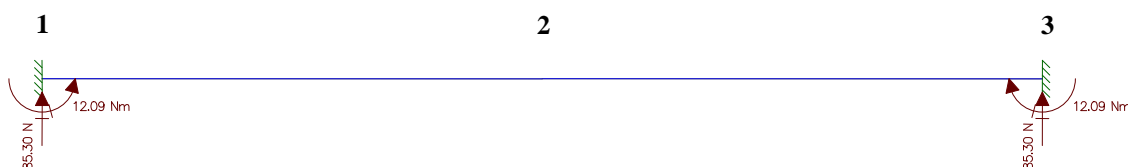


Figura 60 - Diagrama de reacções nos apoios/nós correspondente ao perfil transversal intermédio esquerdo

Tabela 17 - Reacções e flechas correspondentes ao perfil transversal intermédio esquerdo

Apoios/Nós	Reacções y [N]	Momentos [Nm]	Flechas [mm]	Rotações [rad]
1	85,30	12,09	0	0
2	0	0	$-1,709 \times 10^{-2}$	≈ 0
3	85,30	-12,09	0	0

3.3.2.3 Análise dos resultados

Analisando as tabelas anteriores, verificámos que no caso da análise 3, o perfil testado é o que apresenta maior flecha (1,207 mm). Contudo, não é o mais solicitado. O requisito que mais o penaliza é o seu vão, que é de 2 m. Apesar de se verificarem solicitações de maior valor, os vãos dos perfis em causa são menores e, portanto, têm menores implicações a nível estrutural.

Utilizando os critérios de verificação da Bosch Rexroth que se encontram no Anexo III, iremos confirmar se este perfil cumpre com os requisitos estabelecidos. Os dados técnicos do perfil encontram-se no mesmo anexo.

$$\text{Perfil } 45 \times 45; y = 45/2 = 22,5 \text{ mm}; g \cong 10 \text{ m/s}^2; m' = 2 \text{ kg/1000}$$

$$I_x = 14 \text{ cm}^4; I_y = 14 \text{ cm}^4; W_x = 6,1 \text{ cm}^3; W_y = 6,1 \text{ cm}^3; A = 7,5 \text{ cm}^2$$

$$E = 70000 \text{ MPa}; R_{p0,2} = 195 \text{ MPa}; S_{F_{\text{erf.}}} = 2$$

- Flecha do perfil em função do esforço a que é submetido:

Uma vez que no critério da Bosch a validação dos perfis se reporta a uma carga concentrada e no caso em análise temos três cargas concentradas equidistantes, considera-se a substituição das três cargas por uma só, cujo valor é a soma das mesmas. Esta situação é mais penalizante, pois dará lugar a uma maior flecha, majorando automaticamente o valor real.

- Flecha do perfil devido à carga existente, em que F é a soma das três cargas concentradas equidistantes (caso 3 – nós 2, 3 e 4) e L o comprimento do perfil;

$$F = 2 \text{ cargas} \times 79,5 \text{ N} + 184,5 \text{ N} = 343,5 \text{ N} ; L = 2000 \text{ m}$$

$$f = \frac{F \times L^3}{192E \times I \times 10^4} = \frac{343,5 \times 2000^3}{192 \times 70000 \times 14 \times 10^4} = 1,461 \text{ mm}$$

- Flecha do perfil devido ao peso próprio:

$$f = \frac{m' \times g \times L^4}{384E \times I \times 10^4} = \frac{(2/1000) \times 10 \times 2000^4}{384 \times 70000 \times 14 \times 10^4} = 8,503 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Somando as flechas teremos:

$$f_{\text{total}} = 1,461 + 8,503 \times 10^{-2} = 1,546 \text{ mm}$$

Por indicação da firma ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda, é permitida uma flecha até 0,5% do comprimento (2 m) da estrutura, que representa 10 mm. Em função dos critérios da Bosch Rexroth resulta então um coeficiente de segurança de:

$$cs = 10 \text{ mm} / 1,546 \text{ mm} = 6,468$$

- Iremos proceder ao controle da resistência, tendo sido considerado um coeficiente de segurança de 2, para evitar a deformação por flexão.

$$\sigma_{b \text{ max}} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{8W \times 10^3} = \frac{(2/1000 \times 10 \times 2000 + 343,5) \times 2000}{8 \times 6,1 \times 10^3}$$

$$\sigma_{b \text{ max}} = 15,717 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bzul.} = \frac{R_{p0,2}}{S_{\text{perf.}}} = 195/2 = 97,50 \text{ MPa}$$

- Pelo critério da Bosch Rexroth a

$$\sigma_{b \text{ max}} < \sigma_{bzul.} \rightarrow 15,717 \text{ MPa} < 97,50 \text{ MPa}$$

portanto, cumpre com o critério estabelecido. Neste requisito consegue-se um coeficiente de segurança adicional de:

$$cs = 97,50 \text{ MPa} / 15,717 \text{ MPa} = 6,203$$

- Concluimos que o perfil cumpre com as condições impostas, não só no parâmetro relativo à flecha bem como à tensão de flexão máxima, portanto, é mais do que suficiente a sua aplicação em estruturas com este nível de solicitação.

Para complementar as verificações efectuadas, iremos considerar que, acidentalmente, uma pessoa se apoia totalmente sobre a estrutura a meio-vão do perfil testado, e verificar qual o comportamento da mesma, considerando que a pessoa pesa 150 kg, $\approx 1500 \text{ N}$.

- Flecha do perfil devido à carga existente, em que F é a soma das três cargas concentradas equidistantes (caso 3 – nós 2, 3 e 4), acrescida do peso da pessoa e L o comprimento do perfil;

$$F = 343,5 + 1500 = 1843,5 \text{ N} ; L = 2000 \text{ m}$$

$$f = \frac{F \times L^3}{192E \times I \times 10^4} = \frac{1843,5 \times 2000^3}{192 \times 70000 \times 14 \times 10^4} = 7,838 \text{ mm}$$

- Flecha do perfil devida ao peso próprio:

$$f = \frac{m' \times g \times L^4}{384E \times I \times 10^4} = \frac{(2/1000) \times 10 \times 2000^4}{384 \times 70000 \times 14 \times 10^4} = 8,503 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Somando as flechas teremos:

$$f_{total} = 7,838 + 8,503 \times 10^{-2} = 7,923 \text{ mm}$$

Mantendo o mesmo pré-requisito da flecha 0,5% usado no cálculo da página anterior, obtem-se um coeficiente de segurança de:

$$cs = 10 \text{ mm} / 7,923 \text{ mm} = 1,262$$

Muito embora o factor de segurança determinado seja inferior ao desejado, deverá no entanto notar-se que o mesmo corresponde a uma situação acidental/pontual, não sendo portanto preocupante.

- Iremos proceder ao controle da tensão de flexão máxima, sendo considerado um coeficiente de segurança de 2, para evitar a deformação por fluência.

$$\sigma_{b \max} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{8W \times 10^3} = \frac{(2/1000 \times 10 \times 2000 + 1843,5) \times 2000}{8 \times 6,1 \times 10^3}$$

$$\sigma_{b \max} = 77,193 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bzul.} = \frac{R_{p0,2}}{S_{F \text{ erf.}}} = 195 \text{ MPa} / 2 = 97,50 \text{ MPa}$$

- Pelo critério da Bosch Rexroth a

$$\sigma_{b \max} < \sigma_{bzul.} \rightarrow 77,193 \text{ MPa} < 97,50 \text{ MPa}$$

portanto o perfil cumpre com o critério estabelecido. Neste requisito consegue-se um coeficiente de segurança adicional de:

$$cs = \frac{97,50 \text{ MPa}}{77,193 \text{ MPa}} = 1,263$$

- Mesmo que, acidentalmente, o perfil seja obrigado a suportar o peso de uma pessoa sem existir alterações estruturais significativas, verifica-se que o mesmo se encontra dentro dos limites estabelecidos pelo critério da Bosch Rexroth.

3.3.2.4. Escolha de ligações entre perfis

Em função dos valores obtidos, na análise das reacções nos apoios do capítulo anterior, iremos proceder à escolha das ligações entre perfis, disponíveis no catálogo BOSCH, anexo II. A figura seguinte possibilita uma rápida localização das principais ligações existentes na estrutura. Umas necessitam de apurados critérios de selecção, enquanto outras, por não serem submetidas a grande esforços, não necessitam do mesmo cuidado.

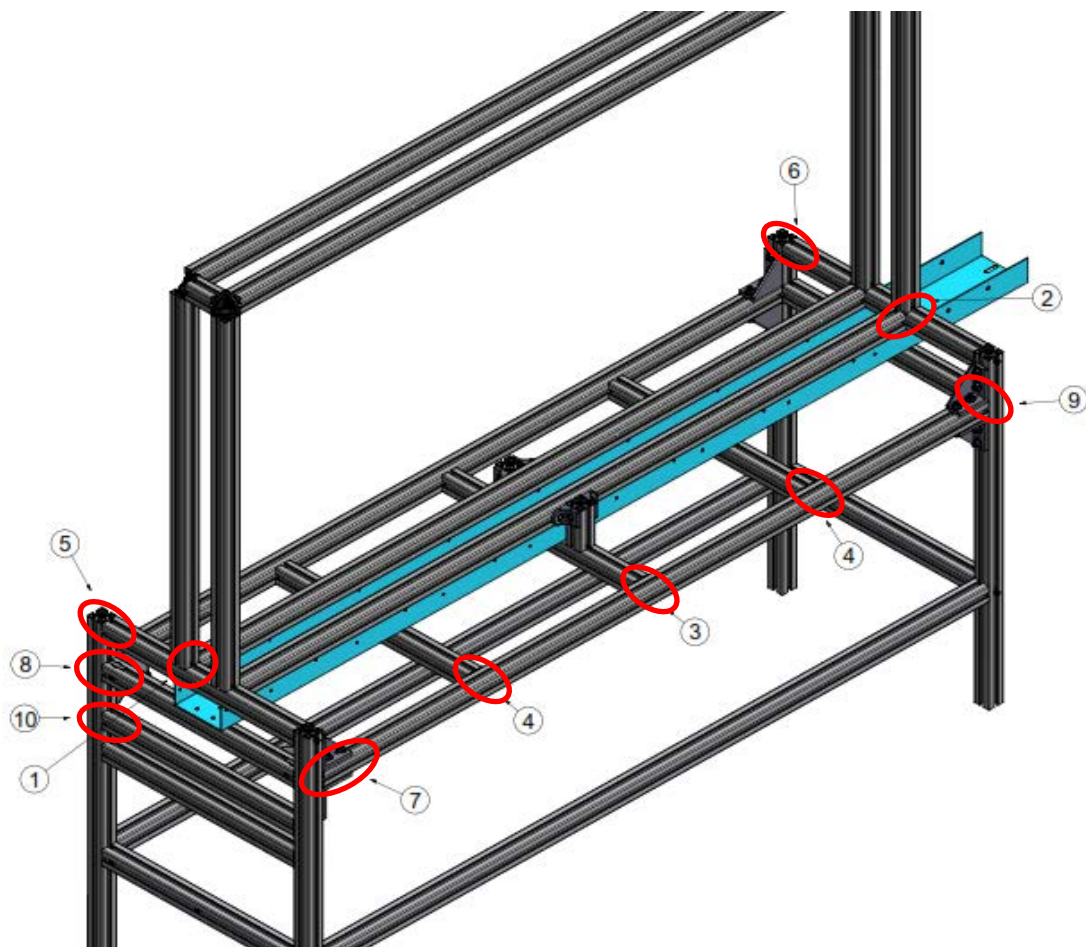
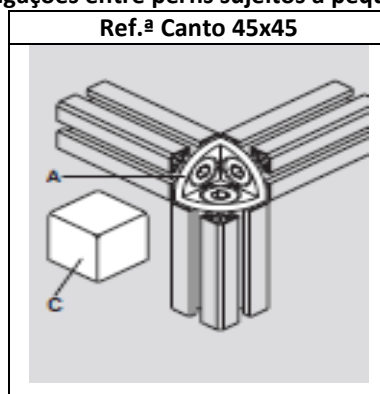


Figura 61 - Localização das ligações entre perfis

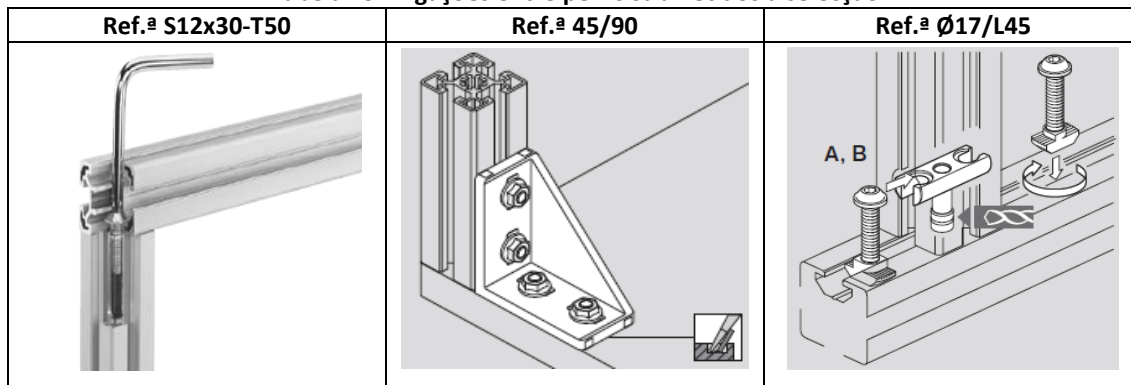
Nas ligações entre perfis que não são submetidas a grandes esforços, foram utilizadas ligações básicas que constam da seguinte tabela:

Tabela 18 - Ligações entre perfis sujeitos a pequenos esforços



Segue-se a tabela com as figuras das ligações entre perfis que foram objecto de critérios de selecção.

Tabela 19 - Ligações entre perfis submetidos a selecção



Na escolha de cada ligação, foi tida em conta a análise das reacções nos apoios respeitante à ligação em causa e a geometria da mesma. Uma vez seleccionada a ligação que assegura eficazmente a sua função, foi quantificada a necessidade da mesma na estrutura e determinado o coeficiente de segurança daí resultante.

Ligação 1, horizontal

Este será o elemento de ligação entre o perfil transversal superior do lado esquerdo (Figura 38-5), zona central e o perfil longitudinal interior (Figura 38-1), extremidade esquerda.

Esquema em análise: caso 1 – apoio 1.

Esforços impostos: $V = 245 \text{ N}$ e $M_f = 9,40 \text{ Nm}$.

Ligação escolhida: S12x30-T50, pág. 3 -30 [1].

Quantidade: 2 unidades.

Tabela 20 – Ligação 1, horizontal, parâmetros de selecção

Ligação 1	Esforço cortante [N]	Momento flector [Nm]
Esforços impostos	245	9,40
Ligação escolhida	1300	80
Coeficiente de segurança	≈ 5,31	≈ 8,51

Ligação 2, horizontal

Esta ligação é idêntica à ligação anterior. As diferenças existentes, residem no posicionamento da ligação, que neste caso é na extremidade direita do perfil longitudinal interior (Figura 38-1) e nos valores das reacções.

Esquema em análise: caso 1 – apoio 3.

Esforços impostos: $V = 145 \text{ N}$ e $M_f = 17,50 \text{ Nm}$.

Ligação escolhida: S12x30-T50, pág. 3 -30 [1].

Quantidade: 2 unidades.

Tabela 21 - Ligação 2, horizontal, parâmetros de selecção

Ligação 2	Esforço cortante [N]	Momento flector [Nm]
Esforços impostos	145	17,50
Ligação escolhida	1300	80
Coefficiente de segurança	$\approx 9,97$	$\approx 4,57$

Ligação 1 e 2, verticais

Elemento de ligação entre os perfis transversais superiores, direito e esquerdo (Figura 38-4 e 5), zona central e os perfis verticais de ambos lados do armazém das pré-formas.

Esquema em análise: não possui.

Esforços impostos: esta ligação não supera o esforço da sua ligação horizontal que é de 245 N (caso 1 – apoio 1), porque a ligação em causa pretende apenas manter a estrutura na vertical, uma vez que não existe qualquer tipo de esforço adicional em condições normais de funcionamento. Contudo, na eventualidade de uma anomalia, esta suporta à sua conta uma carga de 40 N, que correspondem ao peso do perfil vertical (20 N), acrescido de metade do peso do perfil horizontal superior ($40 \text{ N}/2$) do armazém das pré-formas, porque este se encontra apoiado nas suas extremidades aos perfis verticais. Temos então de acrescentar um momento provocado pelo sistema de tracção que é de 8,10 Nm. Tendo em conta os pressupostos atrás mencionados, a ligação escolhida é a mesma utilizada nas ligações anteriores.

Ligação escolhida: S12, pág. 3 – 30 [1].

Quantidade: 4 unidades.

Tabela 22 - Ligação 1 e 2, verticais, parâmetros de selecção

Ligação 1 e 2, verticais	Esforço cortante [N]	Momento flector [Nm]
Esforços impostos	40	8,10
Ligação escolhida	1300	80
Coeficiente de segurança	≈ 32,50	≈ 9,88

Ligação 3

Elemento de ligação entre o perfil longitudinal exterior (Figura 38-3), zona central e o perfil transversal central (Figura 38-9), extremidade direita.

Esquema em análise: caso 9 – apoio 3.

Esforços impostos,: $V = 190,30$ N; $M_f = 27,31$ Nm.

Ligação escolhida: S12x30-T50, pág. 3 – 30 [1].

Quantidade: 2 unidades.

Tabela 23 - Ligação 3, parâmetros de selecção

Ligação 3	Esforço cortante [N]	Momento flector [Nm]
Esforços impostos	190,30	27,31
Ligação escolhida	1300	80
Coeficiente de segurança	≈ 6,83	≈ 2,93 *

*Este valor na prática é muito superior, pois os valores de referência das ligações são dados em função do perfil sem apoio na extremidade oposta (Anexo II). Ora, como se pode verificar na figura 38-9, este perfil encontra-se apoiado em ambas as extremidades, portanto, este valor duplica, no mínimo.

Ligação 4

Elemento de ligação entre o perfil longitudinal exterior (Figura 38-3), a cerca de 1 m das suas extremidades e os perfis transversais intermédios (Figura 38-10), extremidade direita.

Esquema em análise: caso 10 – apoio 3.

Esforços impostos: $V = 85,30$ N; $M_f = 12,09$ Nm.

Ligação escolhida: S12x30-T50, pág. 3 – 30 [1].

Quantidade: 4 unidades.

Tabela 24 - Ligação 4, parâmetros de selecção

Ligação 4	Esforço cortante [N]	Momento flector [Nm]
Esforços impostos	85,30	12,09
Ligação escolhida	1300	80
Coeficiente de segurança	≈ 15,24	≈ 6,62 *

*Este valor na prática é muito superior, pois os valores de referência das ligações são dados em função do perfil sem apoio na extremidade oposta (Anexo II). Ora, como se pode verificar na figura 38-10, este perfil encontra-se apoiado em ambas as extremidades, portanto, este valor duplica, no mínimo.

Ligação 5

Elemento de ligação entre o perfil transversal superior esquerdo (Figura 38-5), extremidade esquerda e o perfil vertical da estrutura inferior, extremidade superior do mesmo lado.

Esquema em análise: caso 5 – apoio 1 e caso 1 – apoio 1.

Esforços impostos: $V = 128,30$ N e $M_f = 18,32$ Nm do caso 5 – apoio 1 e $M_f = 9,40$ Nm do caso 1 – apoio 1. Este momento flector situa-se na extremidade esquerda do perfil longitudinal interior (Figura 38-1), que se encontra ligado sensivelmente a meio do perfil transversal superior esquerdo (Figura 38-5), uma vez que as extremidades deste perfil estão encastradas, verifica-se um momento torsor de 4,70 Nm, que corresponde a metade do momento flector.

Ligação escolhida: S12x30-T50, pág. 3 – 30 [1].

Quantidade: 2 unidades.

Tabela 25 - Ligação 5, parâmetros de selecção

Ligação 5	Esforço cortante [N]	M flector [Nm]	M torsor [Nm]
Esforços impostos	128,30	18,32	4,70
Ligação escolhida	1300	80	35 *
Coef. de segurança	≈ 10,13	≈ 4,37	≈ 7,45

* A presente ligação não foi desenvolvida para suportar esforços de torção, pois trata-se de um parafuso. Contudo, o seu binário de aperto é bastante superior ao esforço de torção em causa, não existindo necessidade de utilizar ligações mais dispendiosas.

Ligação 6

Esta ligação é idêntica à ligação anterior, sendo que as diferenças existentes residem no posicionamento da ligação, que neste caso é do lado direito da estrutura e nos valores dos esforços.

Esquema em análise: caso 4 – apoio 1 e caso 1 – apoio 3.

Esforços impostos: $V = 78,30$ N e $M_f = 11,07$ Nm do caso 4 – apoio 1 e $M_f = 17,50$ Nm do caso 1 – apoio 3. Este momento flector situa-se na extremidade direita do perfil longitudinal interior (Figura 38-1), que se encontra ligado sensivelmente a meio do perfil transversal superior direito (Figura 38-4). Uma vez que as extremidades deste perfil estão encastradas, verifica-se um momento torsor de $8,75$ Nm, que corresponde a metade do momento flector.

Ligação escolhida: S12x30-T50, pág. 3 – 30 [1].

Quantidade: 2 unidades.

Tabela 26 - Ligação 6, parâmetros de selecção

Ligação 6	Esforço cortante [N]	M flector [Nm]	M torsor [Nm]
Esforços impostos	78,30	11,07	8,75
Ligação escolhida	1300	80	35 *
Coef. de segurança	≈ 16,60	≈ 7,23	4

* A presente ligação não foi desenvolvida para suportar esforços de torção, pois trata-se de um parafuso. Contudo, o seu binário de aperto é bastante superior ao esforço de torção em causa, não existindo necessidade de utilizar ligações mais dispendiosas.

Ligação 7

Elemento de ligação entre o perfil longitudinal exterior (Figura 38-3), extremidade esquerda e na zona superior do perfil vertical da estrutura inferior do mesmo lado.

Esquema em análise: caso 3 – apoio 1.

Esforços impostos: $V = 191,75$ N, $M_f = 82,60$ Nm e $M_t = 56,11$ Nm do caso 3 – apoio 1. Este momento torsor deve-se às cargas dos perfis transversais e do peso próprio dos mesmos, já calculado no caso 3.

Ligação escolhida: 45/90, pág. 3 – 15, duas unidades por ligação (a torção associada fica muito próxima do limite da ligação, razão pela qual são utilizadas duas unidades).

Quantidade: 8 unidades.

Tabela 27 - Ligação 7, parâmetros de selecção

Ligação 7	Esforço cortante [N]	M flector [Nm]	M torsor [Nm]
Esforços impostos	191,75 N	82,60	56,11
Ligação escolhida	6000 x 2	–	–
L. esc. à compressão	–	180 x 1	–
Lig. esc. à tracção	–	400 x 1	–
Lig. esc. à torção	–	–	60 x 2
Coef. de seg. global	≈62,58	≈7,02	≈ 2,14 *

* Este valor na prática é muito superior, pois os valores de referência das ligações são dados em função do perfil sem apoio na extremidade oposta (Anexo II). Ora, como se pode verificar na figura 38-3, este perfil tem apoio na extremidade oposta e ao longo do perfil, possuindo três apoios intermédios que o apoiam.

Ligação 8

Elemento de ligação entre o perfil transversal inferior esquerdo (Figura 38-6), extremidade esquerda e na zona superior do perfil vertical da estrutura inferior do mesmo lado.

Esquema em análise: caso 6 – apoio 1 e caso 2 – apoio 1.

Esforços impostos: $V = 187,50$ N e $M_f = 27,19$ Nm do caso 6 – apoio 1 e $M_f = 1,47$ Nm do caso 2 – apoio 1. Este momento flector situa-se na extremidade esquerda da calha quinada em U, que se encontra ligada sensivelmente a meio do perfil transversal inferior do sistema de tracção (Figura 38-6), uma vez que as extremidades deste perfil estão encastradas. Então, verifica-se um momento torsor de 0,74 Nm, que corresponde a metade do momento flector.

Ligação escolhida: $\emptyset 17/L45$, pág. 3 – 46 [1].

Quantidade: 2 unidades.

Tabela 28 - Ligação 8, parâmetros de selecção

Ligação 8	Esforço cortante [N]	M flector [Nm]	M torsor [Nm]
Esforços impostos	187,50	27,19	0,74
Ligação escolhida	4000	180	60
Coef. de segurança	≈ 21,33	≈ 6,62	≈ 81,08

Ligação 9

Esta ligação é idêntica à ligação anterior. As diferenças existentes residem no posicionamento da ligação, que neste caso é do lado direito (Figura 38-7) e nos valores dos esforços.

Esquema em análise: caso 7 – apoio 3 e caso 2 – apoio 5.

Esforços impostos: $V = 187,50$ N e $M_f = 27,19$ Nm do caso 7 – apoio 3 e $M_f = 1,12$ Nm do caso 2 – apoio 5. Este momento flector situa-se a 0,24 m da extremidade direita da calha quinada em U, que se encontra ligada sensivelmente a meio do perfil transversal direito, inferior (Figura 38-7). Uma vez que as extremidades deste perfil estão encastradas, verifica-se um momento torsor de 0,74 Nm, que corresponde a metade do momento flector.

Ligação escolhida: $\emptyset 17/L45$, pág. 3 – 46 [1].

Quantidade: 2 unidades.

Tabela 29 - Ligação 9, parâmetros de selecção

Ligação 9	Esforço cortante [N]	M flector [Nm]	M torsor [Nm]
Esforços impostos	187,50	27,19	0,56
Ligação escolhida	4000	180	60
Coef. de segurança	≈ 21,33	≈ 6,62	≈ 107,14

Ligação 10

Este elemento fará a ligação entre o perfil transversal esquerdo inferior, que serve de fixação ao moto-reductor (Figura 38-8), extremidade esquerda e zona superior do perfil vertical da estrutura inferior do mesmo lado.

Esquema em análise: caso 8 – apoio 1.

Esforços impostos: $V = 35,80\text{N}$, $M_f = 4,91\text{ Nm}$ do caso 8 – apoio 1 e $M_t = 4,08\text{ Nm}$ do caso 8. Este momento torsor deve-se ao moto-reductor que se encontra fixado sensivelmente a meio do perfil transversal e como as extremidades do perfil se encontram encastradas, estas mesmas encontram-se submetidas a metade do momento torsor existente que é de $2,04\text{ Nm}$.

Ligação escolhida: S12, pág. 3 – 30 [1].

Quantidade: 4 unidades.

Tabela 30 – Ligação 10, parâmetros de selecção

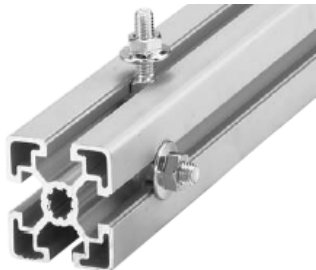
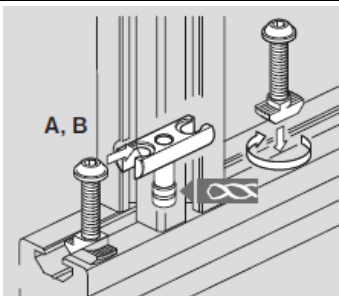
Ligação 10	Esforço cortante [N]	M flector [Nm]	M torsor em [Nm]
Esforços impostos	35,80	4,91	2,04
Ligação escolhida	1300	80	35 *
Coef. de segurança	$\approx 37,06$	$\approx 16,29$	$\approx 17,16$

* A presente ligação não foi desenvolvida para suportar esforços de torção, pois trata-se de um parafuso. Contudo, o seu binário de aperto é bastante superior ao esforço de torção em causa, não existindo necessidade de utilizar ligações mais dispendiosas.


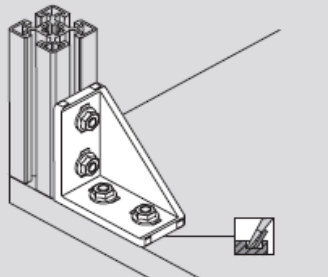
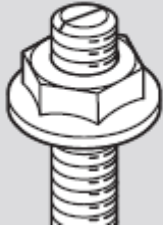
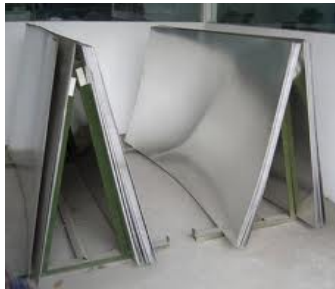

3.3.3. Listagem completa das peças e componentes do sistema projectado

Seguidamente é mostrada a tabela com todos os componentes referentes ao 1.º equipamento – alimentação de pré-formas.

Tabela 31 – Listagem dos componentes envolvidos na construção do 1º equipamento

Figura da peça ou componente	Referência	Função ou motivo da sua aplicação
	Perfil da Bosch Rexroth 45x45, ref.ª 3 842 990 520	Perfil usado na estrutura
	Ligação da Bosch Rexroth B - Ø17 - L=45 mm, ref.ª 3 842 500 921	Ligação entre perfis

	<p>Tira de perfil de aperto rápido da Bosch Rexroth, ref.ª 3 842 524 072</p>	<p>Fixação dos painéis acrílicos aos perfis</p>
	<p>Painéis de vidro acrílico (PMMA), com 5 mm de espessura, ref.ª Plexiglas G</p>	<p>Revestir o armazém de matérias-primas</p>
	<p>Parafuso auto-roscante, c/ cabeça de embutir Philips, em aço inox, ISO 7050 A2 PH 4,8 x 16 mm</p>	<p>Fixação dos painéis acrílicos aos perfis</p>
	<p>Ligação da Bosch Rexroth S12x30-T50 - D, ref.ª 3 842 530 236</p>	<p>Ligação entre perfis</p>
	<p>Ligação de canto da Bosch Rexroth 45x45 - A, ref.ª 3 842 530 236 Remate de canto da Bosch Rexroth 45x45 - C, ref.ª 3 842 517 291</p>	<p>Ligação entre perfis</p>
	<p>Calha com roletes da Manutan, ref.ª 801Y340 (2 m) e ref.ª 801Y344 (3 m)</p>	<p>Encaminha as pré-formas para o interior dos perfis</p>

	<p>Rodas articuladas com travão da Bosch Rexroth, ref.ª 3 842 515 367</p>	<p>Deslocamento da estrutura, que depois de alinhada fica travada.</p>
	<p>Esquadro da Bosch Rexroth 45/90, ref.ª 3 842 523 570</p>	<p>Ligação entre perfis</p>
	<p>Parafuso T da Bosch Rexroth C - M8 x 30, ref.ª 3 842 528 721</p>	<p>Aperto do esquadro ao perfil</p>
	<p>Fêmea flangeada da Bosch Rexroth B - M8, ref.ª 3 842 345 081</p>	<p>Aperto do esquadro ao perfil</p>
	<p>Chapa de aço inox AISI 304 com 2 mm de espessura, ref.ª Outokumpu 4301</p>	<p>Para quinagem em U, servindo de suporte às calhas de roletes</p>
	<p>Rebite ISO 15977 – 5 x 10 – Al/St - L</p>	<p>Fixação das calhas de roletes à chapa quinada em U, que encaminha as pré-formas</p>

	<p>Parafuso, com cabeça cilíndrica, sextavada interior em aço inox, ISO 4762 – M8 x 16 – A2-70</p>	<p>Fixação da chapa quinada em U à estrutura</p>
	<p>Varão roscado em aço inox, DIN 976 – M8 – A2 - 70</p>	<p>Apoio do sistema de transporte das pré-formas</p>
	<p>Fêmea sextavada flangeada em aço inox, DIN 6923 – M8 – A2-70</p>	<p>Aperto dos apoios do sistema de transporte</p>
	<p>Calço com 56 x 22 x 12 mm, em alumínio ref.ª AW2030-T4</p>	<p>Calço traseiro, para fixação do cilindro pneumático</p>
	<p>Cilindro pneumático Festo, ref.ª DNC-40-160-PPV-A</p>	<p>Desloca inicialmente as pré-formas para o rolo de tracção</p>
	<p>Fêmea sextavada em aço inox, ISO 4032 – M8 – A2-70</p>	<p>Fixação dos calços</p>

	<p>Parafuso, com cabeça cilíndrica, sextavado interior em aço inox, ISO 4762 – M8 x 25 – A2-70</p>	<p>Fixação dos calços</p>
	<p>Parafuso, com cabeça cilíndrica, sextavado interior em aço inox, ISO 4762 – M8 x 12 – A2-70</p>	<p>Fixação dos calços</p>
 <p>Ra</p>	<p>Varão de $\varnothing 42 \times 37$ mm em alumínio, ref.ª AW2030 - T4</p>	<p>Polia, transmissão de movimento do moto-reductor</p>
	<p>Rolamento rígido de esferas SKF, ref.ª 6205 – 2Z</p>	<p>Rolo de tracção</p>
	<p>Tarugo com $\varnothing 110 \times 117$ mm em alumínio, ref.ª AW2030-T4</p>	<p>Rolo de tracção, desloca as pré-formas</p>
	<p>Tarugo com $\varnothing 115 \times 45$ mm em alumínio, ref.ª AW2030-T4</p>	<p>Polia do sistema de tracção, que recebe através da correia plana o movimento do moto-reductor, fazendo rodar o rolo de tracção</p>

	<p>Parafuso, com cabeça cilíndrica, sextavado interior em aço inox, ISO 4762 – M8 x 40 – A2-70</p>	<p>Fixação do apoio inferior do sistema de tracção</p>
	<p>Parafuso, com cabeça cilíndrica, sextavado interior em aço inox, ISO 4762 – M10 x 55 – A2-70</p>	<p>Fixação da polia do sistema de tracção</p>
	<p>Batente de borracha nitrílica, com 70 x 15 x 3 mm, ref.^ª MGO G.1055</p>	<p>Amortecimento das vibrações do sistema de tracção</p>
	<p>Painéis de vidro acrílico (PMMA), com 3 mm de espessura, ref.^ª Plexiglas G</p>	<p>Protecção das partes móveis do sistema de tracção</p>
	<p>Dobradiças da Béné Inox, ref.^ª 232015</p>	<p>Abertura ou fecho, da protecção do sistema de tracção</p>
	<p>Varão de Ø10 x 7 mm em alumínio, ref.^ª AW2030-T4</p>	<p>Espaçador para a fixação das dobradiças</p>

	<p>Parafuso com cabeça de embutir, sextavado interior em aço inox, ISO 10642 – M3 x 12 – A2-70</p>	<p>Fixação das dobradiças</p>
	<p>Fêmea sextavada em aço inox, ISO 4032 – M3 – A2-70</p>	<p>Fixação das dobradiças</p>
	<p>Correia plana de transmissão da Italcor, com características de acordo com as especificações do cliente</p>	<p>Transmissão de movimento entre o moto-reductor e o rolo de tracção</p>
	<p>Perfil pultrudido da ALTO, ref.ª Alto 30x30x5</p>	<p>Sistema de ligação à feira do processamento de perfis</p>
	<p>Fêmea sextavada de espessura fina, em aço inox, DIN 439B – M8 – A2-70</p>	<p>Fixação da cantoneira em L, que serve de apoio à calha U com roletes, na extremidade junto à feira</p>
	<p>Ligação da Bosch Rexroth R40x43, ref.ª 3 842 518 424</p>	<p>Ligação entre perfis</p>

	<p>Conversor de frequência da SEW, série MOVITRAC 07 B, ref.^a MC07B0003-5A3-4-00</p>	<p>Varia a velocidade do motor-reductor</p>
	<p>Chapa de aço inox AISI 304 com 3 mm de espessura, ref.^a Outokumpu 4301</p>	<p>Para execução de blindagens para a parte inferior da estrutura</p>
	<p>Parafuso com cabeça sextavada em inox, DIN 933 – M6 x 14 – A4-70</p>	<p>Fixação das blindagens à estrutura</p>
	<p>Parafuso, com cabeça cilíndrica, sextavado interior em aço inox, ISO 4762 – M6 x 16 – A2-70</p>	<p>Fixação da calha quinada em U, à estrutura</p>
	<p>Fêmea sextavada flangeada em aço inox, DIN 6923 – M6 – A2-70</p>	<p>Fixação da blindagem do cilindro pneumático</p>
	<p>Parafuso, com cabeça cilíndrica, sextavado interior em aço inox, ISO 4762 – M6 x 10 – A2-70</p>	<p>Fixação da blindagem do cilindro pneumático</p>

	<p>Anilha plana DIN 125A – M6 – A2</p>	<p>Para fixação dos quadros Eldon</p>
	<p>Controlador de velocidade da Gislótica</p>	<p>Sincroniza a velocidade de processamento com a velocidade de introdução das pré-formas</p>
	<p>Quadro de comando para a pneumática, da Gislótica</p>	<p>Alberga os componentes de comando pneumático</p>
	<p>Quadro de controlo eléctrico, da Gislótica</p>	<p>Comporta os componentes destinados à protecção, controlo e comandos do sistema eléctrico</p>
	<p>Moto-reductor da SEW, versão com patas e veio, ref.ª R07DT56M4</p>	<p>Faz rodar o sistema de tracção</p>

3.3.3.1. Informação complementar

- É utilizado em toda a estrutura, o perfil Bosch da série 45, refª. 45x45, que é o mais indicado face às cargas existentes, atendendo aos requisitos técnicos que este mesmo apresenta. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo II, bem como os elementos de fixação entre perfis, que foram seleccionados em função dos esforços existentes.
- Será utilizado um moto-reductor, que faz rodar o sistema de tracção, as características técnicas podem ser verificadas no Anexo II.
- Será ainda utilizado um conversor de frequência, equipamento electrónico que ajusta a velocidade de alimentação das pré-formas com a velocidade do processo, ficando as mesmas sincronizadas. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo II.
- Para além disso o equipamento contará com um sistema de alimentação, que consiste em rolos de traccionamento que colocam as pré-formas na entrada da fieira. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo II.
- Sistema pneumático, que empurra na fase inicial as pré-formas em direcção aos rolos de traccionamento. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo II.
- Calhas com roletes, que auxiliam o deslocamento das pré-formas para a entrada da fieira. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo II.
- Quadro eléctrico, que comporta os mecanismos necessários para sincronizar a velocidade de introdução das pré-formas com a velocidade de processamento do perfil, sistemas que detectam a presença das pré-formas, pois em caso de falha provocam a paragem da produção do perfil. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo II.

3.4. Sistema de Pultrusão Híbrida tendo por base a alimentação contínua de resíduos

Como o processamento destes perfis é executado com matrizes termo endurecíveis, os desperdícios resultantes deste processo ou os perfis defeituosos, não podem ser reprocessados, sendo por isso enviados para aterro. Com o aumento das preocupações ambientais, os custos deste tipo de aterro são cada vez mais elevados, tornando o produto menos competitivo a nível comercial. Tendo como objectivo o aproveitamento dos resíduos provenientes dos perfis pultrudidos e dos perfis que eventualmente não estejam em conformidade, estes mesmos serão sujeitos a um processo de corte e de trituração, ficando com um formato granulado que, misturado com resina, é introduzido no interior do perfil pultrudido através de um dispositivo mecânico, preenchendo os espaços vazios existentes, sendo necessário prever que esse mesmo material não se esvai no início e fim do processo, sendo fornecido na quantidade correcta (caudal controlado). Conseguindo assim uma melhoria qualitativa dos perfis ao nível acústico, térmico e aumento do momento de inércia. Deste modo, consegue-se minimizar o problema da reciclagem dos resíduos provenientes dos perfis pultrudidos, e melhorar a sua competitividade comercial, melhorando ainda a qualidade dos perfis.

3.4.1. Requisitos iniciais

Para se proceder à produção deste tipo de perfis híbridos, torna-se necessária a criação de uma estrutura, robusta, facilmente manobrável, que seja dotada de meios para que possa ficar correctamente alinhada com a fieira, uma vez que a mesma se irá situar entre a tina de resina e a fieira de pultrusão. Na parte superior desta estrutura, será montado um depósito que irá receber os desperdícios triturados e que servirá de alimentação por gravidade, ao dispositivo que basicamente será um parafuso sem-fim, que assegura a introdução dos respectivos desperdícios, na forma granulada, nos espaços vazios no interior dos perfis pultrudidos. Este sistema de abastecimento, é accionado por um moto-redutor eléctrico, sendo este último controlado pelo PLC da pultrusora, para que haja controlo da compactação do material adicionado ao núcleo do perfil. A saída do sistema de alimentação conta com uma ligação flangeada, tipo joelho, que visa facilitar a limpeza e também reduzir o custo de futuros mandris, já que os torna mais simples de fabricar. A possibilidade de remoção do mandril ermite que a limpeza deste se torne mais fácil e que seja possível adaptar a geometria de saída à entrada pretendida para a fieira.

Ter-se-á em linha de conta, a simplicidade do novo equipamento, a facilidade de manutenção, quando se tornar necessário, e que os custos inerentes a este processo sejam os menores possíveis.

3.4.2. Anteprojecto das soluções preconizadas

Com base na necessidade evocada pela empresa ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., que assenta no conteúdo da secção anterior, e tendo como foco apenas o equipamento para a produção de perfis híbridos com base em desperdícios, foi elaborada uma lista de premissas a que o equipamento deveria obedecer (caderno de encargos), as quais serviram de base ao anteprojecto, conforme é seguidamente indicado:

- A estrutura deverá ser simples, prática e fiável, usando preferencialmente componentes normalizados;
- Integração completa e eficaz no processo produtivo existente, permitindo o acoplamento e desacoplamento fácil da nova estrutura;
- Facilidade no estabelecimento e realização das operações de manutenção;
- Os sistemas de comando deverão permitir uma completa compatibilidade entre o sistema já existente e a nova estrutura;
- O novo equipamento poderá dispor de energia eléctrica e ar comprimido, disponíveis nas instalações da empresa e já ligados ao equipamento principal;
- A estrutura deverá poder suportar os choques inevitáveis num sistema produtivo, onde se lidam com materiais volumosos e pesados;
- O acoplamento do novo equipamento deverá garantir que a alimentação dos desperdícios, irá processar-se de forma completamente alinhada com a feira instalada no equipamento principal;
- O novo equipamento deverá permitir o armazenamento de uma quantidade apreciável de desperdícios, evitando que o equipamento esteja continuamente a necessitar de ser alimentado. A tremonha deverá ter uma espia para verificação da necessidade de realimentação;
- Este armazém de matéria-prima deverá possuir uma indicação visual, para permitir que os colaboradores vão analisando a necessidade de alimentação do equipamento com matéria-prima;

- O motor de acionamento deverá possuir a protecção eléctrica necessária para que não se verifique qualquer acidente com ignição da resina e respectiva inflamação da mesma (protecção ATEX);
- O equipamento de alimentação dos resíduos deverá permitir o refluxo de desperdícios, quando se verificar uma paragem ou encravamento do fluxo de resíduos;
- Apesar de algumas restrições existentes devido à necessidade de acoplamento entre os dois equipamentos, deverão ser salvaguardados todos os aspectos de ergonomia possíveis, por forma a minimizar esforços desnecessários e a evitar eventuais doenças profissionais;
- Custo reduzido em todas as vertentes, componentes e fabricação.

Com base nestas premissas, começaram por ser elaborados os primeiros esboços, dos quais se dá conta nas figuras que seguidamente são mostradas.

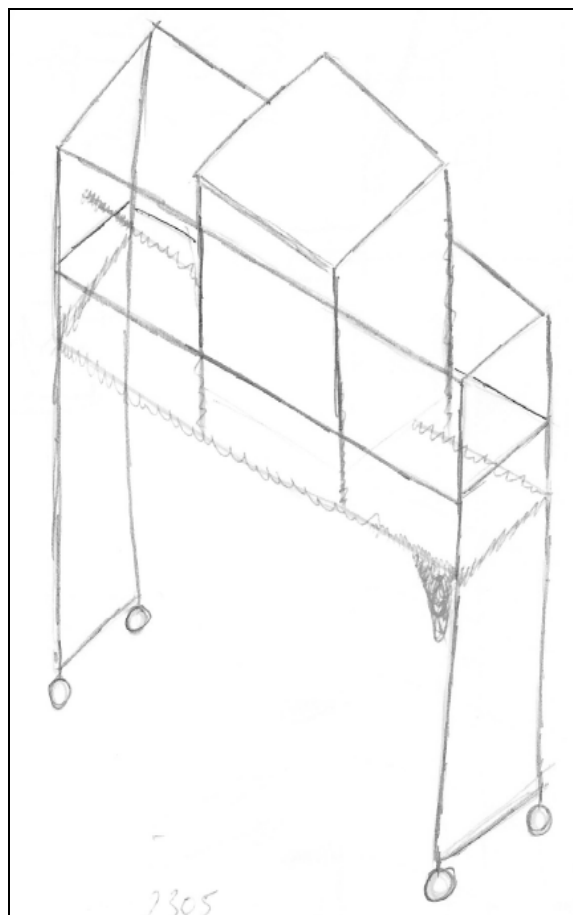


Figura 62 - Esboço inicial da estrutura 2 (1)

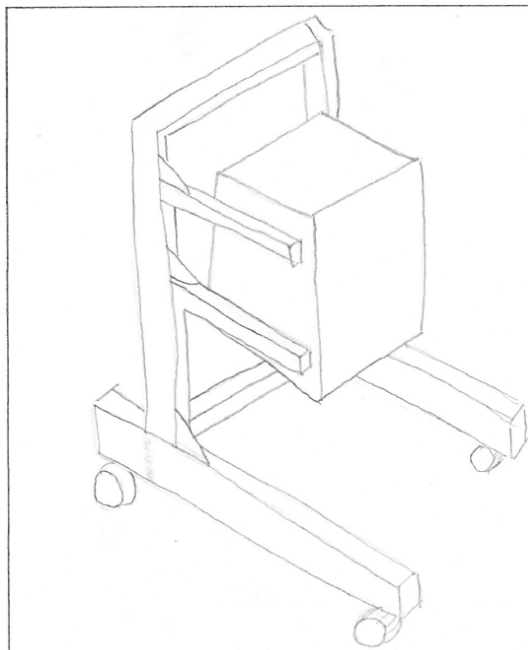


Figura 63 - Esboço inicial da estrutura 2 (2)

Os esboços mostrados resultam de um processo iterativo de elaboração → discussão → alteração → apresentação de nova proposta. O processo evoluiu de uma forma conjunta e, depois de todas as iterações, o conjunto seleccionado adoptou a forma seguinte:

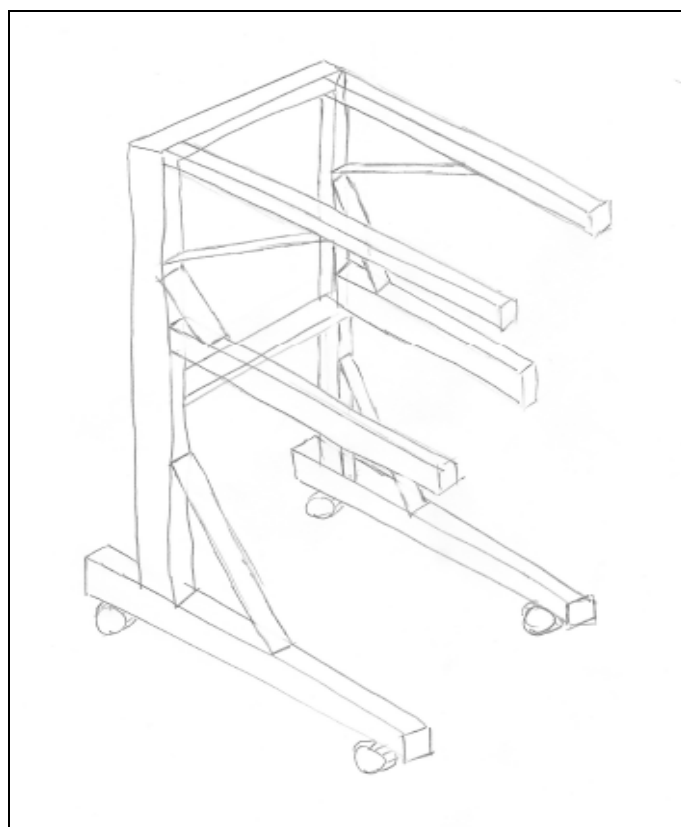


Figura 64 - Esboço final da estrutura 2

Foi com base no esboço mostrado na figura anterior, que mereceu a aprovação da empresa, que o projecto se veio a desenvolver, conforme será seguidamente referido.

3.4.3. Projecto e cálculo das soluções preconizadas

Tendo em consideração as premissas anteriormente listadas, teremos ainda que considerar o efeito do peso próprio e de eventuais solicitações externas.

Como abordagem geral ao projecto, foi considerado um perfil, normalmente aplicado pela empresa em outras situações e do qual havia 'stock', como base de trabalho. Foi estudado o efeito das solicitações sobre esses perfis, de forma a permitir a análise das deformações (flechas) impostas à estrutura, tendo por base o desenho inicial. No caso de se verificar que as deformações viessem a ser superiores ao admissível, seria equacionada uma das seguintes vias:

- Adopção de um perfil mais robusto;
- Resedinho da estrutura, por forma a incrementar a sua rigidez, caso este reforço fosse de encontro às necessidades detectadas.

Para facilitar a percepção do projecto e os cálculos que iremos efectuar, o mesmo assumirá a configuração presente na figura seguinte:

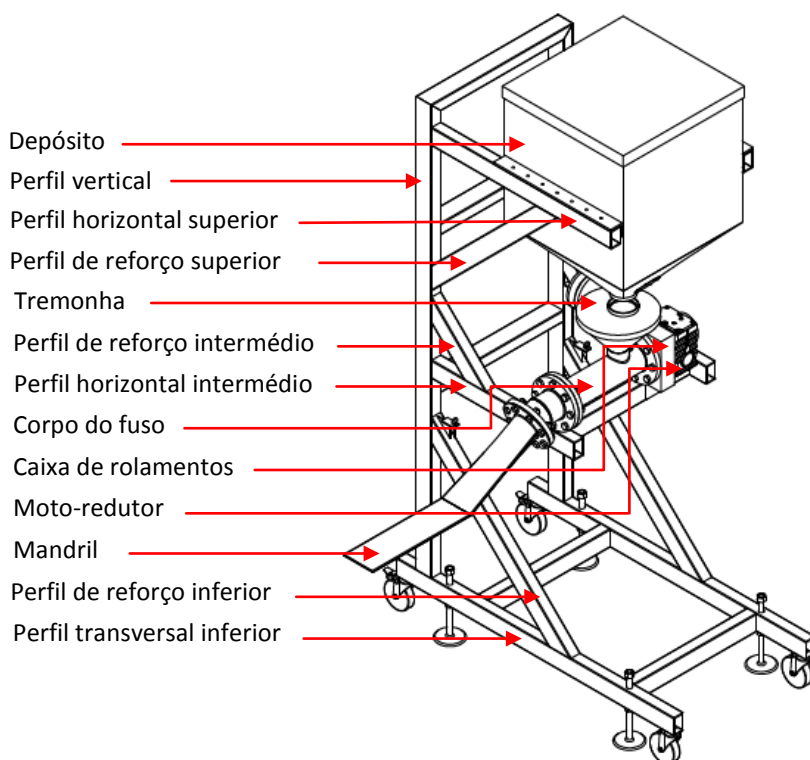


Figura 65 - Vista geral da estrutura

Tendo em conta que a estrutura basicamente é simétrica em torno de um plano vertical, com o intuito de simplificar a análise que irá ser efectuada, dividimos a estrutura em partes esquerda e direita. Iremos considerar para efeitos de cálculo o lado que se encontrar mais sobrecarregado, neste caso o lado direito, apesar de haver uma igualdade de cargas aplicadas nos perfis horizontais superiores e inferiores, o mesmo não acontece com os perfis horizontais intermédios, pois o perfil do lado direito, suporta na totalidade o peso do moto-reductor e, simplificando, mais metade do peso de toda a estrutura e sistemas a ela agregados.

3.4.3.1. Esforços aplicados à estrutura

Atendendo a que a matéria-prima a utilizar, não terá nesta fase o seu peso específico perfeitamente caracterizado, devido ao facto de haver necessidade de ajustar o dimensionamento da sua granulometria em função da colmatação pretendida, considera-se que o contentor cheio pesará cerca de 100 kg. O referido depósito, juntamente com os perfis pultrudidos de 0,610 m de comprimento, são o elo de ligação aos perfis horizontais superiores, pesando cerca de 24 kg (Anexo IV). Uma vez que estas cargas se encontram distribuídas de igual modo pelos dois perfis superiores, teremos que considerar para efeitos de cálculo, metade da carga. Assim sendo teremos uma carga distribuída de:

$$\text{Carga distribuída} = (1240 \text{ N}/2) \div 0,610 \text{ m} = 1016,393 \text{ N/m}$$

No perfil horizontal intermédio direito, como já foi atrás mencionado, é o que está sujeito a maiores cargas, que resultam do peso do moto-reductor (44 kg) e metade do peso do sistema constituído pela tremonha, pelo conjunto que envolve a compactação (47 kg) e matéria-prima que se considera ser 15 kg (Anexo VI), perfazendo um peso total de 62 kg. Pelo facto da fixação destes componentes ser por patas, consideram-se cargas concentradas. O valor a considerar para efeitos de cálculo é o seguinte:

$$\text{Carga concentrada} = (620 \text{ N}/2) + 440 \text{ N} = 750 \text{ N}$$

Temos um momento provocado pelo corpo do mandril, mas as cargas inerentes não são relevantes relativamente à estrutura, portanto, não será considerado qualquer esforço para efeitos de validação do tubo em análise.

Considera-se o peso próprio dos perfis 9,21 kg/m (Anexo V) que intervêm na estrutura seleccionada. A saber temos os seguintes perfis:

- Perfil horizontal superior
- Perfil de reforço superior
- Perfil horizontal intermédio
- Perfil de reforço intermédio
- Perfil horizontal inferior
- Perfil de reforço inferior
- Perfil vertical, uma vez que o seu peso se encontra no eixo axial. Neste caso é considerada uma carga concentrada de 193,41 N (2,10 m x 92,1 N/m).

A apresentação dos gráficos faz-se pela vista lateral da parte direita da estrutura, que foi seleccionada anteriormente, e que teve por critério a sobrecarga da mesma.

Face às cargas anteriormente calculadas, resultou nos seguintes diagramas de esforços:

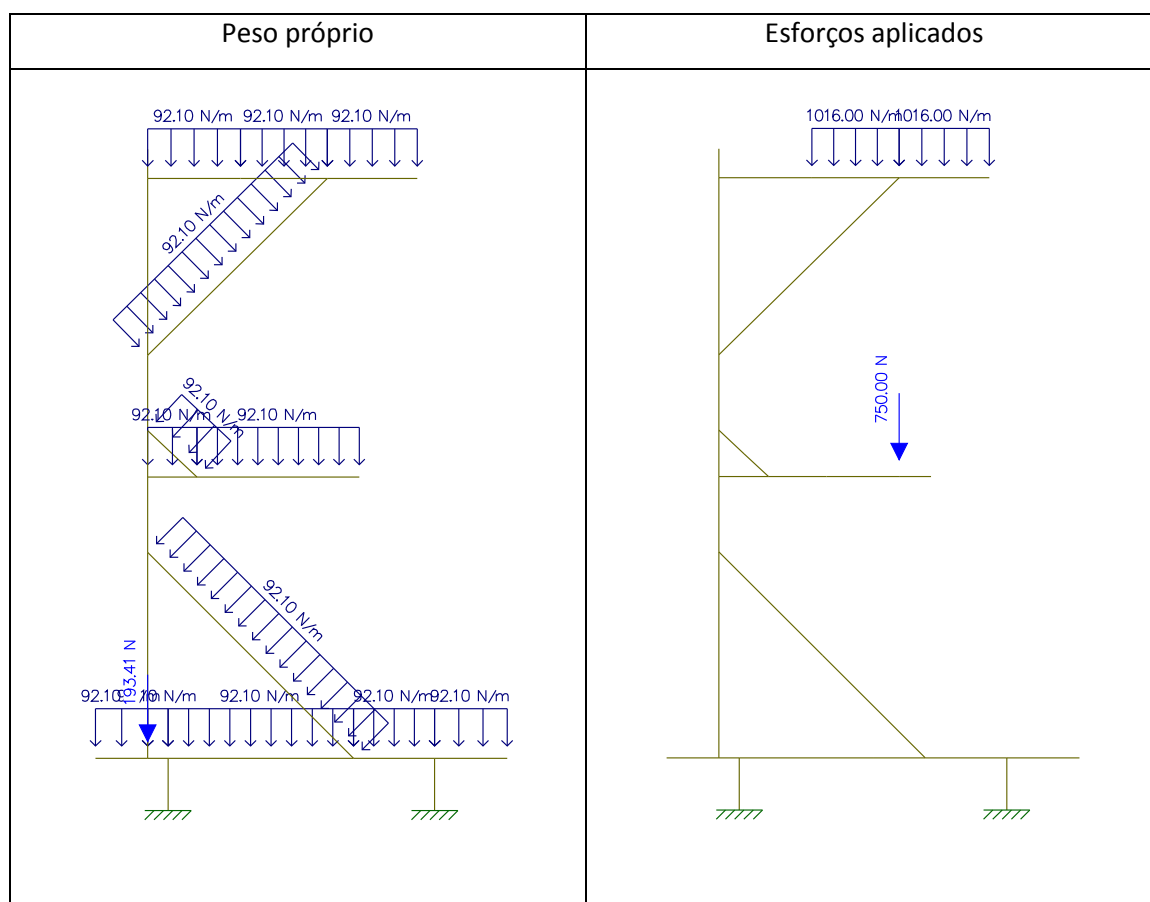


Figura 66 – Esforços devidos ao peso próprio e esforços aplicados

Esforços aplicados e peso próprio	Valores nominais
	<p>Peso próprio do tubo rectangular 9,21 kg/m, o qual corresponde a cerca de 92,1 N/m.</p> <p>Tubo da vertical corresponde a uma carga de 193,41 N.</p> <p>Carga de matéria-prima do depósito, acrescida do peso próprio é cerca de 1108 N/m (1016 N/m + 92,10 N/m).</p> <p>Carga do moto-reductor e conjunto do sistema motriz é cerca de 750 N.</p>

Figura 67 – Estrutura com as cargas aplicadas e seus valores

Esforços axiais	Valor máximo
	<p>O esforço axial máximo é de -2264,64 N, encontrando-se na parte inicial do perfil horizontal intermédio e está à compressão, conforme o sinal indica.</p>

Figura 68 – Esforços axiais na estrutura e o máximo valor verificado

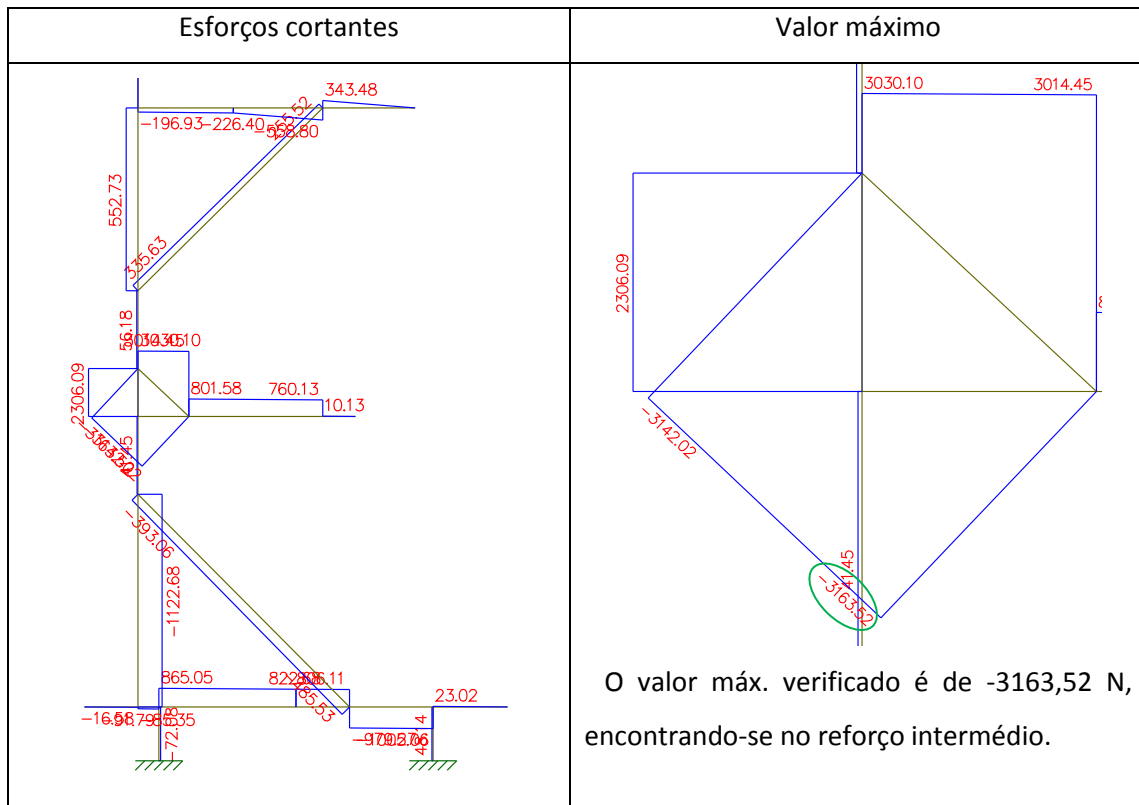


Figura 69 – Esforços cortantes na estrutura e o máximo valor verificado

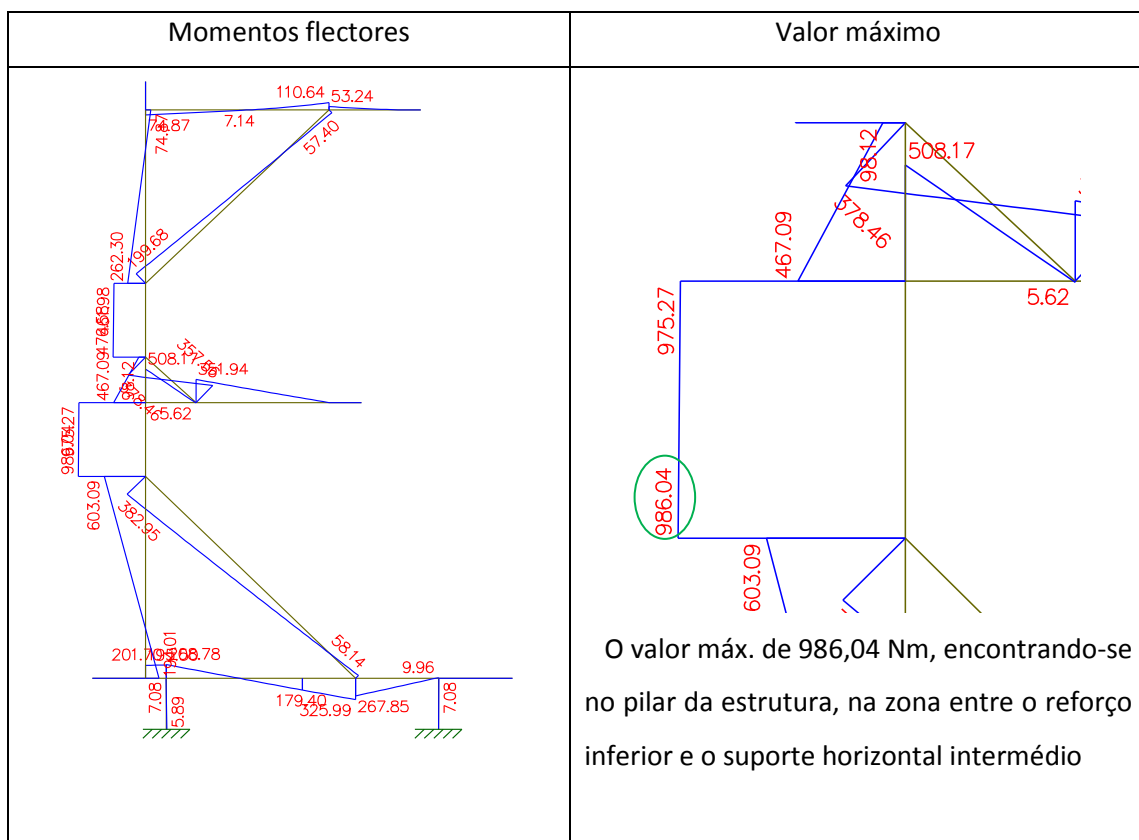


Figura 70 – Momentos flectores na estrutura e o máximo valor verificado

Deslocamentos nodais	Valores máximos
	<p>Nó 1</p> <p>$D_x = 3,17 \text{ mm}$ $D_y = -1,122 \times 10^{-3} \text{ mm}$ $R_z = -3,002 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>
	<p>Nó 2</p> <p>$D_x = 3,172 \text{ mm}$ $D_y = -2,772 \text{ mm}$ $R_z = -3,027 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>
	<p>Nó 3</p> <p>$D_x = 0,41 \text{ mm}$ $D_y = -1,723 \times 10^{-3} \text{ mm}$ $R_z = -1,923 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>
	<p>Nó 4</p> <p>$D_x = 0,409 \text{ mm}$ $D_y = -1,699 \text{ mm}$ $R_z = -2,506 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>

Figura 71 – Reações nos pés de apoio e deslocamentos nodais

Na estrutura, foram verificados os seguintes valores máximos:

- -2264,64 N, esforço axial à compressão;
- -3163,52 N, esforço cortante, sentido negativo;
- 986,04 Nm, momento flector.

Deslocamentos nodais:

- Nó 1 - $D_x = 3,17 \text{ mm}$; $D_y = -1,122 \times 10^{-3} \text{ mm}$; $R_z = -3,002 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- Nó 2 - $D_x = 3,172 \text{ mm}$; $D_y = -2,772 \text{ mm}$; $R_z = -3,027 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- Nó 3 - $D_x = 0,41 \text{ mm}$; $D_y = -1,723 \times 10^{-3} \text{ mm}$; $R_z = -1,923 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- Nó 4 - $D_x = 0,409 \text{ mm}$; $D_y = -1,699 \text{ mm}$; $R_z = -2,506 \times 10^{-3} \text{ rad}$

Nos pés de apoio verificaram-se os seguintes valores:

Apoio 1 – Esforço axial 956,85 N

Esforço de corte 72,08 N

Momento flector 5,89 Nm

Apoio 2 – Esforço axial, 1028,08 N

Esforço de corte, 48,14 N

Momento flector 1,59 Nm

Após analisados os esforços na estrutura, verificámos que os valores máximos obtidos se situam na zona central da mesma, mais concretamente na zona do perfil vertical que liga ao perfil horizontal intermédio e o respectivo reforço. Iremos determinar os valores das tensões a que o perfil estará sujeito nas zonas atrás referenciadas, e verificar a validação dos mesmos.

As características técnicas do tubo rectangular 80x50x5 mm, laminado a quente S355 J2 H, e que constam do Anexo V, são as seguintes:

Tubo rectangular 80 × 50 × 5; $y = 80/2 = 40 \text{ mm}$; $m = 9,21 \text{ kg/m}$

$I_y = 94,36 \text{ cm}^4$; $I_z = 44,13 \text{ cm}^4$; $W_{el,y} = 23,59 \text{ cm}^3$; $W_{el,z} = 17,65 \text{ cm}^3$

$E = 210000 \text{ MPa}$; $R_{p0,2} = 355 \text{ MPa}$; $R_m = 510 - 680 \text{ MPa}$; $A = 11,73 \text{ cm}^2$

- Sabendo que a tensão de cedência é de 355 MPa e o factor de segurança implícito para este tipo de estrutura é 1.5, os mesmos correspondem a uma tensão admissível de:

$$\sigma_{adm} = \sigma_{ced} / CS = 355 \text{ MPa} / 1,5 = 236,67 \text{ MPa}$$

A tensão instalada equivale à soma da tensão de flexão, acrescida da tensão normal da zona do perfil em análise. O momento máximo verificado é de 986,04 Nm, o que corresponde a um esforço axial de 1595,34 N, tendo então uma tensão instalada de:

$$\sigma_f = M_{\max} / \omega_f = 986,04 \times 10^3 / 23,59 \times 10^3 = 41,79 \cong 41,80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_N = F_N / A = 1595,34 / 11,73 \times 10^2 = 1,36 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{inst} = \sigma_f + \sigma_N = 41,80 + 1,36 = 43,16 \text{ MPa}$$

Em função do resultado, verifica-se que o perfil analisado cumpre com o critério de validação para a tensão admissível, que é:

$$\sigma_{inst} \leq \sigma_{adm} \rightarrow 43,16 \text{ MPa} \leq 236,67 \text{ MPa}$$

O factor de segurança será então:

$$cs = \frac{236,67 \text{ MPa}}{43,16 \text{ MPa}} = 5,48$$

- Iremos agora efectuar a validação referente à tensão de corte. Como já foi atrás mencionado, o factor de segurança considerado é de 1.5, resultando numa tensão de corte admissível de:

$$\tau = 0,6\sigma_{csd} = 0,6 \times 355 \text{ MPa} = 213 \text{ MPa}$$

$$\tau_{adm} = \tau / cs = \frac{213 \text{ MPa}}{1,5} = 142 \text{ MPa}$$

A tensão de corte instalada é de:

$$\tau_{inst} = \frac{F_v}{A} = \frac{3163,52 \text{ N}}{11,73 \times 10^2 \text{ mm}^2} = 2,70 \text{ MPa}$$

Relativamente ao valor obtido, verifica-se que o perfil sujeito ao maior esforço de corte, cumpre com o critério estabelecido, resultando num factor de segurança de:

$$\tau_{inst} \leq \tau_{adm} \rightarrow 2,70 \text{ MPa} \leq 142 \text{ MPa}$$

$$cs = \frac{142 \text{ MPa}}{2,70 \text{ MPa}} = 52,60$$

- Reportando-se aos deslocamentos nodais, os que foram objecto de análise dizem respeito aos perfis que têm maior influência no processo produtivo, devido à necessidade da estrutura estar alinhada com o processo. Os nós 1 e 2, reportam-se às extremidades do perfil horizontal superior, respectivamente esquerda e direita, tendo em conta que a extremidade esquerda está soldada ao perfil vertical e os nós 3 e 4, correspondem às extremidades do perfil horizontal intermédio, respectivamente esquerda e direita e que a extremidade esquerda está soldada ao perfil vertical.
- Quanto às reacções nos apoios, os valores registados não são significativos, contudo iremos verificar o seu comportamento axial, pois foi a componente que apresenta valores mais elevados e como o peso da estrutura recai sobre o varão roscado M20, verificaremos se o maior valor registado é admissível.

Como se pode verificar pela *'data sheet'* dos pés de apoio (Anexo V), os mesmos suportam, com fêmea, cerca de 13000 N. Como o valor máximo registado foi de 1028,08 N, o que corresponde a um coeficiente de segurança de cerca 12,64, verifica-se que os mesmos são mais do que suficientes para o fim a que se destinam.

O perfil em causa cumpre por excesso com os requisitos que lhe são exigidos. É evidente que com perfis de menores dimensões e, portanto, com menores custos, se conseguiria executar a estrutura, dentro das normas em vigor. Contudo a nível empresarial, nem sempre são seguidas as orientações técnicas para a utilização de perfis adequados para executar uma determinada estrutura, pois existem condicionalismos que podem alterar esta aplicação/selecção, entre os quais:

- A existência de perfis idênticos em stock.
- Ao adquirir grandes quantidades do mesmo tipo de perfil, conseguem-se custos bastantes reduzidos. Poupança na aquisição em lotes mais generosos.
- Facilita na maioria das vezes, procedimentos produtivos com menores custos, pois a abordagem técnica perante determinadas situações são sistematizadas, porque foram adquiridos conhecimentos processuais, que permitem rápidas intervenções com a máxima eficiência.

Com a finalidade de aumentar a área da base de sustentação da estrutura, proporcionando assim uma melhor estabilidade, trocámos o posicionamento dos pés de apoio pelas rodas de movimentação e verificámos se o seu comportamento estrutural era melhorado com esta nova configuração. Face a esta nova abordagem foram obtidos os seguintes diagramas de esforços:

Estrutura com as cargas aplicadas	Valores nominais
	<p>Peso do tubo rectangular 9,21 kg/m o que corresponde a cerca de 92,1 N/m.</p> <p>Tubo da vertical corresponde a uma carga de 193,41 N.</p> <p>Esforço devido ao depósito e matéria-prima, mais peso próprio é cerca de 1108 N/m (1016 N/m + 92,10 N/m).</p> <p>Carga do moto-reductor e conjunto do sistema motriz é cerca de 750 N.</p>

Figura 72 – Estrutura com as cargas aplicadas e seus valores (pés afastados)

Esforços axiais	Valor máximo
	<p>O esforço axial máximo é -2264,64 N, encontra-se na parte inicial do suporte horizontal intermédio e está à compressão.</p>

Figura 73 – Esforços axiais na estrutura e o valor máximo verificado (pés afastados)

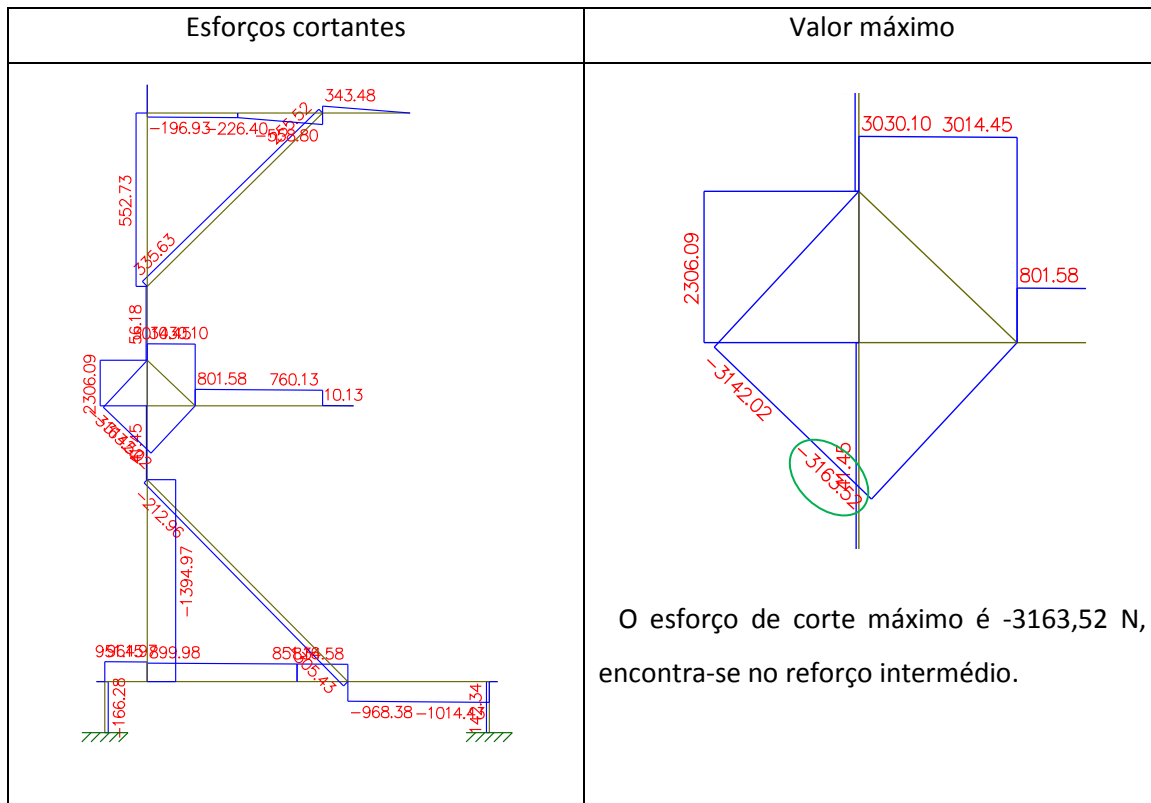


Figura 74 – Esforços cortantes na estrutura e o valor máximo verificado (pés afastados)

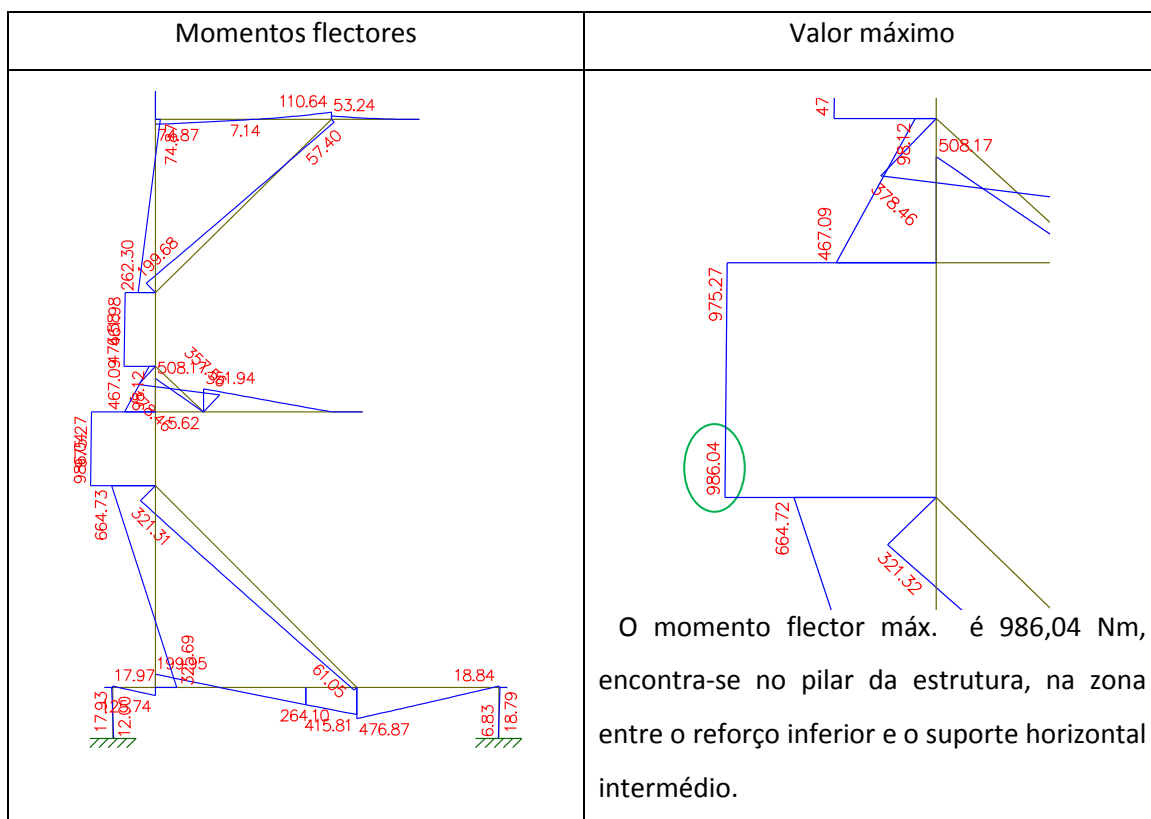


Figura 75 – Os momentos flectores na estrutura e o máximo valor verificado (pés afastados)

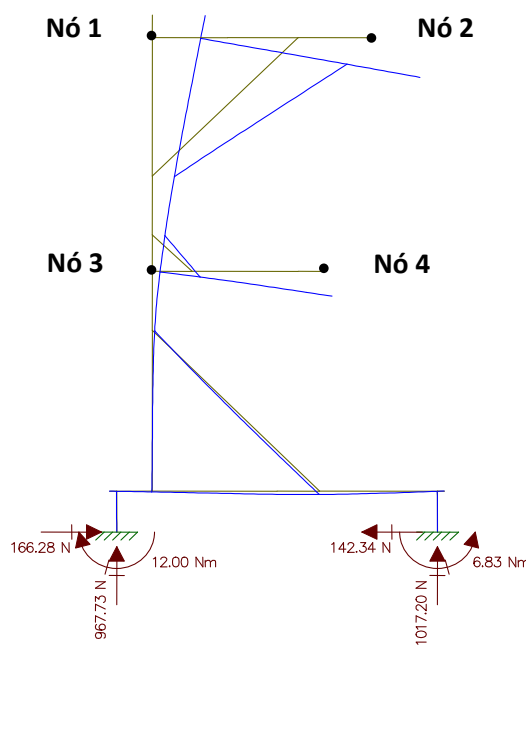
Deslocamentos nodais	Valores nominais
	<p>Nó 1</p> <p>$Dx = 3,503\text{mm}$</p> <p>$Dy = -5,013 \times 10^{-2} \text{ mm}$</p> <p>$Rz = -3,169 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>
	<p>Nó 2</p> <p>$Dx = 3,504 \text{ mm}$</p> <p>$Dy = -2,976 \text{ mm}$</p> <p>$Rz = -3,194 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>
	<p>Nó 3</p> <p>$Dx = 0,571 \text{ mm}$</p> <p>$Dy = -5,073 \times 10^{-2} \text{ mm}$</p> <p>$Rz = -2,089 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>
	<p>Nó 4</p> <p>$Dx = 0,569 \text{ mm}$</p> <p>$Dy = -1,870 \text{ mm}$</p> <p>$Rz = -2,673 \times 10^{-3} \text{ rad}$</p>

Figura 76 - Reações nos pés de apoio e deslocamentos nodais na estrutura (pés afastados)

Na estrutura com os pés afastados, foram verificados os seguintes valores máximos:

- -2264,64 N, esforço axial à compressão;
- -3163,52 N, esforço cortante, sentido negativo;
- 986,04 Nm, momento flector.

Deslocamentos nodais:

- Nó 1 - $Dx = 3,503 \text{ mm}$; $Dy = -5,013 \times 10^{-2} \text{ mm}$...; $Rz = -3,169 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- Nó 2 - $Dx = 3,504 \text{ mm}$; $Dy = -2,976 \text{ mm}$; $Rz = -3,194 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- Nó 3 - $Dx = 0,571 \text{ mm}$; $Dy = -5,073 \times 10^{-2} \text{ mm}$...; $Rz = -2,089 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- Nó 4 - $Dx = 0,569 \text{ mm}$; $Dy = -1,870 \text{ mm}$; $Rz = -2,673 \times 10^{-3} \text{ rad}$

Nos pés de apoio registaram-se os seguintes valores:

Apoio 1 – Esforço axial 967,63 N

Apoio 2 – Esforço axial 1017,20 N

Esforço de corte 166,28 N

Esforço de corte 14,23 N

Momento flector 12 Nm

Momento flector 6,83 Nm

Considera-se a estrutura com os pés normais como sendo a estrutura A e a estrutura com os pés afastados como sendo a estrutura B.

Com a alteração do posicionamento dos pés de apoio, verificou-se na estrutura B que a partir do ponto de encontro do perfil vertical com o reforço do perfil horizontal inferior, no sentido descendente, passaram a existir algumas diferenças ao nível dos esforços.

Verifica-se um ligeiro aumento nos esforços axiais, no perfil vertical e no reforço horizontal inferior. Quanto aos esforços cortantes, aumentaram ligeiramente no perfil vertical, baixando no perfil de reforço e aumentando no perfil horizontal inferior. Quanto aos momentos flectores, aumentaram no perfil vertical, baixaram no perfil de reforço e aumentaram no perfil horizontal inferior.

Partindo do mesmo ponto de encontro no sentido ascendente, verifica-se uma igualdade nos esforços existentes entre a estrutura A e a estrutura B.

Quanto aos valores máximos obtidos, na estrutura A e na estrutura B, verifica-se uma igualdade de valores e os mesmos localizam-se nas mesmas zonas dos perfis.

Relativamente às reacções nos apoios das estruturas, verificam-se os seguintes valores:

Tabela 32 – Reacções dos esforços nos apoios

Estrutura	Esforço	Apoio 1	Apoio 2
A	Axial	956,85 N	1028,08 N
	Corte	72,08 N	48,14 N
	Momento flector	5,89 Nm	1,59 Nm
B	Axial	967,63 N	1017,20 N
	Corte	166,28 N	14,23 N
	Momento flector	12 Nm	6,83 Nm

- Nos esforços axiais, não existem diferenças significativas entre os apoios da estrutura A e a estrutura B. Devido ao facto das estruturas se encontrarem submetidas às mesmas cargas, as reacções dos esforços axiais são iguais, apesar de existirem uma diferença de mais 10,78 N no apoio 1 da estrutura B, verifica-se no apoio 2 da mesma estrutura o inverso, menos 10,88 N, portanto valores idênticos.
- Quanto aos esforços de corte o mesmo não se poderá dizer relativamente à situação anterior, pois é maior o esforço de corte no apoio 1 da estrutura B, cerca de 94,2 N, verificando-se no apoio 2 da mesma estrutura uma diferença de menos 33,91 N.

- Respeitante aos momentos flectores, registam-se valores diminutos, contudo são ligeiramente superiores os momentos flectores da estrutura B, apoio 1 e 2.
- Porém, são nos deslocamentos nodais que se verificam as maiores diferenças, como se pode verificar na seguinte tabela:

Tabela 33 – Deslocamentos nodais

Deslocamentos nodais			
Nós	Estrutura B	Estrutura A	Diferenças
1	Dx = 3,503 mm Dy = $-5,013 \times 10^{-2}$ mm Rz = $-3,169 \times 10^{-3}$ rad	Dx = 3,170 mm Dy = $-1,122 \times 10^{-3}$ mm Rz = $-3,002 \times 10^{-3}$ rad	0,333 mm 0,049 mm $1,670 \times 10^{-4}$ rad
2	Dx = 3,504 mm Dy = -2,976 mm Rz = $-3,194 \times 10^{-3}$ rad	Dx = 3,172 mm Dy = -2,772 mm Rz = $-3,027 \times 10^{-3}$ rad	0,332 mm 0,204 mm $1,670 \times 10^{-4}$ rad
3	Dx = 0,571 mm Dy = $-5,073 \times 10^{-2}$ mm Rz = $-2,089 \times 10^{-3}$ rad	Dx = 0,411 mm Dy = $-1,723 \times 10^{-3}$ mm Rz = $-1,923 \times 10^{-3}$ rad	0,1608 mm 0,049 mm $1,660 \times 10^{-4}$ rad
4	Dx = 0,569 mm Dy = -1,870 mm Rz = $-2,673 \times 10^{-3}$ rad	Dx = 0,409 mm Dy = -1,699 mm Rz = $-2,506 \times 10^{-3}$ rad	0,1607 mm 0,171 mm $1,670 \times 10^{-3}$ rad

Verifica-se um aumento generalizado dos deslocamentos nodais na estrutura B, isto é apesar de termos aumentado a área da base de sustentação da estrutura, não significa melhorias estruturais, pelo contrário, neste caso é prejudicial para o desempenho do equipamento em causa, pois maior será o seu desalinhamento em relação ao equipamento principal, portanto iremos manter os pés de apoio na sua posição inicial.

Além dos cálculos efectuados, iremos proceder à verificação de alguns componentes mecânicos, que pertencem ao sistema motriz, tais como:

- A força de corte na cavilha elástica, órgão que fixa o fuso ao veio.
- Verificação do dimensionamento da chaveta do veio, órgão que acopla o veio ao moto-redutor.

- Verificação da carga dinâmica equivalente, quantificar a força axial que os rolamentos de rolos cónicos irão suportar, quando se verificar obstrução da matéria-prima no compartimento do fuso em processamento normal, isto é quando a matéria-prima compactada não sai no mandril.

Facto já abordado anteriormente, quanto à matéria-prima de não se encontrar nesta fase do projecto devidamente caracterizada. Considera-se que a mesma no interior do corpo do fuso numa situação crítica, o que corresponde à matéria-prima compactada que não sai no mandril, estará sujeita a uma $\sigma_{\max} = 0,25 \text{ kg/mm}^2$, cerca de $2,5 \text{ N/mm}^2$. Assim sendo, iremos determinar a força que o fuso irá exercer. A área efectiva do fuso corresponde ao seu diâmetro exterior, menos o diâmetro interior da alheta do fuso (Anexo IV, desenho n.º 3015)

$$A_{ef} = \frac{\pi \times (d_e^2 - d_i^2)}{4} = \frac{\pi \times (98^2 - 50^2)}{4} = 5579,468 \text{ mm}^2 \cong 5580 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A_{ef}} \rightarrow F = \sigma \times A_{ef} = 2,5 \text{ N/mm}^2 \times 5580 \text{ mm}^2 = 13950 \text{ N} = 13,95 \text{ kN}$$

O fuso exerce axialmente uma força de 13,95 kN. Como se trata de um esforço cortante sobre as cavilhas que fixam o fuso relativamente ao veio, iremos determinar se as cavilhas elásticas resistem a esta força. Perante o posicionamento das cavilhas, teremos de considerar quatro áreas resistentes, duas por cavilha (Anexo IV, Desenho n.º 3000).

Segundo as especificações técnicas da Wurth, tabela 10 (Anexo VI) a cavilha supracitada resiste a uma força de corte até 13 kN (corte singular), como temos um esforço cortante distribuído por quatro áreas resistentes, iremos ter um esforço de corte singular de:

$$13950 \text{ N} / 4_{\text{áreas}} \cong 3488 \text{ N}$$

Portanto, a cavilha é mais do que suficiente para o esforço de corte em causa, resultando um coeficiente de segurança de:

$$cs = 13000 \text{ N} / 3488 \text{ N} = 3,727$$

Poderemos, fazer esta verificação através da tensão de cedência do material usado. Como o material usado tem uma dureza de 420 HV (Anexo VI), corresponde a uma tensão de

cedência de 1013 MPa e a uma tensão de corte de 588 MPa (Anexo VI). A área resistente da cavilha é de:

$$A_{resistente} = \frac{\pi \times (d_g^2 - d_f^2)}{4} = \frac{\pi \times (6,4^2 - 3,9^2)}{4} = 20,224 \text{ mm}^2$$

O que resulta numa força de corte de:

$$\tau = \frac{F}{A_{resist}} \rightarrow F = \tau \times A_{resist} = 588 \text{ N/mm}^2 \times 20,224 \text{ mm}^2 \cong 11903 \text{ N}$$

Portanto o esforço de corte resultante da tensão de cedência do material é superior ao esforço de corte que a cavilha estará sujeita quando se encontrar numa situação crítica, verificando-se um coeficiente de segurança de:

$$cs = 11903 \text{ N} / 3488 \text{ N} = 3,413$$

A diferença existente entre os dois cálculos efectuados, reside essencialmente na exatidão da tensão de cedência do material usado na concepção da cavilha elástica, pois os fabricantes poderão manter a sua formulação, mas as percentagens dos elementos constituintes variam, bem como poderão existir variações processuais que irão influenciar os valores de referência.

Pelo facto de na extremidade do veio existir o acoplamento à força motriz e a mesma é feita por chaveta, iremos verificar se o tipo de aço usado no veio suporta o momento torsional instalado e se a chaveta se encontra devidamente dimensionada.

O veio é executado com aço C 220, tem uma dureza ≤ 250 HB, pela tabela (Anexo VI) corresponde a uma tensão de rotura de 820 N/mm² e uma tensão de cedência de 615 N/mm². O veio está sujeito ao momento tursor do redutor que é de 295 N/m (Anexo VI), através da fórmula do momento tursor (Juvenall e Marshek, 2012 – pp 731), iremos ter uma tensão de cedência admissível de:

$$M_t = \frac{\pi d^3}{16} \times (0,58 \sigma_{ced}) \rightarrow \sigma_{ced} = \frac{M_t \times 16}{\pi d^3 \times 0,58}$$

$$\sigma_{ced} = \frac{M_t \times 16}{\pi d^3 \times 0,58} = \frac{295 \times 10^3 \times 16}{\pi \times 35^3 \times 0,58} = 60,417 \text{ MPa} \cong 60 \text{ MPa}$$

Como o aço utilizado na concepção do veio tem uma tensão de cedência de 615 MPa, supera o valor da tensão de cedência admissível, resultando um coeficiente de segurança de:

$$cs = 615 \text{ MPa} / 60 \text{ MPa} = 10,25$$

Iremos verificar o dimensionamento da chaveta. Trata-se de uma chaveta em aço C45K com 10 x 8 x 90 mm (Anexo VI). A tensão de cedência do aço em questão é de 490 MPa, portanto superior à tensão de cedência instalada, contudo inferior à tensão de cedência do veio, o que resulta numa boa escolha porque se porventura existirem danos mecânicos a chaveta será o primeiro componente a ceder, mantendo o veio em perfeitas condições de funcionamento. Como se pode verificar pela 'data sheet' da chaveta (Anexo V), a relação entre o diâmetro do veio e a largura/altura/comprimento, encontra-se devidamente equacionada, pois para veios com $\varnothing > 30$ e $\varnothing \leq 38$ mm, a chaveta indicada é a 10 x 8 x 90 mm. Contudo podemos constatar, existem outros tipos de abordagens para este tipo de cálculo, por exemplo quanto ao comprimento deverá respeitar a condição de 1,8 vezes o diâmetro do veio (Juvenall e Marshek, 2012), que corresponde a 63 mm, como a chaveta tem 90 mm cumpre com a condição atrás mencionada.

Finalmente, iremos verificar as cargas dinâmicas e a força axial que os rolamentos em análise irão suportar, numa situação crítica, caso da obstrução da matéria-prima compactada no mandril, porque é nesta condição que se verificam as maiores solicitações no sentido axial do veio. Esta abordagem foi realizada segundo os conceitos da Rolamentos FAG Lda, através do seu catálogo WL 41 520/3 PB.

Foram selecionados rolamentos de rolos cónicos, ref^a. 32008 X/Q (Anexo VI), e a sua disposição no veio correspondem a uma montagem em "O". Este tipo de montagem é usado quando o ponto de aplicação da carga se afasta dos rolamentos. Os valores de referência correspondem a:

$$C = 52,8 \text{ kN} ; C_0 = 71 \text{ kN} ; e = 0,37 ; Y = 1,6 ; Y_0 = 0,9$$

Uma vez que os rolamentos são iguais, o valor de Y é comum a Y_A e a Y_B .

Iremos determinar a carga dinâmica (C_{par}), correspondente ao par de rolamentos (Anexo VI).

$$C_{par} = 1,715 \times C = 1,715 \times 52,8 \text{ kN} = 90,552 \text{ kN}$$

Este valor corresponde à carga dinâmica (C_{par}) que o par de rolamentos suporta sem danos. Prossegue-se com o cálculo da carga dinâmica equivalente (P), que o par de rolamentos montados em “O” irá suportar. Mas para isso teremos de calcular a força radial (F_r) e a força axial (F_a) que irão actuar no par de rolamentos.

A força radial (F_r), corresponde basicamente ao peso do veio (4,153 kg, cerca de 42 N), acrescido do peso do fuso (1,381 kg, cerca de 14 N), uma vez que o peso resultante recai radialmente sobre os rolamentos em análise, iremos determinar através do Ftool, quanto suporta radialmente cada rolamento. Relativamente ao veio, implica uma carga distribuída de cerca 67,5 N/m e ao fuso de cerca 35,5 N/m e os apoios A e B, correspondem aos rolamentos que se comportam como apoios encastrados.

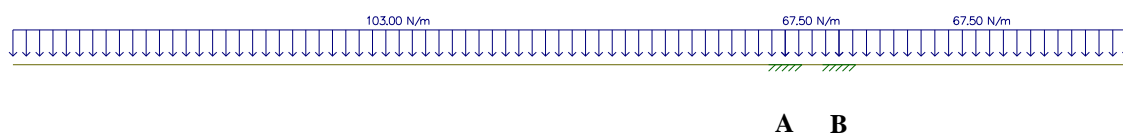


Figura 77 – Diagrama de esforços correspondente ao peso próprio do veio e do fuso

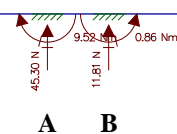


Figura 78 – Diagrama das reações que correspondem às cargas radiais aplicadas nos rolamentos A e B

No rolamento A, encontra-se aplicada uma força radial (F_{rA}) de 45,30 N.

No rolamento B, encontra-se aplicada uma força radial (F_{rB}) de 11,81 N.

A força radial (F_r) aplicada ao par de rolamentos é de 57,11 N (45,30 + 11,81).

A força que o fuso faz em caso de obstrução da matéria-prima, corresponde à força axial (F_a) aplicada ao par de rolamentos e o seu valor é de 13,95 kN, que já foi calculado anteriormente. Verificando a condição (Anexo VI) de:

$$\frac{F_a}{F_r} > e \rightarrow \frac{13950 \text{ N}}{57,11 \text{ N}} > 0,37 \rightarrow 244,265 > 0,37$$

Calcula-se agora a carga dinâmica equivalente através da seguinte fórmula:

$$P = 0,67 \times F_r + 1,68 \times Y \times F_a$$

$$P = 0,67 \times 57,11 \times 10^{-3} \text{ kN} + 1,68 \times 1,6 \times 13,95 \text{ kN} = 37,536 \text{ kN}$$

Quanto às cargas dinâmicas já calculadas, verifica-se que o par de rolamentos suporta os esforços provocados por uma situação crítica processual, com um coeficiente de segurança de:

$$cs = \frac{90,552 \text{ kN}}{37,536 \text{ kN}} = 2,412$$

Para melhor se compreender a abordagem que se efectua para o cálculo das forças axiais que os rolamentos suportam, foi adaptado um esquema representativo da situação e que está exposto na seguinte figura:

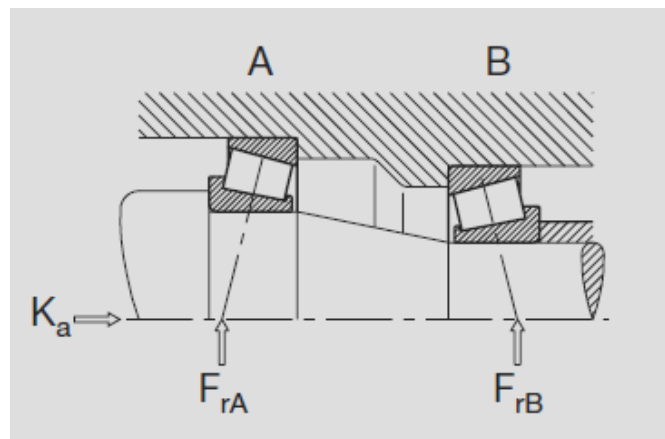


Figura 79 – Par de rolamentos de rolos cônicos, montados em “O” (Adaptado do catálogo da FAG, 2010)

Iremos determinar os esforços axiais que os rolamentos irão suportar (Anexo VI), mas para isso teremos de saber se cumprem com as condições de solicitação. Neste caso trata-se de um par de rolamentos de rolos cônicos, montados em “O” e a carga axial (K_a) externa tem o sentido da esquerda para a direita, situação idêntica ao da figura 79. As condições de solicitação a verificar para o rolamento A, são:

$$\frac{F_{rA}}{Y_A} > \frac{F_{rB}}{Y_B} \rightarrow \frac{45,30 \text{ N}}{1,6} > \frac{11,81 \text{ N}}{1,6} \rightarrow 28,313 \text{ N} > 7,381 \text{ N}$$

$$K_a > 0,5 \times \left(\frac{F_{rA}}{Y_A} - \frac{F_{rB}}{Y_B} \right) \rightarrow$$

$$13,95 \text{ kN} > 0,5 \times \left(\frac{45,30 \times 10^{-3} \text{ kN}}{1,6} - \frac{11,81 \times 10^{-3} \text{ kN}}{1,6} \right) \rightarrow$$

$$13,95 \text{ kN} > 0,0105 \text{ kN}$$

Portanto, verificam-se as duas condições de solitação, assim sendo para o cálculo da força axial no rolamento A (F_{aA}), teremos:

$$F_{aA} = K_a + 0,5 \times \frac{F_{rB}}{Y_B} = 13,95 \text{ kN} + 0,5 \times \frac{11,81 \times 10^{-3} \text{ kN}}{1,6} = 13,954 \text{ kN}$$

O rolamento A está sujeito a uma força axial de 13,954 kN. Em seguida, iremos verificar as condições de solitação para o rolamento B, no entanto a 1.ª condição é idêntica à do rolamento A, portanto não é necessário verificar novamente. A 2.ª condição é:

$$K_a \leq 0,5 \times \left(\frac{F_{rA}}{Y_A} - \frac{F_{rB}}{Y_B} \right) \rightarrow$$

$$13,95 \text{ kN} \leq 0,5 \times \left(\frac{45,30 \times 10^{-3} \text{ kN}}{1,6} - \frac{11,81 \times 10^{-3}}{1,6} \right) \rightarrow$$

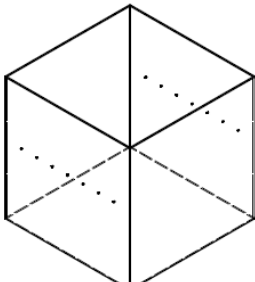
$$13,95 \text{ kN} \leq 0,0105 \text{ kN}$$

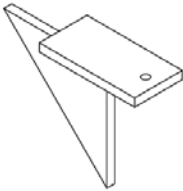
Logo, a 2.ª condição de solitação não se verifica, portanto não é possível calcular a força axial no rolamento B. É evidente que a 2.ª condição não se verifica, porque numa montagem com dois rolamentos, dispostos em “O”, só um dos rolamentos suporta a carga axial e radial e o outro suporta só a carga radial.

3.4.4. Listagem completa das peças e componentes do sistema projectado

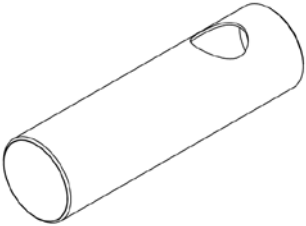
Seguidamente é mostrada a listagem de todos os componentes necessários à máquina.

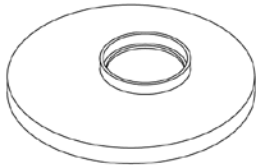
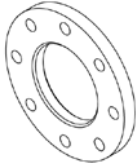
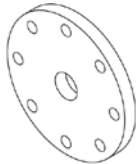
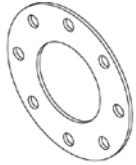

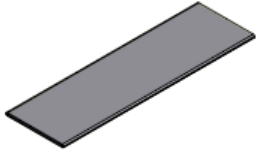
Tabela 34 – Listagem dos componentes envolvidos na construção do 2º equipamento







Figura da peça ou componente	Referência	Função ou motivo da sua aplicação
	Depósito em GFRP, da ALTO	Armazém de matéria-prima

	<p>Redução do depósito em GFRP, da ALTO</p>	<p>Direccionar a matéria-prima para o bocal de saída</p>
	<p>Tampa do depósito em GFRP, da ALTO</p>	<p>Cobrir o armazém de matéria-prima</p>
	<p>Policarbonato com 6mm de espessura</p>	<p>Visor do armazém da matéria-prima</p>
	<p>Perfil em L pultrudido GFRP da ALTO refª. 60x60x8</p>	<p>Cantoneira de apoio do armazém da matéria-prima</p>
	<p>Tubo TPS laminado a quente, rectangular, DIN EN 10210-1 80x50x5 – S355 J2 H</p>	<p>Estrutura base</p>
	<p>Dois componentes em chapa de aço S355 JR, com 5 mm de espessura, soldados</p>	<p>Acoplar a estrutura à máquina do processo</p>

	<p>Roda articulada com travão da Bosch Rexroth, refª. 3 842 515 367</p>	<p>Deslocação da estrutura</p>
	<p>Roda articulada da Bosch Rexroth, refª. 3 842 515 366</p>	<p>Deslocação da estrutura</p>
	<p>Pés de apoio, da Emile Maurin, refª. 35-161-80 M20 150</p>	<p>Imobilização da estrutura</p>
	<p>Gulilha com mola, da Fabory em aço mola de \varnothing 4,5 mm</p>	<p>Posicionar a estrutura à máquina do processo</p>
	<p>Caixa de rolamentos em aço C 220 do F. Ramada, refª 1.2067</p>	<p>Apoio ao veio do fuso</p>
	<p>Rolamentos de rolos cônicos SKF, refª. 32008 X/Q</p>	<p>Apoio ao veio do fuso</p>

	<p>Veio em varão de aço C 220 do F. Ramada, refª 1.2067</p>	<p>Agrupa o fuso, rolamentos e chaveta de acoplamento</p>
	<p>Fuso em ERTALYTE (PET/Plásticos de Engenharia)</p>	<p>Desloca a matéria-prima para o interior do perfil</p>
	<p>Moto-reductor da SEW, versão c/ flange B5/veio oco, refª. SAF57AM80 AB30 80B4</p>	<p>Sistema motriz que faz movimentar o fuso</p>
	<p>Tubo estrutural laminado a quente, redondo, DIN EN 10210-1 – 114,3x3,6 mm – S355 J2 H</p>	<p>Tubo que envolve o fuso de compactação dos resíduos dos perfis pultrudidos</p>
	<p>Tubo estrutural laminado a quente, redondo, DIN EN 10210-1 – 76,1 x 3,2 mm - S355 J2 H</p>	<p>Tubo de ligação da tremonha ao tubo que envolve o fuso</p>
	<p>Tremonha em Policarbonato, com 5 mm de espessura</p>	<p>Pré alimentador de matéria-prima</p>

	<p>Tampa da tremonha em Policarbonato, com 5 mm de espessura</p>	<p>Vedação da tremonha (pré-alimentador de matéria-prima)</p>
	<p>Flange lisa DIN 2576, refª DN 100</p>	<p>Ligação do corpo do fuso à curva e da curva ao mandril</p>
	<p>Flange cega DIN 2527, refª DN 100</p>	<p>Ligação do corpo do fuso à caixa de rolamentos</p>
	<p>Flange fina, não obedece a qualquer norma, porque para esta espessura de flange não existe standarização</p>	<p>Ligação do mandril à curva</p>
	<p>Redução 1 e 2 do corpo do mandril, em chapa de aço inox com 2 mm de espessura, refª AISI 304 L</p>	<p>Encaminha os resíduos para o mandril em Ux2</p>
	<p>Mandril, perfil em Ux2, em chapa de aço inox com 2 mm de espessura, refª AISI 304 L</p>	<p>Encaminha os resíduos para o interior do perfil pultrudido</p>

	<p>Freio elástico interior, DIN 471 – 40 x 1,75 - St</p>	<p>Posicionar os rolamentos, relativamente ao veio</p>
	<p>Cavilha elástica, EN ISO 8752 – 6 x 50 - St</p>	<p>Fixar o fuso ao veio</p>
	<p>Chaveta DIN 6885A – 10 x 8 x 90</p>	<p>Acopla o veio do fuso ao moto-reductor</p>
	<p>Racor de ar comprimido de 1/8-6 da Festo, refª 153002</p>	<p>Sopragem de ar comprimido, para soltar os desperdícios na forma granulada</p>
	<p>Tela de borracha com 2 mm de espessura</p>	<p>Apoio de borracha da estrutura</p>
	<p>Parafuso sextavado, DIN 933 – M16 x 35 – 8.8</p>	<p>Fixação do sistema motriz à caixa de rolamentos</p>

	<p>Parafuso sextavado em inox, DIN 933 – M16 x 45 – A2</p>	<p>Fixação do corpo do mandril à flange lisa do elemento de redução</p>
	<p>Parafuso sextavado, DIN 931 – M16 x 60 – 8.8</p>	<p>Fixação do elemento de redução à flange do sistema motriz</p>
	<p>Parafuso sextavado interior, DIN 912 – M10 x 20 – 8.8</p>	<p>Fixar a caixa de rolamentos ao moto-reductor</p>
	<p>Parafuso sextavado interior, DIN 912 – M10 x 25 – 8.8</p>	<p>Fixar o moto-reductor e a caixa de rolamentos à estrutura</p>
	<p>Fêmea sextavada flangeada, DIN 6923 – M20 - 8</p>	<p>Nivelar a estrutura, nos pés de apoio</p>
	<p>Fêmea sextavada, DIN 934 – M20 - 8</p>	<p>Fixar a estrutura, nos pés de apoio</p>

	<p>Fêmea sextavada, DIN 934 – M16 - 8</p>	<p>Fixação do elemento de redução à flange do sistema motriz</p>
	<p>Fêmea sextavada em inox, DIN 934 – M16 – A2-70</p>	<p>Fixação do corpo do mandril à flange lisa do elemento de redução</p>
	<p>Fêmea sextavada, DIN 934 – M12 – 8</p>	<p>Fixar as rodas com travão à estrutura</p>
	<p>Rebite ISO 15977 – 5 x 22 – Al/St - L</p>	<p>Fixação do contentor à estrutura</p>
	<p>Anilha plana DIN 125A – M10 – 140 HV</p>	<p>Fixar o moto-reductor e a caixa de rolamentos à estrutura</p>

3.4.4.1 Informação complementar

- A estrutura em formato E, utiliza no seu todo um perfil de 80x50x5. Pelos cálculos já efectuados, é mais do que suficiente face às cargas existentes, atendendo aos requisitos técnicos que este mesmo apresenta. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo V.

- O depósito de matéria-prima, com formato rectangular, é afunilado na sua parte inferior permitindo que a matéria-prima caia na tremonha por gravidade. Possui um visor que permite verificar o nível de matéria-prima existente. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo V.
- O moto-reductor, que faz rodar o sistema de alimentação, desloca-se à velocidade de sincronismo com o processo, é controlado pelo PLC da pultrusora para que haja controlo da compactação dos resíduos que são introduzidos no interior do perfil. As características técnicas podem ser verificadas no Anexo V.
- O sistema de alimentação, consiste num tubo que se encontra acoplado à tremonha, o qual tem por objectivo armazenar a matéria-prima, permitindo cobrir o fuso (parafuso sem-fim), que originará a compactação do material que irá ser enviado através do mandril para o interior do perfil em processamento. Este sistema de alimentação tem nas suas extremidades, respectivamente, flanges que permitem por um lado a sua ligação ao sistema motriz, e por outro lado a ligação ao mandril que direcciona o material compactado no interior do perfil, as características técnicas podem ser verificadas no Anexo IV.
- De referir a folga deixada entre o fuso (\varnothing exterior de 98 mm) e o corpo (tubo 114,3 mm x 3,6 mm). Neste caso, resulta em 4,55 mm por banda, que se destinam a permitir o retrocesso dos resíduos, em caso de entupimento ou de excesso de velocidade de alimentação, como pode ser verificado no Anexo IV.

3.5 Construção dos equipamentos

Depois de realizados os projectos, a ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. procedeu à construção dos equipamentos. Atendendo à utilização industrial a que se destinam, e a um tratamento nem sempre cuidado, algumas zonas da estrutura e ligações foram reforçadas, apesar dos coeficientes de segurança revelarem um elevado conforto neste aspecto.

Apesar do estado avançado de construção dos equipamentos, os mesmos ainda não se encontram totalmente prontos. No que toca ao equipamento para produção das pré-formas, e no momento de conclusão deste manuscrito, falta apenas proceder à instalação do quadro eléctrico correspondente à automação, o qual depende da empresa que produziu a automação do equipamento original. Já relativamente ao equipamento de produção de perfis híbridos com base em resíduos, a estrutura e silo de armazenamento dos resíduos já se encontram prontos, faltando apenas avançar com o cilindro com o fuso propulsor dos resíduos.

Nas imagens seguintes são mostradas algumas das imagens referentes ao estado actual destes equipamentos.



Figura 80 – Equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida



Figura 81 – Pormenor do equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida – Parte motriz das pré-formas



Figura 82 – Pormenor do equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida – Caixa do cilindro que impulsiona as pré-formas

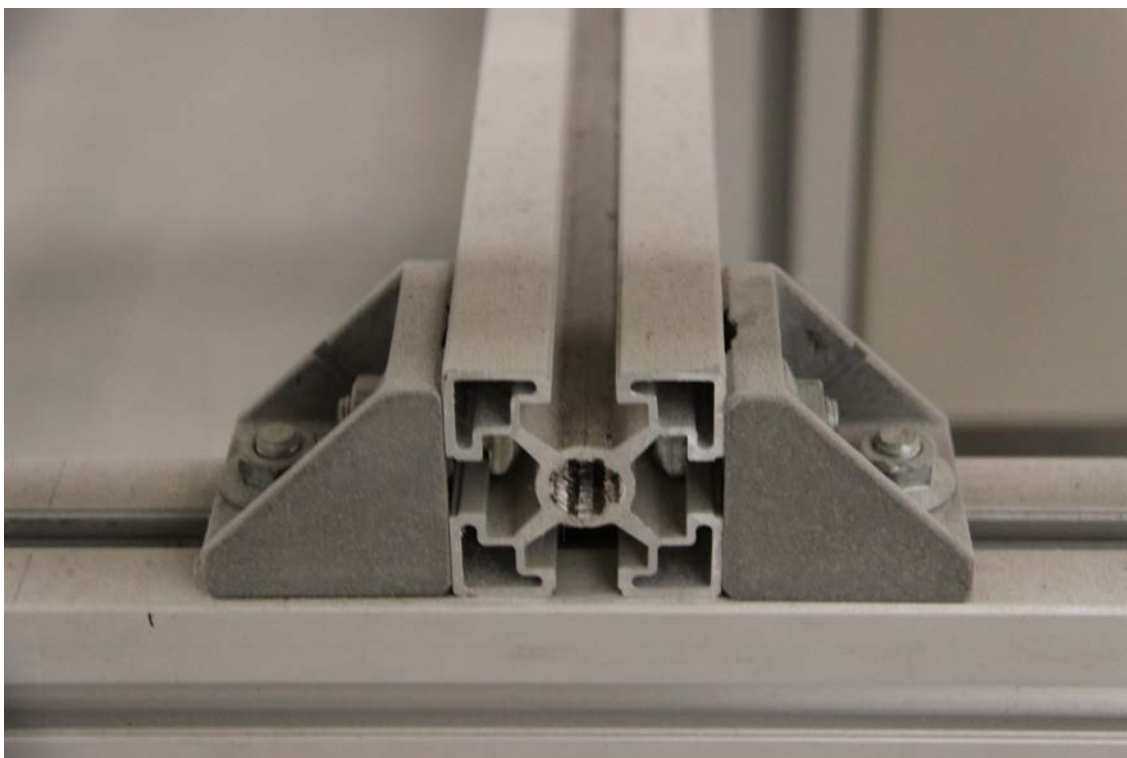


Figura 83 – Pormenor do equipamento de abastecimento de pré-formas para a Pultrusão Híbrida – Perfil usado e ligações



Figura 84 – Pormenor do equipamento de abastecimento de resíduos para a Pultrusão Híbrida – Estrutura e silo de armazenagem dos resíduos para alimentação

Deverá ser aqui notado que a construção destes equipamentos revela a confiança da empresa nas soluções apontadas. É apenas de lamentar que não tenha sido possível que os equipamentos pudessem ter estado prontos até à data de conclusão deste trabalho, permitindo a sua validação principal: o teste efectivo de funcionamento.

4. Conclusões

Após todo o trabalho desenvolvido em redor destes dois equipamentos de suporte à pultrusão híbrida, poderá concluir-se o seguinte:

- A obtenção deste tipo de perfis é efectivamente uma novidade no mercado, já que, através de uma apurada pesquisa em revistas científicas e da especialidade, não foi encontrada qualquer referência à produção deste tipo de perfis, e muito menos aos equipamentos capazes de os gerar;
- Tanto no caso da alimentação das pré-formas como no da alimentação de resíduos, foram encontradas soluções que permitem a alimentação contínua do material a inserir no núcleo, como se exige num processo como a pultrusão;
- A opção para a estrutura do equipamento de alimentação das pré-formas recaiu num material e tipo de perfil mais ligeiro – perfil de alumínio técnico -, com vista a minimizar o esforço de construção e tornar a estrutura mais fácil de mover, mesmo quando carregada;
- Já para a estrutura do equipamento para a alimentação de resíduos foi seleccionado tubo de aço, dado ser necessária uma maior rigidez do conjunto;
- Todos os esforços aplicados foram tidos em consideração, sendo calculados e verificados todos os tramos das estruturas. Também as ligações foram seleccionadas e verificadas, em função dos esforços aplicados em cada zona da estrutura de alimentação das pré-formas;
- Na máquina de alimentação de resíduos, o fuso de propulsão dos resíduos foi convenientemente desenhado para obter os resultados desejados, e o material seleccionado para o mesmo assegura uma vida útil relativamente longa, mesmo em contacto com os resíduos providos de fibra de vidro. Foi projectada uma ‘escapatória’ para os resíduos em torno do fuso, de forma a permitir o recuo dos mesmos, no caso de se verificar um corte do fluxo de saída dos resíduos, por entupimento ou paragem não coordenada da pultrusão híbrida;
- O coeficiente de segurança obtido foi, na generalidade dos casos, superior a 2, o que permite antever uma vida útil relativamente longa para ambos os equipamentos;
- Os motores seleccionados tiveram em consideração o meio em que vão estar inseridos (perigo de incêndio na resina), pelo que possuem especificações ATEX;

- Para a realização do projecto, foram utilizadas algumas ferramentas informáticas, nomeadamente o AUTODESK INVENTOR, versão PROFESSIONAL 2012 e o FTOOL, versão EDUCATIONAL 2.12, que permitiram o desenho dos equipamentos e a verificação das solicitações a que os equipamentos irão estar sujeitos.

O projecto foi desenvolvido em estreita cooperação com a ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda, empresa que entretanto validou as soluções encontradas e procedeu à construção dos equipamentos. Faltam apenas concluir alguns pormenores constructivos e proceder à ligação dos sistemas de automação que coordenarão o movimento entre o equipamento de pultrusão simples anteriormente existente e estes que permitirão a fabricação de produtos pultrudidos híbridos.

Assim, poderá considerar-se que os objectivos principais propostos para este trabalho foram atingidos e que, dentro em breve, poderão começar a ser produzidos em série perfis pultrudidos híbridos com preenchimento em cortiça, poliuretano ou resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro. Neste último caso, será ainda um benefício para o ambiente, já que os resíduos passarão a ser reintegrados no processo, melhorando o comportamento dos perfis e deixando de pesar no orçamento da empresa, que deixará de ter que pagar para os colocar num aterro.

Bibliografia e Outras Fontes de Informação

Referências Bibliográficas

Angelov, I., Wiedmer, S., Evstatiev, M., Friedrich, K., Mennig, G., 2007. Pultrusion of a flax/polypropylene yarn. *Composites, Part A*, 38, 1431-1438.

Aniskevich, K., Aniskevich, A., Arnautov, A., Jansons, J., 2012. Mechanical properties of pultruded glass fiber-reinforced plastic after moistening. *Composite Structures*, 94, 2914-2919.

Arduini, M., Nanni, A., 1997. Behavior of Precracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 1 (2), 63-70.

Ayranci C., Carey J., 2008. 2D braided composites: A review for stiffness critical applications. *Composite Structures*, 85, 43–58.

Balageas, D.L., Krapez, J.C., Cielo, P., 1986. Pulsed Photothermal Modeling of Layered Materials. *Journal of Applied Physics*, 59, 348-357.

Bank, L.C., Oliva, M.G., Bae, H.U., Bindrich, B.V., 2010. Hybrid concrete and pultruded-plank slabs for highway and pedestrian bridges. *Construction and Building Materials*, 24, 552–558.

Britnell, D.J., Tucker, N., Smith, G.F., Wong, S.S.F., 2003. Bent pultrusion a method for the manufacture of pultrude with controlled variation in curvature. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 311-315.

Brust, G., 2005. Notes on Polimer Science. Polymer Science Learning Center, Department of Polymer Science, The University of Southern Mississippi.

Burgoyne, C.J., 1997. Rational use of advanced composites in concrete. *Procs 3rd Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures-Sapporo*, 1, 75-88.

Carlone, P., Palazzo, G.S., Pasquino, R., 2006. Pultrusion manufacturing process development by computational modelling and methods. *Mathematical and Computer Modelling*, 44, 701-709.

- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon Press, Oxford, 1959.
- Correia, J. R., Almeida, N. M., Figueira, J. R., 2011. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1745-1753.
- Davalos, J.F., Qiao, P., Barbero, E.J., 1996. Multiobjective material architecture optimization of pultruded FRP I-beams. *Composite Structures*, 35 (3), 271-281.
- Deskovic, N., Triantafillou, T.C., Meier, U., 1995. Innovative design of FRP combined with concrete: Short term behaviour. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 121 (7), 1089-1078.
- Durão, L. M., 2010a. *Materiais Compósitos: Introdução. Apontamentos do Docente*. ISEP.
- Durão, L. M., 2010b. *Materiais Compósitos: Reforços, matrizes e cargas. Apontamentos do Docente*. ISEP.
- Einde, L.V.D., Zhao, L., Seible, F., 2003. Use of FRP composites in civil structural applications. *Construction and Building Materials*, 17 (6-7), 389-403.
- Fitzer, E., 1989. Pan-based carbon fibers—present state and trend of the technology from the viewpoint of possibilities and limits to influence and to control the fiber properties by the process parameters. *Carbon Fibers and Composites*, 27 (5), 621-645.
- Franco, R.A.V.S., 2008. *Produção de Componentes em Materiais Compósitos por Infusão de Resina*. Instituto Superior Técnico, Lisboa. Tese de mestrado.
- Ganster, J., Fink, H.P., Pinnow, M., 2006. High-tenacity man-made cellulose fiber reinforced thermoplastics-injection moulding compounds with polypropylene and alternative materials. *Composites, Part A* (37), 1796-1804.
- Gensewich, C., Riedel, U., 1999. *Pultrusion von Konstruktionswerkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen*. Wiley - VCH, 272, 11–16.
- Gibson, A.G., Lo, C.Y., Lamb, D.W., Quinn, J.A., 1989. Understanding the factors controlling the pultrusion process. *Plastics and Rubber Processings Applications*, 12, 191-197.

Gorthala, R., Roux, J.A., Vaughan, J.G., 1991. Impact of pultrusion pull speed on temperature and degree of cure profiles within a composite material. SPI Composites Institute's 46th Annual Conference, Paper 1, Session 13-D, Washintgon DC.

Haffner, S.M., Friedrich, K., Hogg, P.J., Busfield, J.J.C., 1998. Finite element assisted modelling of the microscopic impregnation process in thermoplastic performs. *Applied Composite Materials*, 5, 237-255.

Han, D.H., Lee, D.S., 1986. Development of a mathematical model for the pultrusion process. *Polymer Engineering Science*, 26 (6), 393–404.

Hillman, J.R., 2003. Investigation of a Hybrid-Composite Beam System: Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 23. Teng & Associates, Inc., Chicago, IL.

Jacob, A., 2004. Pultrusion update. *Reinforced plastics*, 48 (6), 30-32.

Juinall, R.C., Marshek, K.M., 2012. *Machine Componente Design*, 5th Edition International Student Version. Wiley.

Kalamkarov, A.L., Fitzgerald, S.B., MacDonald, D.O., Georgiades, A.V., 1999. On the processing and evaluation of pultruded smart composites. *Composites Part B*, 30, 753–763.

Kalamkarov, A.L., MacDonald, D.O., Fitzgerald, S.B., Georgiades, A.V., 2000. Reliability assessment of pultruded FRP reinforcements with embedded fiber optic sensors. *Composite Structures*, 50, 69-78.

Karus, M., Kaup, M., 2002. Natural fibres in the European automotive industry. *Journal of Industrial Hemp*, 7 (1), 119-131.

Keller, T., Riebel, F., Valle, T., 2008. GFRP posts for railway noise barriers – Experimental validation of load-carrying performance and durability. *Composite Structures*, 85, 116-125.

Khan, F., Kim, Y. J., 2012. Time-dependent and residual behavior of pultruded GFRP beams subjected to sustained intensities and cold temperature. *Cold Regions Science and Technology*, 74-75, 43-51.

Khennane, A., 2008. A new design concept for a hybrid FRP-High strength concrete beam for infrastructure applications. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008) 22-24 July, Zurich, Switzerland.

Kim, D.H., Lee, W.I., Friedrich, K., 2001. A model for a thermoplastic pultrusion process using commingled yarns. *Composites Science and Technology*, 61, 1065-1077.

Kim, S.S., Lee, D. G., 2006, Design of the hybrid composite journal bearing assembled by interference fit. *Composite Structures*, 75, 222-230.

Maldague, X.P.V., (2002). Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*, 6, 1060-1073.

Marissen, R., Drift, L.T. van der, Sterk, J., 2000. Technology for rapid impregnation of fibre bundles with a molten thermoplastic polymer. *Composites Science and Technology*, 60, 2029-2034.

Martin, J., 2006. Pultruded composites compete with traditional construction materials. *Reinforced plastic*, 50 (5), 20-27.

Matsumoto, T., 1985. Mesophase pitch and its carbon fibers. *Pure & Appl. Chem.*, 57 (11), 1553-1562.

Mazumbar, S.K., 2001. *Materials Product and Process Engineering*. Composites Manufacturing. CRC Press.

Meola, C., 2007. A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography. *Materials Letters*, 61 (3), 747-750.

Mohanty, A.K., Khan, M.A., Hinrichsen, G., 2000. Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabric–polyester amide composites. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31 (2), 143-150.

Nichel, J., Riedel, U., 2003. Activities in biocomposites. *Mater Today* 6 (4), 44-48.

Park, K.T., Kim, S.H., Lee, Y.H., Hwang, Y.K. 2005. Pilot test on a developed GFRP bridge deck. *Composite Structures*, 70 (1), 48-59.

Qiao, P.Z., Davalos, J.F., , Xu, X.F., Robinson, J., Barth, K.E., 2001. Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications. *Composite Structures*, 52 (3-4), 441-452.

Reinforced Plastics, 1998. European pultrusion market on the up. *Reinforced Plastics, Industry News*, 42, (6), 18.

Reeve, S. R., 2001. *FRP Composite Bridge Decks: Barriers to Market Development*. CRC Press.

Rijswijk, K. V., . Bersee, H.E.N, 2007, Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 666-681.

Salim, H.A., Davalos, J.E., Qiao, P., Kiger, S.A., 1997. Analysis and design of fiber reinforced plastic composite deck-and-stringer bridges. *Composite structures*, 38 (1-4), 295-307.

Silva, J. F., 2010. *Materiais Compósitos de Matriz Termoplástica*. Apontamentos do Docente. ISEP.

Snijder, M.H.B., Bos, H.L., 2000. Reinforcement of polypropylene by annual plant fibers: optimisation of the coupling agent efficiency. *Composite Interfaces*, 7, 69-75.

Starr, T., 2000. *Pultrusion for Engineers*. Woodhead Publishing Ltd.

Stewart, R., 2002. Pultrusion industry grows steadily in US. *Reinforced plastics*, 46, (6), 36-39.

Suratno, B. R., Ye, L., Mai, Y.W., 1998. Simulation of temperature and curing profiles in pultruded composite rods. *Composites Science and Technology*, 58, 191-197.

Thilbault, J., Grandjean, B.P.A., 1992. Process control using feed forward neural networks. *Journal of Systems Engineering*, 2, 198–212.

Weigel, P., Ganster, J., Fink, H.P., Gassan, J., Uihlein, K., 2002. Polypropylene cellulose compounds-high strength cellulose fiber strengthens injection moulded parts. *Kunststoffe Plast Europe*, 92, 35-7.

Wilcox, J.A.D., Wright, D.T., 1998. Towards pultrusion process optimisation using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*, 83, 131-141.

Wilson, T.M., 2003. Thermoplastic pultrusion process unveiled. *Reinforced plastic, News Processing*, 47 (9), 18.

Wright, D.T., 1995. Novel analysis and modelling methodologies applied to pultrusion and other processes. PhD Thesis. Loughborough University UK.

Zi, G., Kim, B.M., Hwang, Y. K., Lee, Y. H., 2008. An experimental study on static behavior of a GFRP bridge deck filled with a polyurethane foam. *Composite Structures*, 82, 257-268.

Outras Fontes de Informação Disponíveis Online Por Empresas do Sector

Aviação, O., 2012. <http://www.aviacao.org/>, consultado em 09-12-2012.

Cogumelo, 2005. <http://www.cogumelo.com.br/>, consultado em 23-11-2012.

Corning, O., 2012. <http://www.ocvreinforcements.com/>, consultado em 01-10-2012.

Ctihuatai, 2008. <http://ctihuatai.com/>, consultado em 19-11-2012.

Embraer, 2012. <http://www.ebah.com.br/>, consultado em 09-12-2012.

Fibrolux, 2012. <http://fibrolux.com/>, consultado em 01-10-2012.

Fraunhofer ICT, 2012. <http://pub-137.bi.fraunhofer.de/>, consultado em 23-11-2012.

Kopeliovich,D.,2012. Closed mold fabrication of Polymer Matrix Composites.http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=closed_mold_fabrication_of_polymer_matrix_composites, consultado em 22-11-2012.

Rocarbon, 2012. <http://www.rocarbon.com/>, consultado em 07-03-2012.

Vacmobiles,2012.Vacman'snotes: What is resin infusion (or vacuum infusion)?
<http://www.vacmobiles.com/site/vacmobiles/files/Vacman's%20Notes%20-%20what%20is%20resin%20infusion.pdf>, consultado em 19-11-2012.

Anexos

Em suporte digital, encontram-se divididos nas seguintes partes:

- Anexo I – Desenhos da estrutura 1
- Anexo II – ‘*Data sheet*’ do material utilizado na estrutura 1
- Anexo III – Dados técnicos referentes aos cálculos da estrutura 1
- Anexo IV – Desenhos da estrutura 2
- Anexo V - ‘*Data sheet*’ do material utilizado na estrutura 2
- Anexo VI - Dados técnicos referentes aos cálculos da estrutura 2