



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Optimização de uma máquina de pultrusão

Carlos José Matos da Costa



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Optimização de uma máquina de pultrusão

Carlos José Matos da Costa

1050110

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 da Doutora Ana Cristina Meira Castro, Professora Adjunta do Departamento de Matemática do ISEP.

Palavras-chave

Pultrusão, Processo de Pultrusão, Optimização do Processo

Resumo

Este trabalho teve como principal objectivo optimizar um equipamento de produção de perfis pultrudidos já existente na empresa ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. O trabalho surgiu na sequência de um Projecto financiado pelo Programa QREN – Quadro de Referência Estratégico Nacional, determinadas debilidades identificadas no processo de pultrusão, principalmente ao nível da eficiência térmica na fieira e de alguma falta de produtividade devida às diversas operações necessárias à mudança da fieira consoante o tipo de perfil a produzir. Após um levantamento prévio da situação e uma adequada segmentação da máquina nas diferentes partes que a constituem e que contribuem activamente para o processo de produção dos perfis, foi elaborada uma lista de prioridades e foram sendo procuradas as soluções mais adequadas para cada caso, sempre com a participação activa da empresa, com vista à sua implementação final. A metodologia adoptada passou sempre por uma reunião inicial com os representantes da empresa e com os orientadores, efectuando-se a tradicional “tempestade de ideias”. Depois da correspondente maturação, desenvolvimento e aprovação prévia, por parte da empresa, as ideias foram desenvolvidas e até implementadas na sua maioria. O saldo poderá considerar-se extremamente positivo, tanto para a empresa que, ao implementar as soluções, as validou e ganhou competitividade, como para as pessoas envolvidas neste projecto, através da enorme aprendizagem adquirida.

Keywords

Pultrusion, Pultrusion Process, Process Optimization

Abstract

The main goal of this work was to optimize the pultrusion equipment already installed at the ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. This work was done as result of a QREN – National Strategic Board of Reference (Quadro de Referência Estratégico Nacional) support in order to overcome some problems related with the productivity of this company, namely in the thermal efficiency of the pultrusion die and setup operations. After a previous checkup of the situation and an adequate partition of the different mechanisms involved and those contribute actively for the production process of pultruded bars and profiles, it was drawn up a list of priorities and were been sought the best solutions for overcome each problem, always with an active collaboration of the company technical staff in order to achieve a cheap and useful industrial solution allowing its practical application as soon as possible. Methodology adopted passed by a previous brainstorming meetings comprising all the team (researchers and company technical staff) followed by research and design work in order to mature all the ideas. After deep and drawing studies, all the solutions were presented to the company staff members in order to achieve their approval, allowing the construction of prototypes and definitive components allowing the corresponding assembly on the master equipment. The development of this work was extremely rewarding for the research team as well as for the company that, implementing these new components validated all the developments made and allowing to confirm productivity gains, as well as the research team that increases its knowledge in this matter.

Agradecimentos

O trabalho que apresento só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

À Teresa, minha esposa, o meu muitíssimo obrigado pelo precioso incentivo, otimismo paciência e espírito de ajuda que teve comigo ao longo da minha vida académica

Ao meu orientador Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, pelas elevadas competências científicas que possui e que procurou transmitir, também pela orientação, análise crítica, confiança, conselhos e disponibilidade demonstradas ao longo deste trabalho e toda a minha vida académica, na qual me acompanhou e apoiou, ou seja, um amigo que realizei. O meu especial agradecimento.

À Professora Doutora Ana Cristina Meira da Silva e Castro, do Departamento de Matemática, pelo profissionalismo, disponibilidade e auxílio aplicado neste projeto.

À empresa ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., por todo o apoio para a realização de testes e disponibilidade dos colaboradores. Assim, expresso aqui um especial agradecimento ao Eng.º Mário Rui, Eng.º Tomé Santos, Eng.º Rui Lourenço e Eng.º Luís Oliveira.

Aos meus sogros pelo apoio incondicional e carinho que sempre me deram e aos meus cunhados e sobrinhas.

Aos meus amigos que tive e ganhei no Ensino Superior, em especial ao grupo que criamos (Luís Martins, Rucas Gomes, Diogo Ferreira e Edgar Moutinho e Mariana Ascensão) e agora no mestrado em especial ao Pedro Nunes que me ajudou. A todos eles obrigado pela confiança demonstrada ao longo da minha formação académica e, sobretudo, por todos os momentos de companheirismo e alegre convívio. Boa sorte para todos.

Lista de Símbolos e Abreviaturas

AFRP – Aramide Fiber Reinforced Plastics (Plásticos Reforçados com Fibra de Aramida)

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BMC - *Bulk Molding Compound*

CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Plastics* (Plástico Reforçado com Fibra de Carbono)

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

FEA – *Finite Elements Analysis*

FRP - *Fiber Reinforced Polymer* (Polímero Reforçado com Fibra)

GFRP - *Glass Fiber Reinforced Plastic* (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro)

kN – Kilo Newton

m³ – Metros Cúbicos

mJ – Mega Joule

PAN – Polyacrylonitrile

Pitch – Petroleum Derived From Oil

PRF - Polímeros Reforçados Com Fibras

PRFV – Plástico Reforçado Com Fibras De Vidro

RTM - *Resin Transfer Molding* (Moldação de Resina por Transferência)

UHMW – Ultra High Molecular Weight

UV – Ultra-Violeta

Φ_r – Fração Volúmica

Φ_g – Fração Volúmica De Fibra

v – Coeficiente de Poisson

Glossário de Termos

Acelerador - Aditivo que irá acelerar o processo de cura da resina.

Aditivo - Produtos químicos adicionados à resina termoendurecível para incrementar propriedades específicas como resistência UV, cor, resistência ao fogo, entre muitas outras.

Agente de Cura - Catalisador químico adicionado à resina para prolongar o tempo de cura do composto, quando submetido a ambientes de temperatura controlada.

'Bulk Molding Compounding' - Mistura de fibra picada e resina, misturada num pré- impregnado composto "a granel", que é usado na injeção ou moldagem por compressão.

Catalisador - Substância química adicionada à resina termoendurecível para acelerar a cura da resina para massa sólida através de uma reação exotérmica.

Compósito - Termo utilizado para um material constituído por dois ou mais materiais, uns constituindo a matriz e outros constituindo o reforço.

'Chopped Strand Fiber' – Fibra estrutural cortada em pedaços pequenos, sendo frequentemente injectada ou pulverizada num molde.

Cura – Reação da resina que a permitiu polimerizar e passar ao estado sólido.

Exotermia - Processo de geração e libertação de calor durante a reação química de cura de uma resina termoendurecível, o qual é normalmente impulsionado pela adição de calor.

Análise de Elementos Finitos - Processo de modelação computadorizada que permite determinar as propriedades de uma estrutura composta.

Fibra contínua - Termo utilizado na referência a fibra estrutural longa.

Fieira - Molde com furo para produção de perfis com secção transversal constante utilizado nomeadamente em pultrusão ou extrusão.

Fibra de carbono – Material têxtil extremamente leve que, quando combinado com uma resina (epóxi na maioria das vezes), produz um reforço extremamente rígido do compósito. Devido às suas características de baixa densidade e elevada resistência, esta matéria-prima possui elevada procura na indústria aeroespacial, militar e de lazer.

Fibra de vidro tipo E - Fibra de reforço estrutural mais frequentemente usada. É amplamente utilizada devido ao seu baixo custo, facilidade de produção, resistência, baixa densidade e boas propriedades isolantes.

Fibra de vidro tipo S - Fibra de reforço estrutural semelhante ao tipo E, mas com uma composição química ligeiramente diferente, sendo ainda menos densa e mais resistente.

'Fillers' - Materiais inertes adicionados à resina para produzir volume, diminuindo assim a densidade global do compósito. Também são usados para incrementar certas características de desempenho da resina, tais como resistência ao fogo ou resistência à fissuração. Exemplos disso são o carbonato de cálcio e trihidrato de alumínio.

'Gripper' – Maxilas responsáveis pelo traccionamento do perfil pultrudido, após saída da fieira.

Isotrópico – Que possui propriedades idênticas em todas as direcções.

Kevlar - Tecido de aramida, que combina leveza com alta resistência. Este material é conhecido pela sua cor amarela original e tornou-se popular pelo seu uso em coletes à prova de bala.

Mandril - Molde positivo que confere a forma interior no fabrico de produtos compostos ocós.

Manta – Estrutura plana de fibras, flexível e porosa.

Matriz - Molde negativo que confere a forma exterior do perfil a produzir

Moldação por compressão - Método de formação de compósitos usando um molde e aplicando pressão e calor ao material contido no molde.

Moldação por injeção - Método de fabricação de plásticos por injeção de termoplásticos ou resina fundida num molde aquecido sob alta pressão.

Pigmento - Produto químico adicionado à resina para criar coloração do composto (aditivo).

'Puller' – Sistema responsável pelo traccionamento dos perfis durante a pultrusão.

Reforço - Termo utilizado para descrever o material fibroso estrutural que, quando adicionado à resina, permite a obtenção de um laminado forte e sólido.

Resina - Matriz que tem por função unir e manter as fibras estruturais no seu lugar. A maioria das resinas são termoendurecíveis ou termoplásticas.

Resina Epóxida ou de Poliéster - Resina com base numa matriz termoendurecível, amplamente utilizada em compósitos.

Resina Viniléster – Resina habitualmente utilizada no fabrico de compósitos com resinas termoendurecíveis. Por comparação com as demais, esta resina possui baixo custo. Possui, ainda, excelentes propriedades de resistência à corrosão e boas propriedades estruturais.

'Roving' - Fibra estrutural na forma de fio, utilizada como matéria-prima. Geralmente, encontra-se disponível em múltiplas vertentes de filamentos.

'Resin Transfer Molding' - Método de formar um laminado composto através da injeção de resina num molde fechado ou, em alternativa, "puxando" a resina para dentro de um molde usando vácuo.

Painel de sanduíche - Painel estrutural composto por um núcleo de baixa densidade, com material da pele em ambos os lados. Os painéis sanduíche são usados para adicionar resistência, rigidez e isolamento térmico e/ou acústico sem acrescentar peso considerável.

Sistema de guiamento de fibras – Sistema que permite a adequada condução das fibras desde os rolos de origem até à entrada na feira, colimando-as sob a forma do perfil desejado.

Tecido – Material que permite a orientação das fibras em ângulos fora do eixo, normalmente ± 90 graus, e ± 45 graus, em camadas, sendo por vezes cosidas o que proporciona maior resistência ao FRP.

Termopar - Sensor bimetálico de recolha de temperatura que auxilia no processo de controlo do aquecimento durante o processo de pultrusão.

Termoplástico - Resina polimérica que está em estado sólido à temperatura ambiente, mas fica líquida com a adição de calor, permitindo a formação e moldação de perfis. Os materiais termoplásticos são geralmente capazes de ser reutilizados ou reformulados, permitindo facilmente a reciclagem.

Termoendurecível – Resinas poliméricas que originalmente se encontram no estado líquido, e às quais é adicionado calor, radiação ou activação de uma reação química, promovendo a sua cura e correspondente endurecimento até atingirem o estado sólido. Resinas termoendurecíveis são normalmente mais resistentes que os termoplásticos mas, devido à estrutura química, não podem ser reutilizadas, sendo difíceis de reciclar.

Tina – Zona de impregnação das fibras na resina.

Unidireccional – É o termo usado para descrever o reforço de fibra estrutural que percorre um único eixo (X,Y ou Z).

Ultravioleta - Radiação electromagnética com um comprimento de onda menor que o da luz visível e maior que o dos raios X.

Véu – Material de pano colocado sobre a superfície do compósito antes deste curar. Tem por função proporcionar excelentes acabamentos na superfície, fazer impressões com logótipos ou desenhos. São geralmente usados para ajudar na prevenção do envelhecimento do perfil causado principalmente pela acção dos raios UV.

Viscosidade – Propriedade física la qual se mede a dificuldade de uma resina fluir.

Índice

Agradecimentos	ix
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	xi
Glossário de Termos.....	xiv
Índice	xviii
Índice de Figuras.....	xx
1. Introdução.....	1
Enquadramento	1
Objectivos	1
Metodologia.....	2
Estrutura	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Compósitos	5
2.1.1. Os materiais compósitos de matriz polimérica: introdução.....	5
2.1.2. Matriz	6
2.1.2.1. Matriz Termoendurecível.....	6
2.1.2.1.1. Resinas de Poliéster.....	7
2.1.2.1.2. Resinas de Viniléster	7
2.1.2.1.3. Resinas Epóxicas	8
2.1.2.1.4. Resumo das propriedades das diferentes resinas termoendurecíveis.....	8
2.1.2.2. Matriz Termoplástica.....	10
2.1.3. Reforços	11
2.1.3.1. Fibras de vidro	11
2.1.3.2. Fibras de carbono	13
2.1.3.3. Fibras Aramídicas	14
2.1.3.4. Fibras de Boro	14
2.1.3.5. Resumo das principais propriedades das fibras de reforço	15
2.2. Pultrusão	16
2.2.1. Factos históricos relacionados com o processo de pultrusão.....	16
2.2.2. O processo de pultrusão.....	17
2.2.4. Componentes de uma máquina de pultrusão.....	18
2.2.4.1. Armazém das fibras.....	19
2.2.4.2. Tina de impregnação das fibras em resina	21
2.2.4.3. Sistema de guiamento das fibras	23

2.2.4.4. Fieira e sistema de aquecimento	24
2.2.4.5. Sistema de traccionamento dos perfis pultrudidos.....	26
2.2.4.6. Sistema de corte	27
2.2.5. Parâmetros de controlo do processo de pultrusão.....	28
2.2.6. Matérias-Primas utilizadas no processo de pultrusão.....	31
2.2.6.1. ‘Roving’	32
2.2.6.2. Manta	33
2.2.6.3. Tecido	33
2.2.6.4. Véu de superfície	34
2.2.7. Características dos produtos obtidos por pultrusão	35
2.2.8. Vantagens e limitações do processo de pultrusão.....	40
2.2.9. Principais desenvolvimentos no processo de pultrusão	41
2.2.10. Principais aplicações dos produtos pultrudidos	42
2.2.10.1. Área da Construção	43
2.2.10.2. Aplicações que requerem isolamento eléctrico.....	46
2.2.10.3. Outras aplicações.....	47
3. Desenvolvimento	48
3.1. Introdução ao trabalho prático	48
3.2. A máquina de pultrusão – Situação inicial	48
3.2.1. Inventariação dos problemas a resolver no equipamento.....	50
3.2.2. Plano de intervenção	52
3.3. Projecto e implementação de novas soluções.....	52
3.3.1. Projecto, construção e implementação de um novo sistema de colocação das mantas e véus	52
3.3.1.1. Dimensionamento dos veios e do pilar vertical.....	57
3.3.2. Desenvolvimento de um novo sistema de aquecimento para as fieiras.....	67
3.3.2.1. Análise termográfica do perfil de temperaturas ao longo da fieira tendo em conta o modelo de aquecimento original.....	68
3.3.2.2. Simulação e análise dos resultados	70
3.3.3. Desenvolvimento de um novo sistema de guiamento final das fibras.....	78
3.3.4. Desenvolvimento de uma nova tina com controlo de temperatura	83
3.3.5. Desenvolvimento de um novo sistema de fixação rápida da fieira	86
3.4. Resumo da situação após a realização do projecto	89
4. Considerações finais	94
5. Proposta de trabalhos futuros.....	96
6. Bibliografia e Outras fontes de informação	98

Índice de Figuras

Figura 1 - Curvas Tensão - Deformação para PRF com três diferentes resinas, depois de uma cura de 5 horas a 80 °C [12].....	9
Figura 2 - Fibras de vidro longas curtas [20]	12
Figura 3 - Mantas constituídas à base de fibras de carbono [24]	13
Figura 4 - Exemplo de perfis obtidos por pultrusão [30]	17
Figura 5 – Máquina de pultrusão e respectiva envolvente [Adaptado de 44]	18
Figura 6 - Quadro de características de quatro diferentes máquinas de pultrusão [adaptado de 45].....	19
Figura 7 - 'Racks' onde são armazenadas as bobinas de fibra de vidro	21
Figura 8 - Saída dos cordões de fibra das prateleiras de armazenamento ('racks') em direcção às placas de guiamento até à fieira.....	21
Figura 9 - Sistema aberto de impregnação dos cordões de fibra em resina [45, 46].....	22
Figura 10 - Misturadora para homogeneização da mistura da resina com os diversos aditivos [45]	22
Figura 11 - Sistema de guiamento das fibras, acoplado à fieira [45]	23
Figura 12 - Sistema de desbobinagem e corte dos rolos das mantas, em largura [45]	24
Figura 13 - Fieiras utilizadas na pultrusão [47]	25
Figura 14 - Sistemas de traccionamento dos perfis na pultrusão: (a) sistema recíproco e (b) sistema de lagartas	26
Figura 15 - Aspecto do sistema de corte normalmente acoplado às máquinas de pultrusão [45] ..	27
Figura 16 - Evolução da temperatura ao longo da fieira, tendo em conta as diversas fontes de calor [6]	29
Figura 17 - Comportamento esperado da variação de viscosidade em função da temperatura de uma resina fenólica no interior da fieira aquecida [50]	30
Figura 18 - Temperatura e pressão no perfil ao longo da fieira [53].....	30
Figura 19 - Processo de cura ao longo da fieira [6, 8]	31
Figura 20 - As diferentes matérias-primas utilizadas num perfil pultrudido [54]	32
Figura 21 - 'Roving' (a) sob a forma de filamento contínuo [57] e (b) sob a forma de filamento repuxado [58]	32
Figura 22 – Mantas sob a forma de 'Continuous Strand Mat'(a) e 'Shopped Strand Mat'(b) [57].....	33
Figura 23 - Tecido utilizado no fabrico de alguns PRF [57].....	34
Figura 24 - Aspecto do véu utilizado na produção de PRF [63]	35

Figura 25 - Comparação entre algumas propriedades mecânicas dos compósitos e de outros materiais de uso comum [66].....	36
Figura 26 - Gráficos comparativos de algumas propriedades dos PRFV relativamente a outros materiais de uso corrente em Engenharia [Adaptado de 65]	37
Figura 27 - Pultrusão (a) com injeção de resina e (b) em banho aberto	42
Figura 28 - Exemplos de geometrias possíveis para produtos pultrudidos [76]	43
Figura 29 - Ponte de Aberfeldy (Escócia), construída em perfis pultrudidos [33]	44
Figura 30 - Ponte de Lérida (Espanha) totalmente construída em perfis pultrudidos [68]	44
Figura 31 - Aplicação de perfis pultrudidos numa ETAR [46].....	45
Figura 32 - Aplicação de perfis pultrudidos numa ETAR (Leiria) [46].....	45
Figura 33 - Aplicação de perfis pultrudidos e gradil numa ETAR [46].	45
Figura 34 - Estruturas de varandins em perfil pultrudido [46].....	46
Figura 35 - Estrutura de uma cobertura e escadas de acesso, realizadas em perfis pultrudidos [59, 60]	46
Figura 36 - Porta de posto de transformação com estrutura executada com perfil pultrudido [46]	47
Figura 37 - Aspecto do 'layout' inicial da máquina de pultrusão [ALTO].....	48
Figura 38 - Aspecto do sistema de suporte e guiamento das mantas e véus [ALTO].....	49
Figura 39 - Aspecto da fieira e do respectivo sistema de aquecimento [ALTO].....	49
Figura 40 – Desenho 3D da estrutura de suporte e guiamento das mantas e véus.....	53
Figura 41 - Pormenor do sistema de encaixe dos pilares verticais no estrado da estrutura	55
Figura 42 - Pormenor do sistema de encaixe dos veios nos pilares verticais	55
Figura 43 - Pormenor do sistema de fixação dos rolos de manta e de véu nos eixos.....	56
Figura 44 - Imagem da estrutura já em serviço	56
Figura 45 – Aspecto da simulação da carga considerada sobre o veio encastrado	57
Figura 46 - Esforços resultantes da análise à flexão.....	58
Figura 47 - Análise da solicitação ao corte.....	58
Figura 48 - Análise dos esforços de flexão	59
Figura 49 - Análise de solicitação à flexa.....	59
Figura 50 – Representação esquemática das solicitações e apoio da viga e do eixo	60
Figura 51 – Representação esquemática das cargas e apoios	62
Figura 52 – Representação esquemática das solicitações.....	62
Figura 53 – Diagrama esquemático das solicitações impostas à viga de suporte vertical e eixo de suporte do rolo das mantas, pelo critério de Von Mises.....	64
Figura 54 – Diagrama esquemático dos deslocamentos impostos à viga de suporte vertical e eixo de suporte do rolo das mantas	64

Figura 55 – Diagrama de tensões equivalentes impostas à viga de suporte vertical e eixo de suporte do rolo das mantas.....	65
Figura 56 – Diagrama dos Coeficientes de Segurança presentes no sistema	65
Figura 57 - Pormenor do sistema inicial de aquecimento da fieira	67
Figura 58 - Pormenor da modelação 3D utilizada no software de simulação (meia-fieira).....	68
Figura 59 - Imagens resultantes da análise termográfica de uma das superfícies laterais da fieira em estudo (análise realizada em dois segmentos ao longo da fieira).....	69
Figura 60 - Perfil de temperatura ao longo da fieira, resultante da análise termográfica (entrada da fieira do lado esquerdo e saída da fieira do lado direito).....	70
Figura 61 - Modulação 3D do sistema inicial de aquecimento da fieira	71
Figura 62 - Modulação da distribuição da temperatura na fieira em regime estável de funcionamento	71
Figura 63 - Simulação do funcionamento das resistências no sistema inicial de aquecimento	73
Figura 64 - Disposição dos diferentes pares de resistências ao longo da fieira	74
Figura 65 - Simulação do funcionamento do par de resistências 1	74
Figura 66 - Simulação do funcionamento do par de resistências 3	75
Figura 67 - Simulação do funcionamento do par de resistências 4	75
Figura 68 - Imagem ilustrativa da aplicação dos quatro pares de resistências cilíndricas na fieira ..	77
Figura 69 - Imagem dos sistemas de guiamento inicial e intermédio das fibras	78
Figura 70 - Imagem 3D do sistema de guiamento final das fibras	81
Figura 71 - Esquema do sistema de guiamento final das fibras (a verde) já inserido no equipamento de pultrusão, usando os apoios tubulares como referência.....	81
Figura 72 - Imagem que ilustra o sistema projectado já instalado no equipamento de pultrusão e em funcionamento	82
Figura 73 - Alçado lateral da tina projectada, com o respectivo “fundo falso” e os canais de distribuição e recolha de água	85
Figura 74 - Vista em corte da geometria da tina, mostrando o “fundo falso” por onde circulará a água que manterá constante a temperatura da resina na tina	85
Figura 75 - (a) Aspecto geral da tina e (b) pormenor do distribuidor de água	86
Figura 76 - Aspecto geral do projecto inicialmente desenvolvido para a centragem e fixação da fieira na mesa de trabalho do equipamento de pultrusão.....	87
Figura 77 - Aspecto do centrador longitudinal que garante o posicionamento axialmente correcto da fieira	88
Figura 78 - Aspecto do esbarro responsável pelo bloqueio mecânico longitudinal da fieira	88
Figura 79 - Perspectiva isométrica da configuração do equipamento de pultrusão após todas as intervenções planeadas e implementadas	89

Figura 80 - Vista do alçado lateral do equipamento de pultrusão após todas as intervenções planeadas e implementadas, com indicação das diferentes fases do projecto.....90

1. Introdução

Enquadramento

A Pultrusão é, actualmente, um processo incontornável na produção de perfis estruturais e decorativos em plástico reforçado com fibra de vidro. Apesar do processo ter sido inventado nos anos 50, são ainda muitos aqueles que desconhecem as potencialidade de aplicação deste tipo de produto. Por outro lado, aqueles que conhecem este tipo de produtos, abdicam do seu uso por não pesarem convenientemente as suas vantagens de utilização ou, por inércia própria à mudança, optam pelos habituais perfis em aço ou liga de alumínio.

Apesar do seu meio século de existência, não são conhecidas muitas publicações científicas sobre o processo de pultrusão. Existem alguns (muito poucos) livros de referência sobre o assunto mas, em termos de artigos científicos publicados em revistas de divulgação mundial, é raro encontrar-se estudos elaborados com base neste processo.

No entanto, a pultrusão é utilizada em termos industriais em vários países europeus e nem sempre explorada da forma mais conveniente.

Consciente de que havia melhorias a introduzir neste processo produtivo, a *ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda* mostrou-se interessada na elaboração de um estudo mais aprofundado do processo, com vista à optimização dos tempos de fabrico (preparação e produção), melhoria da ergonomia e segurança no trabalho e maximização da garantia de qualidade do produto, minimizando a produção de perfis defeituosos. Surge, assim, a oportunidade de elaboração deste trabalho, que tem como principal objectivo remodelar uma das linhas de produção da ALTO tendo em vista os vectores de actuação acima delineados.

Objectivos

Este trabalho teve por principal objectivo optimizar o funcionamento de uma máquina de pultrusão instalada na *ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda.*, atuando ao nível do projecto e implementação de novos sistemas agregados à máquina principal, de modo a permitir:

- Minimizar o tempo de preparação de cada ordem de produção;
- Minimizar o risco de acidente para os operários durante o processo de preparação;
- Maximizar o conforto no trabalho durante as operações de preparação;

- Agilizar o processo de desmontagem, montagem, suporte e guiamento das mantas;
- Facilitar a operação de montagem e posicionamento das fibras para cada tipo de perfil, através de um sistema que garanta a qualidade e minimize o esforço de raciocínio do operário em cada operação de preparação;
- Minimizar o risco de cura da resina na tina de impregnação;
- Minimizar o tempo de mudança da feira.

Estes objectivos, quando conseguidos de uma forma conjugada, permitirão atingir os objectivos principais deste trabalho, que são:

- Minimizar os tempos de preparação entre operações de produção;
- Diminuir os riscos de acidentes com os operários;
- Melhorar o Sistema de Garantia da Qualidade no processo.

Metodologia

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

- Visita à empresa para contacto directo com o processo;
- Análise e levantamento da situação relativa a todos os pormenores passíveis de melhoria, apontados tanto pelos gestores da empresa como pelos operadores;
- Pesquisa bibliográfica sobre o processo de pultrusão em geral e sobre os diferentes equipamentos utilizados em outras empresas para a realização de perfis pultrudidos;
- Anteprojecto dos sistemas passíveis de melhoria;
- Selecção e aprovação prévia pelos gestores da empresa dos sistemas criados em anteprojecto;
- Projecto dos sistemas aprovados;
- Implementação dos sistemas aprovados para implementação por parte da empresa;
- Teste das novas soluções e comparação com as soluções inicialmente instaladas;
- Redacção da presente Dissertação.

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 anteprojectos e projectos desenvolvidos, respectiva implementação e teste, com indicação das vantagens conseguidas com os novos sistemas implementados.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Compósitos

2.1.1. Os materiais compósitos de matriz polimérica: introdução

Os materiais compósitos pertencem à categoria de novos materiais e são definidos como uma combinação de dois ou mais materiais distintos, sendo que, após combinados, possuem características melhores que as patenteadas por cada um destes isoladamente. Existem diferentes combinações e materiais para a criação de compósitos. Estes materiais podem ser classificados segundo vários critérios sendo que a classificação de acordo com o tipo de matriz do material compósito é a mais importante. Estas matrizes podem ser do tipo polimérica, metálica, cerâmica ou cimentosa [1, 2].

Os compósitos de matriz polimérica são dos materiais mais utilizados actualmente, devido à sua baixa densidade e facilidade de processamento. Resultando do princípio de heterogeneidade, os materiais compósitos são constituídos essencialmente por duas fases. Uma delas apresenta grande resistência, elevado módulo de elasticidade e tem a forma de filamentos de pequeno diâmetro – AS FIBRAS. A outra fase é macia e tem características sinérgicas – A MATRIZ. Esta última, sendo relativamente dúctil, envolve completamente a primeira fase, permitindo boa transferência de tensões entre as fibras interlaminares e o plano (conceito de sinergia) [3, 4]. Uma das associações mais comuns, para a área de polímeros, consiste na mistura de fibras com polímeros. Os compósitos poliméricos são basicamente constituídos por uma fase polimérica, denominada matriz, reforçada por uma fase descontínua, constituída por reforços ou fibras. Além desses constituintes, também podem ser incorporados aditivos no material, tais como pigmentos, agentes catalizadores, retardadores de chama, etc. Para o fabrico adequado do compósito polimérico tem que ocorrer a cura da resina. A cura caracteriza-se pela reação de polimerização da resina sobre o reforço utilizado, conferindo uma determinada resistência mecânica e química ao material, bem como alterações físicas significativas, como variações de massa específica e viscosidade entre outras [5, 6]. Os compósitos podem ser produzidos por diversos processos tais como: enrolamento filamentar, Resin transfer molding (RTM), pultrusão, etc. A eficiência dos polímeros reforçados com fibras (PRF) depende largamente da escolha apropriada dos seus constituintes.

Assim, deveremos ter em consideração o seguinte [7]:

- Propriedades das fibras;
- Comprimento, orientação, forma e composição das fibras;
- Propriedades mecânicas da matriz;
- Propriedades mecânicas do adesivo;
- Adesão entre fibras e matriz;
- Proporção da mistura e método de aplicação;
- Detalhe do projecto, que deve contemplar as especificações de aplicação, incluindo as condições do ambiente.

2.1.2. Matriz

A função das resinas nos PRF é a de constituir a matriz dos mesmos, ou seja, o elemento que suporta e aglutina as fibras na posição desejada e que as protege de agressões físicas e químicas que actuam no meio, bem como, impor determinadas propriedades desejáveis ao produto compósito final. Mediante as diferentes solicitações que podem ser impostas ao perfil, existem diferentes tipos de resinas que podem ser utilizados. A sua selecção vai conferir propriedades ao compósito tais como: resistência à corrosão, propriedades dieléctricas, inflamabilidade, condutividade térmica e resistência a altas temperaturas.

A oferta de resinas para matrizes é, hoje em dia, muito diversificada. Estas podem agrupar-se em termoplásticas, termoendurecíveis das quais, as termoplásticas, são menos representativas para as aplicações em pultrusão, excepto em configurações mais recentes com pré-impregnados. Já as termoendurecíveis representam a matriz ideal para conceber este tipo de compósito porque proporcionam boa estabilidade térmica, boa resistência química e baixa fluência em relação às primeiras.

2.1.2.1. Matriz Termoendurecível

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas que, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados e reaquecidos, ou seja, uma vez aquecidos, assumem uma forma permanente. São fornecidas para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Quando estes componentes são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo que se designa habitualmente por “cura”. Algumas resinas requerem a aplicação adicional de calor e pressão para se efectuar a cura. Noutras, porém, a cura ocorre à temperatura ambiente [6, 8].

Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores às dos termoplásticos. Devido a esta viscosidade, requerem menores pressões e temperaturas no processamento [2, 9].

Os plásticos termoendurecíveis mantêm as suas características e forma, mesmo quando aquecidos. Isso faz com que os termoendurecíveis sejam mais adequados para a produção de componentes permanentes e de grande porte, possuindo formas sólidas. Estes componentes têm atributos de excelente resistência mecânica, e não se tornam mais frágeis quando há oscilações de temperatura ou temperaturas elevadas.

Os tipos mais comuns de compósitos termoendurecíveis são os de matriz poliéster, sendo que os à base poliéster, silicones, compostos fenólicos e a borracha vulcanizada são também excelentes alternativas [1, 9].

2.1.2.1.1. Resinas de Poliéster

Em geral, as resinas de poliéster de alto desempenho são as mais usadas no processo de pultrusão devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e bom compromisso entre propriedades mecânicas, eléctricas e químicas (baixa viscosidade, tempo de cura rápido, dimensionalmente estáveis). Quando combinadas com um enchimento adequado, catalisadores, inibidores de UV e pigmentos para a formulação da matriz resinosa que une as fibras, oferecem a resistência estrutural necessária. Estas resinas podem ser ortoftálicas, com aplicação geral, isoftálicas com características melhoradas, possuindo boa resistência térmica ou bisfenólicas, usadas em meios particularmente agressivos (ácidos) [2, 6]. O principal inconveniente destas resinas é a elevada retração volumétrica durante o seu processamento, o que pode criar tensões residuais internas que colidam com a função a que os produtos se destinam [6].

2.1.2.1.2. Resinas de Viniléster

As resinas de Viniléster são usadas principalmente para melhorar a resistência química (essencialmente, em meios fortemente agressivos - corrosão) e também para proporcionar um melhor acoplamento com os reforços. A sua resistência à corrosão é elevada, apresentando ainda boas propriedades mecânicas a altas temperaturas. A sua principal desvantagem, para além do custo significativo, apesar de inferior ao da resina de epóxido, é o facto de possuir uma

elevada retração volumétrica durante o processamento da cura. Estas resinas melhoram e até superam as outras relativamente às resistências mecânica e ao impacto. Isso pode ser importante em termos de resistências mecânica e química e quando se necessita de baixa densidade [2, 6, 10].

2.1.2.1.3. Resinas Epóxicas

Relativamente às resinas Epóxicas estas conseguem realizar um produto mais forte e produzir peças tipicamente 20-30% mais fortes do que poliésteres. Contudo, são materiais bastante caros. O tipo de perfis que usa estas resinas pode trabalhar continuamente a temperaturas que rondam os 150 °C sem que haja alterações nas suas características (capacidade de resistência a esforços, à fluência e à agressividade química), pela forte ligação às fibras de reforço, pela boa condutibilidade eléctrica, assim como, por apresentarem baixa retração durante o processamento da cura. O módulo de corte, assim como outras propriedades mecânicas e químicas, são bastantes melhores do que as de poliéster e viniléster. O seu processo de cura é mais demorado, o que afecta a cadência de produção [2, 6, 10].

2.1.2.1.4. Resumo das propriedades das diferentes resinas termoendurecíveis

No quadro seguinte pretende-se comparar as principais propriedades de algumas das resinas termoendurecíveis disponíveis no mercado.

Tabela 1 - Propriedades gerais das principais resinas termoendurecíveis [11]

Resinas	Poliéster	Epóxico	Viniléster	BMI	Poliimida	PEEK
Propriedades						
Resistência à tração (MPa)	20 - 100	55-130	79-90	40-100	40-190	103
Módulo de elasticidade (GPa)	2,1-4,1	2,5-4,1	3-3,3	2,7-4	3 - 5	1,1
Deformação na rotura (%)	1-6	1-9	3.9-5.2	1.2-6.6	1 - 60	30-150
Resistência à flexão (MPa)	125	131	110-149	-	-	-
Peso específico (kN/m³)	9,8-14,2	10,8-12,7	10,9-12,9	11,8	12,7-13,7	12,7
Temperatura de Transição Vítre (Tg) (°C)	100-140	50-260	119-280	220-320	210-340	144
Coefficiente de Expansão Térmica (µm/m/°C)	55-100	45-90	-	21-73	14-50	55

A Figura 1 ilustra o diagrama das curvas de tensão - deformação para os três sistemas de resinas, considerando que foram sujeitas a cura a 80 °C durante cinco horas.

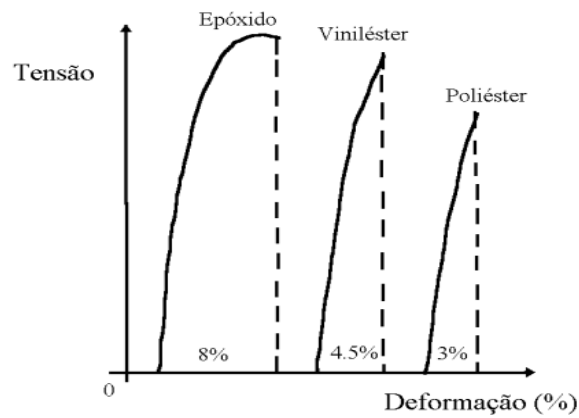


Figura 1 - Curvas Tensão - Deformação para PRF com três diferentes resinas, depois de uma cura de 5 horas a 80 °C [12]

Na tabela seguinte poderão ser observadas mais algumas propriedades das principais resinas termoendurecíveis anteriormente referidas, assim como vantagens e desvantagens da sua aplicação.

Tabela 2 - Propriedades das resinas termoendurecíveis anteriormente referidas [13]

Propriedades das resinas			
Propriedade	Poliéster	Viniléster	Epóxi
Resistência à Tração (MPa)	77,2	81,4	75,8
Módulo de elasticidade (GPa)		3,4	3,3
Alongamento%	4,2	4,5	6,3
Resistência à flexão (MPa)	123	134	115
Módulo de Flexão (GPa)	3,2	3,1	3,3
Temperatura de distorção (°C)	77	99	166
Peso específico (kg/m³)	1,13	1,12	1,28

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da aplicação de cada tipo de resina [2, 6, 10]

Resina	Vantagens	Desvantagens
Poliéster	Fácil aplicação Baixo custo de aquisição	Propriedades mecânicas moderadas Rápida polimerização Aplicações limitadas Altas emissões de estireno quando expostas ao ar.
Vinilester	Elevada resistência a produtos químicos e erosão Melhores propriedades mecânicas que as poliéster	Processo de pós cura para obtenção de melhores propriedades Alta contenção de estireno Mais caras que as de poliéster Bastante contração após cura
Epoxy	Altas propriedades mecânicas e térmicas Pouco higroscópica Maior tempo de vida Pouca contração do material após cura	Mais cara que as vinilester Mistura crítica

2.1.2.2. Matriz Termoplástica

Os termoplásticos, tal como o próprio nome indica, são plásticos que se podem tornar moldáveis quando se desejar através de aquecimento, seguido de endurecimento quando arrefecidos. As matrizes termoplásticas são formadas a partir de macro moléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. Estas moléculas de grandes dimensões são mantidas nos seus lugares à custa de ligações secundárias (forças intermoleculares). Quando se aquecem os polímeros termoplásticos, estas ligações são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular de forma a modelarem-se novas posições. Com o posterior arrefecimento, as moléculas como que ‘congelam’ nas posições entretanto alcançadas, restabelecendo-se as ligações químicas primitivas. Este processo é reversível, o que significa que os termoplásticos podem ser aquecidos e arrefecidos, processados e reprocessados as vezes que forem necessárias sem perda das suas características.

Os termoplásticos salientam-se por apresentarem:

- Maior resistência ao impacto;
- Maior tenacidade;
- Pouco tendência à absorção de humidade quando comparados com os polímeros termoendurecíveis;
- Facilidade de adaptação aos processos mais comuns de fabrico, como a moldação por injeção ou a termoformação;
- Normalmente são mais facilmente processados [14].

Para além destes aspectos, salienta-se ainda a sua fácil reciclagem, o que constitui um ponto importante nos dias de hoje.

A este grupo de plásticos pertencem as poliamidas, os policarbonatos, os poliésteres, o polietileno, o polipropileno, o poliácridonitrilo, o poliestireno, o poliacetato de vinilo e os poliuretanos lineares. Este tipo de plásticos é formado por moléculas filiformes paralelas, com muito poucas ou mesmo sem ligações entre elas [2, 6, 9, 10, 14].

2.1.3. Reforços

Os PRF podem usar uma grande variedade de reforços fibrosos para uma mesma matriz, permitindo a obtenção de um material compósito com um amplo espectro de propriedades, uma vez que cada par fibra + resina apresenta o seu próprio leque de propriedades.

A ASTM - *American Society for Testing Materials*, através do seu grupo de trabalho *Committee D30*, define fibras como materiais alongados com uma razão entre comprimento e espessura de 10/1, no mínimo, com uma secção transversal máxima de $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ e espessura máxima de 0,25 mm. As fibras mais usuais são do tipo vidro (G), o carbono (C) e aramida (A). Constroem-se os respectivos compósitos reforçados denominados internacionalmente por GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) e AFRP (poliamide aromática Aramid Fiber Reinforced Polymer) [4, 15,16].

2.1.3.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro (Calcium aluminoborosilicate), que constituem o tipo de reforço mais utilizado, são obtidas pela fusão e obtenção de fibras de óxidos metálicos (óxidos de silício, sódio, cálcio, alumínio, potássio, entre outros). Esses óxidos são analisados, moídos, doseados, misturados e alimentados em fornos de fusão para posterior transformação em fibras [17], as quais são produzidas por estiramento a alta velocidade do vidro fundido (temperatura de fusão de 1260 °C) através de uma fieira em liga de platina-ródio, com orifícios de dimensões muito precisas entre 0,79 mm a 3,18 mm. Os varões resultantes são estirados para filamentos contínuos com diâmetro compreendido entre 3 µm a 20 µm e sofrem, à saída, um tratamento de superfície polivalente. O revestimento pode ser têxtil para o fabrico de tecidos sem risco de danificação da fibra, ou revestimento plástico. Para permitir a compatibilização da fibra com as matrizes estes revestimentos contêm, em geral, um ligante que mantém os filamentos unidos, um agente de adesão para facilitar a adesão fibra-matriz, um lubrificante e agentes anti-estáticos ou de impregnação.

Uma vez que as fibras de vidro são fortemente higroscópicas, o revestimento tem, também, a função de impedir o contacto com a humidade, evitando-se deste modo a destruição da interface fibra – matriz [2, 6]. Actualmente, dividem-se em três categorias, de acordo com as suas características (**Tabela 4**) em: E “*Electrical*” (elétrico), C “*Chemical*” (químico) e S “*High Tensile Strength*” (alta resistência) [18].

A mais comum é a fibra de vidro tipo E, apresentando resistência à tração de aproximadamente 3450 MPa e um módulo de elasticidade de 72 GPa, com relativa baixa taxa de alongamento: cerca de 3 a 4%, apresentando simultaneamente um custo bastante reduzido [6, 10] (Tabela 4).

Tabela 4 - Classes de fibra de vidro e respectivas propriedades [18]

Classe de Fibra de vidro	Características
E	Alta resistência e alto módulo de elasticidade; Bom isolante elétrico.
C	Alta resistência à corrosão; Baixa propriedade de resistência.
S	Alto módulo à corrosão; Resistente a altas temperaturas.

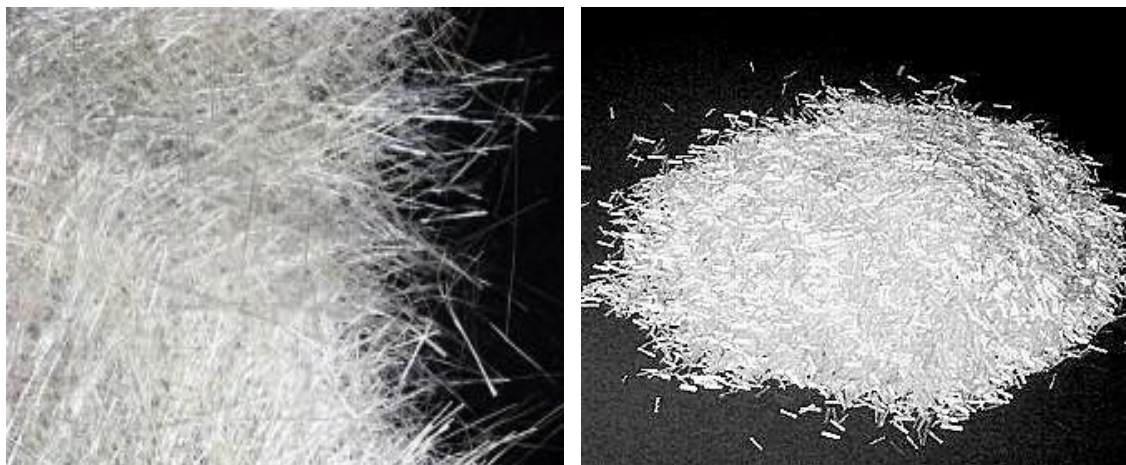


Figura 2 - Fibras de vidro longas e curtas [20]

A fibra de vidro tipo S apresenta resistência à tração de 4600 MPa e módulo de Young de aproximadamente 86 GPa, sendo utilizada para aplicações de alto desempenho [10].

2.1.3.2. Fibras de carbono

As fibras de carbono podem ser essencialmente de dois tipos: tipo I, com percentagens de carbono entre 80% e 95%, ou tipo II, com percentagem de carbono superior a 95%, chamadas fibras de grafite, para aplicações exigentes como a aeronáutica e a indústria aeroespacial. A produção de fibras de carbono centra-se na decomposição térmica de vários precursores orgânicos. Podemos apresentar três tipos de processos de obtenção: as fibras produzidas a partir da celulose (designadas por “*rayon fibers*”), e que exigem elevadíssimas temperaturas na grafitação, tornando o processo muito dispendioso; as fibras produzidas a partir de Poliácilonitril (PAN) - actualmente as mais utilizadas, e as fibras produzidas a partir do alcatrão derivado do petróleo destilado (“*pitch*”), que apresentam propriedades mecânicas ligeiramente inferiores.

As principais vantagens em recorrer a fibras de carbono traduzem-se nos valores elevados das razões rigidez/peso específico e resistência/peso específico, nos baixos valores do coeficiente de dilatação térmica, quer longitudinal quer transversal, na reduzida sensibilidade à fadiga e nas excelentes resistências química e à humidade. Contudo, as mesmas fibras têm como principal inconveniente o baixo valor de resistência ao impacto manifestada pela sua baixa deformação na rotura e, eventualmente, conforme a circunstância da aplicação, o poder tratar-se de um material bom condutor térmico e eléctrico (Tabela 5) [21, 22, 23].

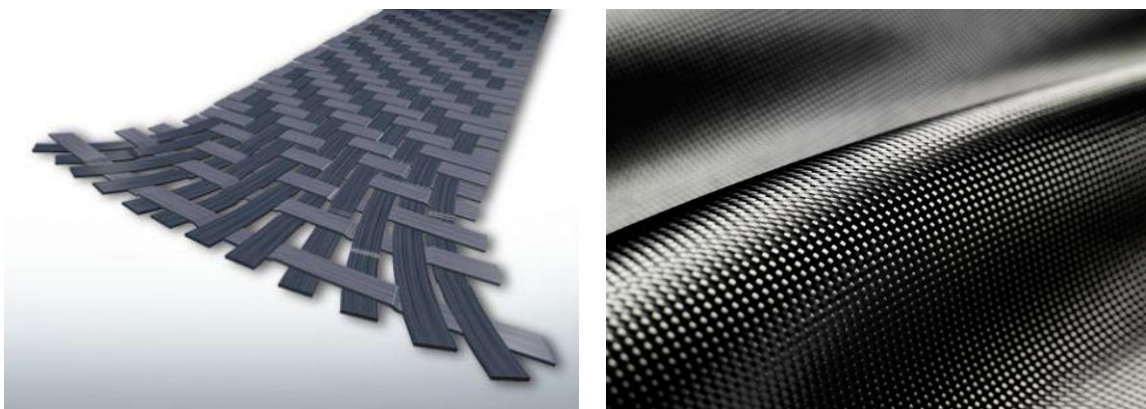


Figura 3 - Mantas constituídas à base de fibras de carbono [24]

2.1.3.3. Fibras Aramídicas

As fibras aramídicas são produzidas com base em poliamidas aromáticas. "Aramida" é a denominação genérica das fibras orgânicas de poliamida aromática (Polyparaphenylene-terephthalamide).

O processamento das fibras de aramida é realizado por corte de um polímero em solução cristalina ainda líquida, com moléculas orientadas parcialmente. Desse modo, resultam fibras cujas moléculas rígidas são alinhadas segundo o eixo da fibra de menor complexidade, o que proporciona propriedades mecânicas vantajosas, concretamente, elevadas resistência e módulo de elasticidade. A solução de polímero é mantida a baixa temperatura (entre -50 °C e -80 °C) e depois extrudada a uma temperatura de aproximadamente 200 °C. Distinguem-se ainda aspectos como o baixo peso específico das fibras, a elevada resistência à tração e a excelente tenacidade, a qual contribui com bons resultados em situações de choque ou fadiga e, ainda, com uma boa capacidade de amortecimento de vibrações como exemplo, a balística.

Em contrapartida, estas fibras são bastante caras e possuem propriedades modestas à flexão e à compressão, em consequência da microestrutura fibrilar das fibras. Apresentam, ainda, um comportamento algo permissivo à fluência devido à interação da água com as moléculas e com a cristalografia estrutural das fibras de aramida, quando expostas à humidade e sofrem degradação das fibras quando expostas a radiações ultravioletas [2, 25, 26, 27, 28].

2.1.3.4. Fibras de Boro

As fibras de boro são produzidas por deposição de boro em fase de vapor sobre um fio de tungsténio ou carbono, que actuam como substrato. O diâmetro das fibras que atua como substrato é de cerca de 12 µm e o resultado, após deposição do boro, é uma fibra que pode atingir os 200 µm. As fibras de boro utilizam-se na forma de fitas pré-impregnadas numa resina de epóxico, fenólica ou poliimidica. Pelo seu elevado custo, os compósitos com fibras de boro aplicam-se sobretudo na indústria aeronáutica. [2]

2.1.3.5. Resumo das principais propriedades das fibras de reforço

Os quadros seguintes tentam sintetizar as principais propriedades das fibras utilizadas como reforços nos PRF.

Tabela 5 - Propriedades principais das fibras usualmente utilizadas como reforço nos PRF [2]

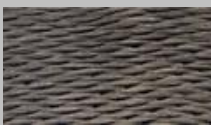

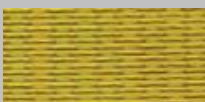
Tipo de fibra	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência tração (MPa)	Deformação (%)	Cor
Carbono				
Corrente	220 – 235	2 050 – 3 790	>1,2	
Alta resistência	220 – 235	3 790 – 4 825	>1,4	
Elevada resistência	220 – 235	4 825 – 6 200	>1,5	
Módulo alto	345 – 525	1 725 – 3 100	>0,5	
Módulo elevado	515 – 690	1 375 – 2 410	>0,2	
Vidro				
Vidro E	69 – 72	1 860 – 2 685	>4,5	
Vidro S	86 - 90	3 445 – 4 825	>5,4	
Aramida				
Corrente	69 – 83	3 445 – 4 135	>2,5	
Elevado desempenho	110 – 124	3 445 – 4 135	>1,6	

Tabela 6 - Propriedades principais de algumas fibras utilizadas como reforço nos PRF [11]

Propriedades	Carbono (E elevado) (Pitch)	Carbono (E intermédio) (PAN)	Carbono (E baixo) (PAN)	Aramida	Polietileno UHMW	Vidro - E
Resistência à tração (GPa)	2,4 (a)	2,9 (a)	2,8 – 4,1 (a)	2,6 – 3,0 (b)	1,9 (a)	3,7 (a)
Mod. De elasticidade (GPa)	830	390	290	80 - 190	120 - 170	72
Deformação na rutura (%)	0,3	0,7	1,8	2,0 – 4,0	2,7 – 3,5	4,8
Peso específico (kN/m ³)	21,6	17,6	17,6	13,7 – 4,7	9,8	25,5
Diâmetro (µm)	10	6,5	5,1	12	27 - 38	2 – 20
Coef. Dilat. Térmica Longitudinal (x10 ⁻⁶ /°C)	-0,45	-1,13	-0,75	-2	-10	4,8 – 5,4
Constante Dielétrica (@1 MHz)	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	6,3 – 6,8
Resistividade (µΩ-m)	2,2	9,5	15	NQ	NQ	402x10 ¹⁸

Devido à natureza heterogénea da ligação fibra/matriz plástica no compósito, é possível formar mecanismos com grande absorção de energia numa reduzida escala de deformações [15, 16].

2.2. Pultrusão

2.2.1. Factos históricos relacionados com o processo de pultrusão

Nascido nos EUA nos anos 50, a pultrusão (*the pultrusion*) é um processo que permite a obtenção de materiais compósitos a partir de resina e fibras. O termo surge a partir da junção das palavras *pull* (puxar) e *extrusion* (extrusão). W. Brandt Goldsworthy é reconhecidamente considerado como o inventor da pultrusão, com a construção do primeiro equipamento idealizado e conseqüente lançamento da patente em 1951 [6, 29].

A partir da sua criação, este processo começou a ganhar notoriedade devido à capacidade de produzir compósitos de secção transversal constante, altamente resistente e com elevada taxa de produção, comparada com outros processos previamente existentes como seja o caso do BMC (*Bulk Moulding Compound*), amplamente difundido na época.

As características obtidas neste tipo de materiais proporcionaram um certo destaque comercial, propiciando o crescimento da indústria de pultrusão nos EUA e, subsequentemente, na Europa. A partir dos anos 70, devido às vantagens que patenteia, começaram a surgir aplicações directas na construção de utensílios domésticos tais como pás e escadas. Já nos anos 80, surgiram as primeiras aplicações na construção civil, principalmente na construção de pontes e passadiços, passando posteriormente a ser aplicado em estruturas de automóveis, ampliando significativamente o campo de utilização dos produtos pultrudidos [6].

No século XX, a investigação na área da ciência dos materiais proporcionou aos engenheiros uma certa curiosidade na linha de orientação dos novos materiais destacando-se com êxito, os compósitos [6, 10].

2.2.2. O processo de pultrusão

A Pultrusão poderá definir-se como sendo um processo de obtenção de materiais compósitos, sendo o único processo contínuo e automático capaz de produzir peças de secção transversal constante. Devido à uniformidade do corte transversal, a dispersão de resina, bem como a distribuição e alinhamento das fibras, são realizados mais facilmente, conseguindo-se excelentes materiais compósitos estruturais, como os indicados na Figura 4.

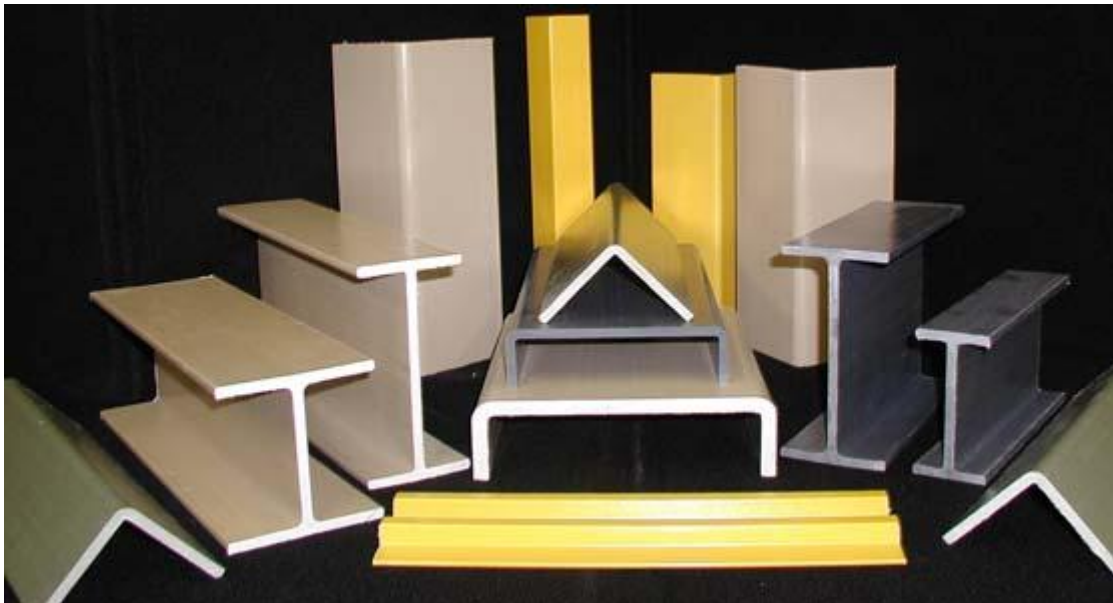


Figura 4 - Exemplo de perfis obtidos por pultrusão [30]

O processo consiste geralmente em puxar fibras contínuas dispostas em bobines denominadas por roving, sendo estas fibras contínuas conduzidas posteriormente para uma tina onde são impregnadas com resina previamente formulada, consoante as especificações do cliente.

Depois de impregnadas, estas são conduzidas para a entrada da fieira (matriz). Durante este processo as fibras saem aleatoriamente da tina e começam a ser guiadas através de placas que vão pré-definindo a forma desejada para o perfil a produzir, retirando simultaneamente os excedentes de resina. Nesta etapa podem ser adicionadas mantas e/ou véu de superfície ao perfil, consoante o pretendido [6, 8, 9, 14, 31-41].

A fieira de aço tem a forma do perfil, sendo previamente maquinado com bastante precisão e dotado de um revestimento designado por cromagem dura [6] para resistir à abrasão provocada pela passagem das fibras e facilitar o seu deslizamento. Para as fibras ganharem consistência, é necessária a polimerização da resina, ou seja, a cura, sendo que para que se

realize esta polimerização é necessário aquecer a feira até atingir a temperatura necessária para o efeito [6, 33, 36, 39, 40, 42]. Esse aquecimento pode ser obtido a partir de resistências eléctricas, as quais actuam normalmente por contacto no exterior das feiras (parte superior e inferior), passando o calor à feira por condução. Porém, o sistema de aquecimento pode ser efectuado através de resistências internas ou outros métodos como vapor, banhos de óleo ou possuir secções de pré aquecimento [6].

A configuração de uma máquina de pultrusão e todos os equipamentos que lhe são adjacentes está representada de forma esquemática na Figura 5, e será dissecada mais à frente.

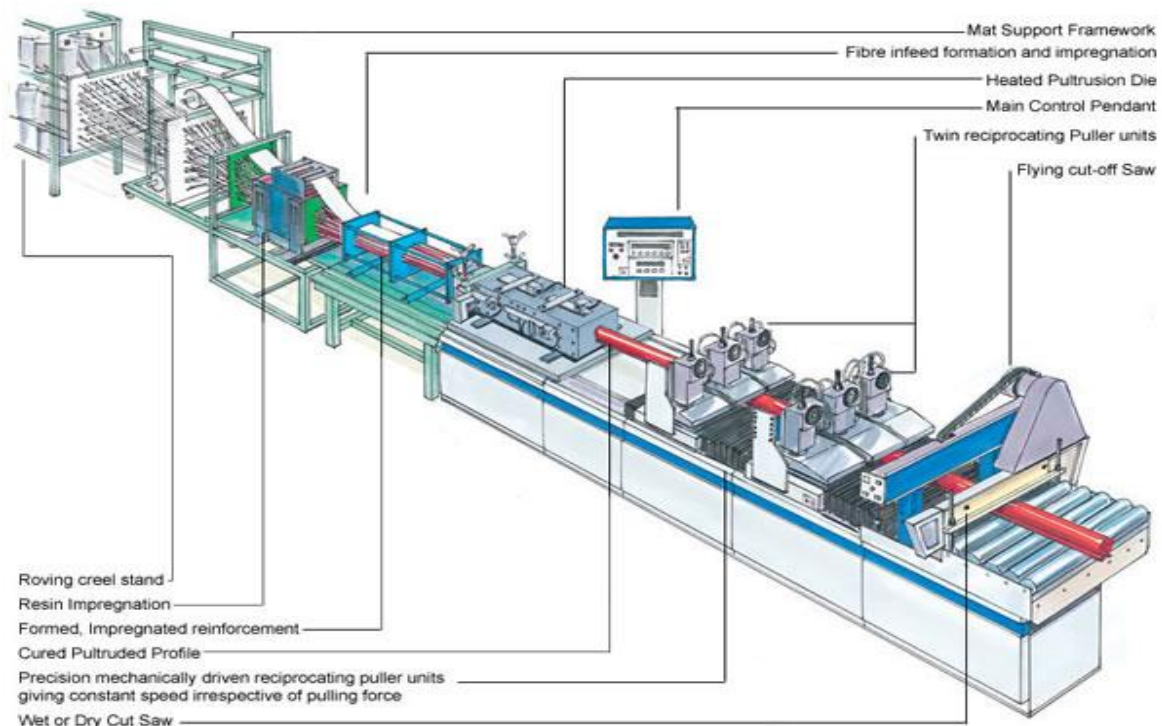


Figura 5 – Máquina de pultrusão e respectiva envolvente [Adaptado de 44]

2.2.4. Componentes de uma máquina de pultrusão

Conforme já mostrado na Figura 5, uma máquina de pultrusão é constituída por diferentes equipamentos, dispostos em linha, cada um dos quais com uma missão bem definida. A capacidade dos equipamentos de pultrusão é definida em função dos produtos que se pretende fabricar, dando origem a diferentes necessidades, as quais são salvaguardadas por diferentes equipamentos fornecidos pelos fabricantes deste tipo de máquinas. Seguidamente poderemos observar um quadro que ilustra as capacidades de quatro diferentes equipamentos de pultrusão, sendo possível também observar os parâmetros que caracterizam esses mesmos equipamentos. No quadro seguinte poderemos observar que as principais propriedades que definem a máquina são a força de tração imposta ao perfil e as dimensões máximas do perfil a produzir.

Model	AIHP-PNGR-06	AIHP-PNGR-08	AIHP-PNGR-10	AIHP-PNGR-12
Pulling Capacity	6000 kgf.	8000 kgf.	10000 kgf	12000 kgf
Product Size Width X Height	350 X 100	500 X 150	600 X 150	600 X 200
Pulling Speed mm / min	80 - 1400	80 - 1400	80 - 1200	80 - 1200
Gripper Length	600 mm	650 mm	650 mm	650 mm
No. of Grippers	1 - 2	2 - 3	2 - 3	2 - 4
Heating Zone	4 [16 Amp. Each]	6 - 9 [16 Amp. Each]	6 - 9 [16 Amp. Each]	6 - 12 [16 Amp. Each]
Moving Putter Size Width X Length mm	800 X 650	800 X 650	800 X 650	800 X 650 & 1000 X 650
Putter Stroke in mm	700	800	800	800
Die Clamping Area Width X Length mm	800 X 1000	1000 X 1000	1000 X 1000	1000 X 1000 & 1200 X 1000
Installed Elect. Power Req.	3.0 Kw.	4.4 Kw.	4.4 Kw.	7.4 Kw.
Compressed Air Req. @ 4.5 kg/cm ²	4 - 8 CFM	6 - 9 CFM	6 - 9 CFM	6 - 12 CFM
Overall Dimensions L X W X H Meter	6 X 1 X 1.5	6.2 X 1.2 X 1.6	6.2 X 1.2 X 1.6	6.2 X 1.4 X 1.6
Cut of Saw				
Blade Ø mm	300	400	400	400
Motor Kw.	1.0	1.5	1.5	1.5
Compressed Air Req. @ 4.5 kg/cm ²	3 CFM	4 CFM	4 CFM	6 CFM

Figura 6 - Quadro de características de quatro diferentes máquinas de pultrusão [adaptado de 45]

2.2.4.1. Armazém das fibras

O 'rack' ou 'crell' (estante) é o local onde os 'rovings' (meada ou bobine) são acondicionados para alimentar a pultrusora. Estes 'racks' podem ter fixação para que os fios de fibra sejam devidamente direcionados (Figura 7), podendo ser fixos ao chão ou possuir rodas para se deslocar. Quanto à sua forma, aqueles que se encontram representados na Figura 7 e na Figura 8 são os mais usuais, pois contêm prateleiras que permitem arrumação e fácil acesso aos mesmos. Os 'racks' ou armazéns de cordões de fibra são móveis, o que permite uma melhor adaptação às necessidades diversas de produção. De salientar que cada perfil a produzir tem necessidades diferentes em termos de número de cordões de fibra a alimentar, podendo estar poucos ou a totalidade das bobinas em uso, sendo o cordão de fibra desbobinado e conduzido em direcção à fieira (Figura 8) pelos outros componentes da máquina, que serão tratados mais adiante.



Figura 7 - 'Racks' onde são armazenadas as bobinas de fibra de vidro



Figura 8 - Saída dos cordões de fibra das prateleiras de armazenamento ('racks') em direcção às placas de guiamento até à fieira

2.2.4.2. Tina de impregnação das fibras em resina

Esta etapa do processo é claramente uma das mais importantes, pois é neste momento que a matriz e o reforço são ligados, embora ainda numa fase líquida. É também nesta fase que são incorporados aditivos, tais como pigmentos e outros, necessários à fabricação do produto.

O banho de resina pode ser realizado num sistema aberto ou fechado. No sistema aberto, a impregnação de resina nas fibras é realizada num recipiente concebido para o efeito – tina. A tina pode ter várias configurações, e o modo como obriga as fibras a mergulharem no banho pode ser efectuado de várias formas, pode obrigar as fibras a passarem por pequenos rolos que estão abaixo do nível de resina, forçando assim a que as fibras fiquem saturadas; pode

ter “garfos” que levam as fibras já orientadas em placas geralmente em nylon ou Politetrafluoretileno (PTFE) também mergulhados na resina (Figura 9) [6].

Caso a impregnação seja realizada de forma fechada, a resina é bombeada para o interior da feira. Contudo, a impregnação pode não ser realizada de forma correcta devido ao curto espaço.



Figura 9 - Sistema aberto de impregnação dos cordões de fibra em resina [45, 46]

Como a resina irá incorporar vários aditivos (resina, cargas e outros componentes químicos/aditivos) verifica-se a necessidade de homogeneizar a mistura, sendo necessário para isso uma misturadora de grande escala, que promoverá a homogeneização num recipiente exterior à tina, sendo posteriormente vazada a mistura então para a tina (Figura 10).



Figura 10 - Misturadora para homogeneização da mistura da resina com os diversos aditivos [45]

2.2.4.3. Sistema de guiamento das fibras

O sistema de guiamento das fibras é iniciado imediatamente após a impregnação das mesmas em resina em banho aberto. Normalmente, este sistema está acoplado à fieira de pultrusão para garantir um perfeito alinhamento das fibras com a cavidade da fieira (Figura 11).



Figura 11 - Sistema de guiamento das fibras, acoplado à fieira [45]

A conformação até à forma desejada das fibras deve ser realizada progressivamente. Para ajudar ao processo recorre-se a placas em PTFE [6] ou PE. Desta forma, as placas são furadas e/ou rasgadas consoante a necessidade e o perfil em causa, para a passagem das mantas nos rasgos e furadas para a passagem das fibras provenientes do 'rack'.

Simultaneamente pretende-se reduzir o esforço necessário para puxar as fibras, uma vez que o esforço em demasia produz um excesso de tensão sobre os fios impregnados. Quando os cordões de fibra de vidro possuem excesso de resina, a mesma é retirada por meio deste sistema de guiamento.

No caso dos perfis fechados (tubulares), é necessário recorrer a um mandril com a forma interior do perfil, sendo que este deve estar perfeitamente alinhado com a abertura da fieira para que possa entrar correctamente nela.

Nesta zona do processo pode haver a necessidade de inserir manta ou tecido ou até mesmo véu de superfície. Para cada perfil, estes elementos possuem diferentes dimensões, não estando geralmente normalizados. Existem rolos com grandes dimensões de onde poderá ser cortada a largura desejada. Assim na Figura 12 podemos visualizar um exemplo desta máquina que permite realizar esses cortes [45].



Figura 12 - Sistema de desbobinagem e corte dos rolos das mantas, em largura [45]

2.2.4.4. Fieira e sistema de aquecimento

A fieira é a ferramenta responsável por dar a forma exterior ao perfil que se pretende realizar. Se o perfil for do tipo tubular, será ainda necessária a montagem de um mandril, que deverá ficar concêntrico com a matriz, permitindo, assim, a obtenção de um tubo com parede constante. Para a realização da fieira deverá ser seleccionado um aço adequado a suportar sucessivos ciclos térmicos de aquecimento/arrefecimento sem que o material deforme ou tenha tendência a fissurar. Deve também resistir ao desgaste por abrasão e ao dano por choque, pois a necessidade de abrir a fieira é uma constante. O aço em que é produzida deverá ser adequado a um posterior revestimento duro, normalmente cromagem dura com uma espessura compreendida entre 25 μm a 38 μm [46], minimizando assim o desgaste na parte interior da fieira, quando em contacto permanente com a fibra de vidro, e diminuindo a sua rugosidade, que deve estar compreendida entre 25 a 50 μm (Rc), o que permitirá um melhor acabamento superficial do perfil a obter. O comprimento usual de uma fieira é de cerca de 1 metro, muitas vezes devido às limitações de maquinagem e de precisão geométrica muito exigente [6, 34].

É relativamente comum que o perfil contraia depois de ter atingido o pico de temperatura, após a reação exotérmica da resina. Este factor deve ser considerado quando se projecta e dimensiona a fieira, para que o perfil final esteja dentro dos parâmetros aceitáveis após o arrefecimento total.

Para que a fieira se mantenha operacional para continuar a produzir perfis com qualidade, deverão ser tidos em consideração determinados cuidados, tais como:

- Usar apenas ferramentas à base de cobre ou latão pois são materiais suaves/moles;
- Nunca bater na superfície cromada com martelos ou outros materiais que possam danificar a superfície;
- Nunca usar lixa sobre a superfície cromada;
- Armazenar e/ou movimentar a fieira sempre num local seguro sem a sujeitar a impactos;
- Antes de retirar ou limpar a fieira, aguardar que esteja fria.



Figura 13 - Fieiras utilizadas na pultrusão [47]

Conjuntamente com a fieira são utilizadas resistências eléctricas como fonte de energia térmica para aquecer o molde (fieira) e activar a reação de polimerização (cura). Porém, o aquecimento também pode ter por base vapor, banho de óleo, ou ainda outros, e ainda possuir um sistema agregado de pré-aquecimento e de arrefecimento [35, 36]. O aquecimento da fieira é provavelmente o parâmetro de controlo mais crítico do processo, pois é onde se regula a taxa de reação de cura e, conseqüentemente, o ponto máximo de libertação de calor [37] (temperatura máxima de reação ou pico exotérmico [6, 10]).

2.2.4.5. Sistema de traccionamento dos perfis pultrudidos

O sistema de traccionamento dos perfis durante a pultrusão, mais vulgarmente denominado por *'puller'*, impõe ao processo de pultrusão a velocidade de produção do perfil. Este sistema consiste em duas garras com o formato exterior do perfil que trabalham em sincronismo para permitir que um deles esteja sempre a traccionar o perfil, enquanto o outro se desloca para ir agarrar o perfil mais atrás e continuar a puxá-lo. Os *'pullers'* podem ser hidráulicos ou pneumáticos (Figura 14), podendo ser comandados apenas com um motor que controla os dois através de um servofreio, ou um motor para cada *'puller'*, tendo que ser previamente programado para o efeito [45]. Este sistema de *'pullers'* designa-se normalmente por recíproco. Existe ainda outro sistema de traccionamento constituído por lagartas, o qual é normalmente utilizado apenas para perfis de baixa secção. Ambos os sistemas poderão ser observados na Figura 14.



Figura 14 - Sistemas de traccionamento dos perfis na pultrusão: (a) sistema recíproco e (b) sistema de lagartas

As velocidades apresentadas por uma linha de pultrusão dependem da velocidade que os *'pullers'* impõem ao perfil. *Sumerak* e *Hunter* [48] estudaram a força necessária a exercer pelos *'pullers'* para diferentes tipos de resina. *Sumerak* ocupou-se do estudo da resina de poliéster enquanto *Hunter* analisou a resina epóxida, sendo que a velocidade requerida obtida foi a mesma: de $0,508 \times 10^{-2}$ m/s. As forças de tração necessárias poderão ser observadas na tabela seguinte.

Tabela 7 – Força de tração necessária na pultrusão em função de determinadas características de cada resina [48]

Sistema	Filler ϕ_r	Fibra vidro ϕ_g	Resina ϕ_r	Contração v	Força traccionamento F (kN)
Poliester	0	0,50	0,50	3,96	0,98
	--	0,498	0,498	3,54	1,38
	--	0,39	0,503	2,89	6,65
Epóxida	0,022	0,675	0,303	--	1,33
	0,020	0,703	0,277	--	1,78
	0,018	0,732	0,250	--	2,13
	0,016	0,747	0,237	--	3,33

2.2.4.6. Sistema de corte

O sistema de corte dos perfis pultrudidos consiste no acoplamento de uma serra de corte à linha de pultrusão, Figura 15, tendo esta que acompanhar a velocidade que os 'pullers' impõem ao sistema, para que o corte se execute correctamente e sem paragens no processo de tração / pultrusão do perfil. Este sistema é automático e corta os perfis em função do comprimento necessário [35].



Figura 15 - Aspecto do sistema de corte normalmente acoplado às máquinas de pultrusão [45]

2.2.5. Parâmetros de controlo do processo de pultrusão

É muito importante entender o papel e a relação existente entre as diferentes variáveis para controlar de forma economicamente rentável o processo e a qualidade do produto. A pultrusão é um processo tecnológico muito complexo, cujos parâmetros e variáveis ainda não são totalmente compreendidos [29].

Existe apenas alguma informação qualitativa e genérica sobre o que acontece dentro da fieira de pultrusão, a qual pode ser resumida da seguinte forma [49]:

- O aquecimento de um material quimicamente ativo (resina) despoleta a reação que está na base do processo;
- A reação vai tendo lugar ao longo do percurso dentro da fieira, sob a influência da pressão a que a resina está sujeita [37];
- A reação é exotérmica numa determinada zona dentro da fieira e a direção do fluxo de calor é invertida;
- Numa determinada zona, dependendo do tipo de resina, ocorre o pico de temperatura gerado pela reação exotérmica dentro da fieira, seguido da cura que dá lugar a uma contração que permite que o perfil se liberte da parede da fieira.

No interior da fieira, a reação exotérmica da resina eleva tipicamente a temperatura do perfil ou produto em aproximadamente 4 °C, permitindo que o composto cure em toda a sua secção. Para que a cura se verifique sem problemas ao longo de toda a secção do produto, a temperatura no interior do perfil deve ser cerca de 4 °C superior à temperatura na fronteira perfil / fieira, para que a reação de cura comece no interior do perfil e progrida até à sua superfície. Se a temperatura no núcleo do perfil não for suficientemente alta, a cura iniciar-se-á no exterior e terminará antes de chegar ao centro, o que se traduz na realização de perfil defeituoso. Também foi determinado que, em compósitos com menor volume de fibra, a cura é mais completa relativamente aos compósitos com maior volume de fibra. Isto porque um menor volume de fibra significa um maior volume de resina que, conseqüentemente, fornece uma maior quantidade devido à reação exotérmica [36, 42, 50]. Na Figura 16 pode verificar-se que este pico de energia exotérmica da resina tem lugar após o pico de temperatura provocado pelas resistências [6].

Normalmente é desejável que a temperatura do produto diminua substancialmente antes de deixar a fieira, de modo que a taxa de transferência de calor do produto para a fieira seja grande e permitindo que o perfil arrefeça o suficientemente para evitar fendas resultantes de

tensões de origem térmica. Esta técnica é mais eficaz para produtos de baixa espessura devido à baixa taxa de transferência de calor do perfil. Quando em presença de espessuras relativamente elevadas, é mais eficaz conter o pico exotérmico através da catalisação química da resina ou dissipação de calor [51].

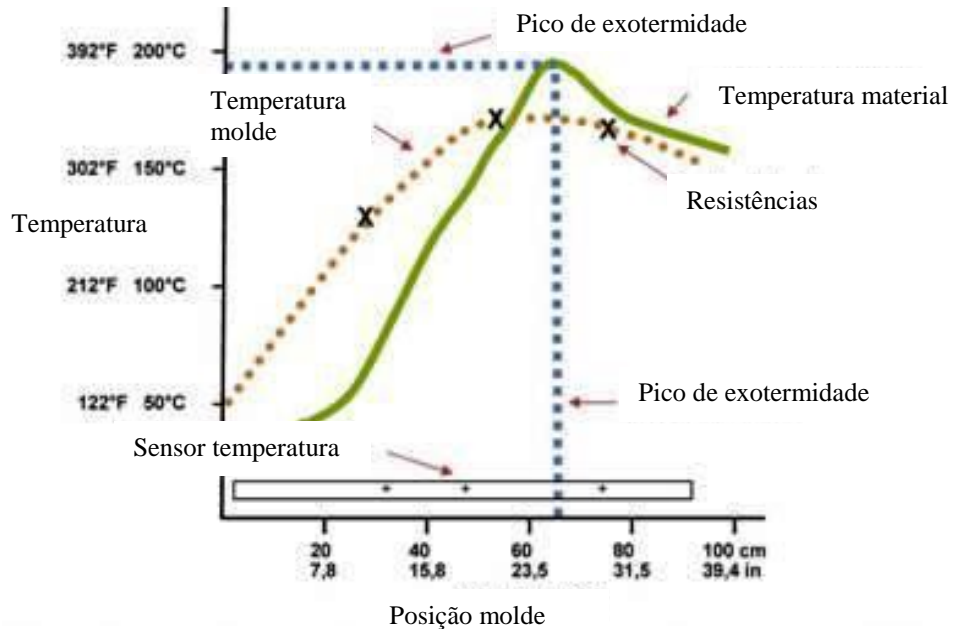


Figura 16 - Evolução da temperatura ao longo da fieira, tendo em conta as diversas fontes de calor [6]

Para produzir uma peça com qualidade, é necessário aplicar pressão dentro da fieira. Esta pressão garante que as fibras são unidas e ajuda a eliminar espaços vazios. A pressão a desenvolver na entrada da fieira irá depender da viscosidade da resina (Figura 17, já que este processo ocorre de forma natural: as fibras possuem uma quantidade apreciável de resina, a qual se vai adaptando na entrada da fieira à forma de perfil desejado, em função da velocidade de tração imposta ao perfil pelas maxilas colocadas a jusante da fieira. Quanto maior for a viscosidade inicial da resina, maior será a pressão inicialmente desenvolvida. A contração volumétrica tem também um papel significativo já que, em materiais com maior contração, a pressão interna cai até zero antes de o material alcançar o pico exotérmico que pode causar a ebulição da resina. Se a viscosidade for significativamente reduzida, pode ser necessário um incremento do volume de fibra para manter a pressão suficiente [6, 10].

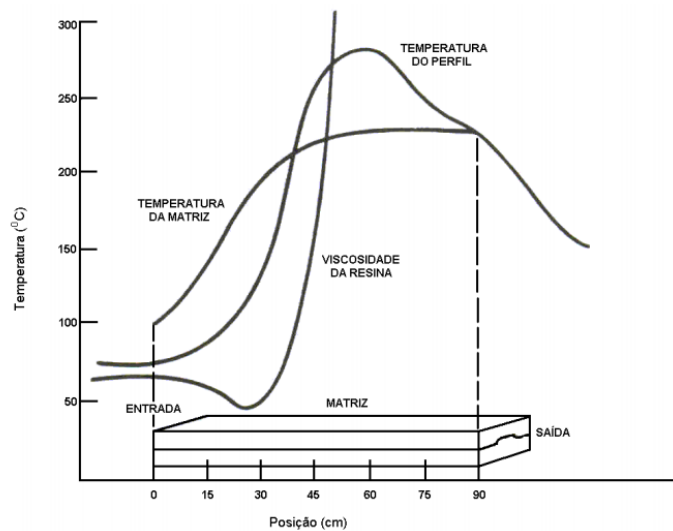


Figura 17 - Comportamento esperado da variação de viscosidade em função da temperatura de uma resina fenólica no interior da feira aquecida [50]

A tensão de corte entre a parede do molde e o perfil aumenta na entrada da feira, correspondendo ao arrasto da resina viscosa nessa parede, assim como à pressão aí desenvolvida. Como a resina é aquecida na feira, a sua viscosidade diminui até ao momento em que atinge o ponto de gel [6, 32, 36]. Após esse ponto, a redução da viscosidade é contrariada pelo incremento do tamanho das moléculas, verificando-se assim flutuações na força de tração. Como a reação atinge o seu ponto máximo após percorrer cerca de 70% da distância correspondente ao comprimento da feira, e que o perfil vai arrefecendo já que vai cedendo calor à feira numa zona onde já não é aquecido com tanto vigor, o perfil contrai e vai-se separando das paredes, o que provoca uma redução na pressão de tração. A Figura 18 mostra os perfis de pressão e temperatura ao longo da feira, durante o processo de pultrusão [52].

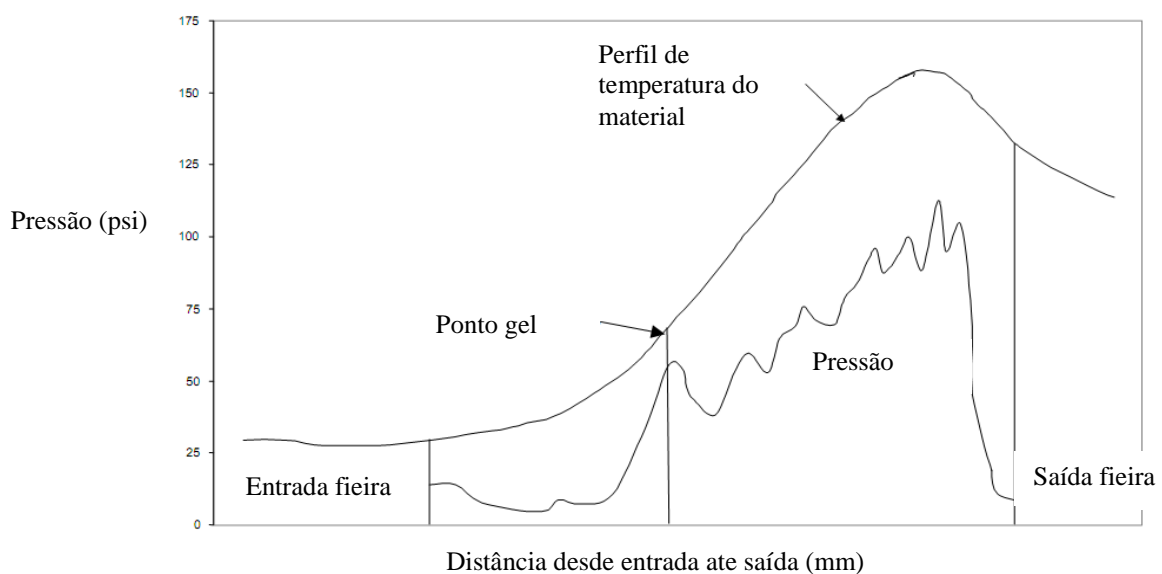


Figura 18 - Temperatura e pressão no perfil ao longo da feira [53]

A velocidade de traccionamento influencia o tempo de permanência do produto pultrudido no interior da fieira. Para um dado perfil de temperatura e ponto de gelificação, a variação da pressão de tração é influenciada pela velocidade traccionamento [51, 53]. Se a zona de gelificação estiver situada no final do percurso ao longo da fieira, a cura não se desenvolve correctamente e o perfil sai defeituoso [6, 33, 36].

Para que o processo seja contínuo o perfil é puxado por dois 'pullers' trabalhando em sincronismo [6, 8, 34, 39, 41]. O perfil arrefece normalmente sem que seja necessário recorrer a outros métodos de arrefecimento. A máquina possui um sistema de corte após o sistema de tração, que corta o perfil com o comprimento desejado. Para controlar e reajustar todos estes parâmetros (temperatura, velocidade e corte), este tipo de máquinas possui uma unidade de controlo [6,29].

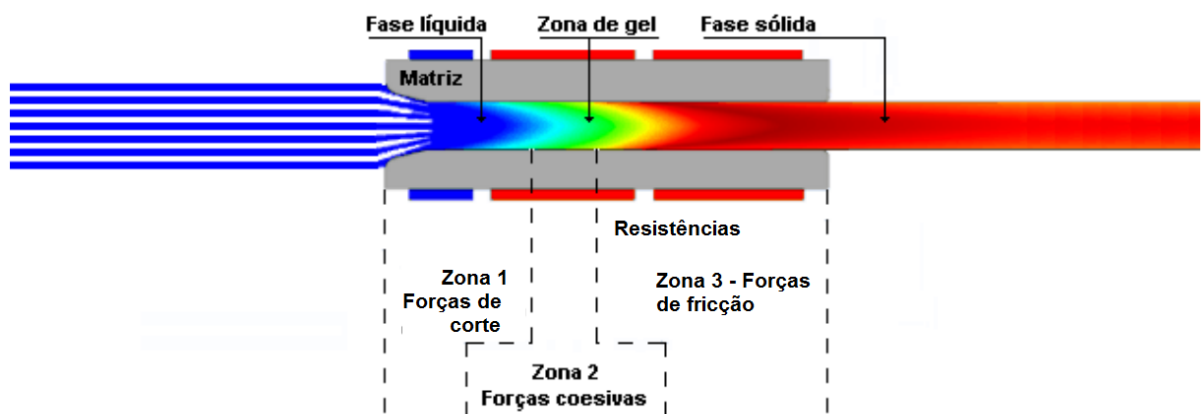


Figura 19 - Processo de cura ao longo da fieira [6, 8]

2.2.6. Matérias-Primas utilizadas no processo de pultrusão

A produção de perfis pultrudidos, tal como a produção de qualquer outro tipo de compósito de matriz polimérica, implica a utilização de diversas matérias-primas, cada uma delas com as suas funções específicas. Na figura seguinte, podemos observar as diferentes matérias-primas utilizadas num perfil pultrudido. De entre elas, destacam-se a resina, o 'roving', as mantas e os véus.

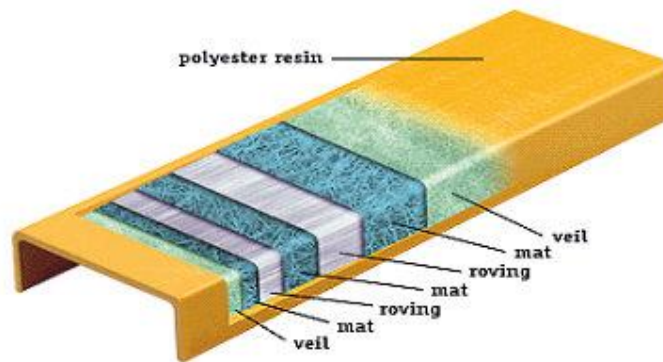


Figura 20 - As diferentes matérias-primas utilizadas num perfil pultrudido [54]

Seguidamente será feita uma análise de cada um dos componentes utilizados, com excepção das resinas, já anteriormente tratadas.

2.2.6.1. 'Roving'

Existem dois tipos básicos de 'roving' disponíveis comercialmente: 'roving' de filamento contínuo e 'roving' de filamento repuxado. O 'roving' de filamento contínuo consiste em mechas compostas por filamentos contínuos de vidro enrolados paralelamente num único cabo, apresentando um número variado de "extremidades" ou "pontas", sem torção. Já o 'roving' de filamento repuxado consiste num 'roving' volumoso em que os filamentos contínuos são torcidos e que retém a sua forma através de um entrançado ou leve retorcido dos microfíamentos por intermédio de uma espécie de colagem com resina, apresentando uma única "extremidade" ou "ponta" [55]. Na Figura 21 poderão ser observados os dois tipos comerciais de 'roving': (a) 'roving' de filamento contínuo e (b) 'roving' de filamento repuxado ou bulk [56].

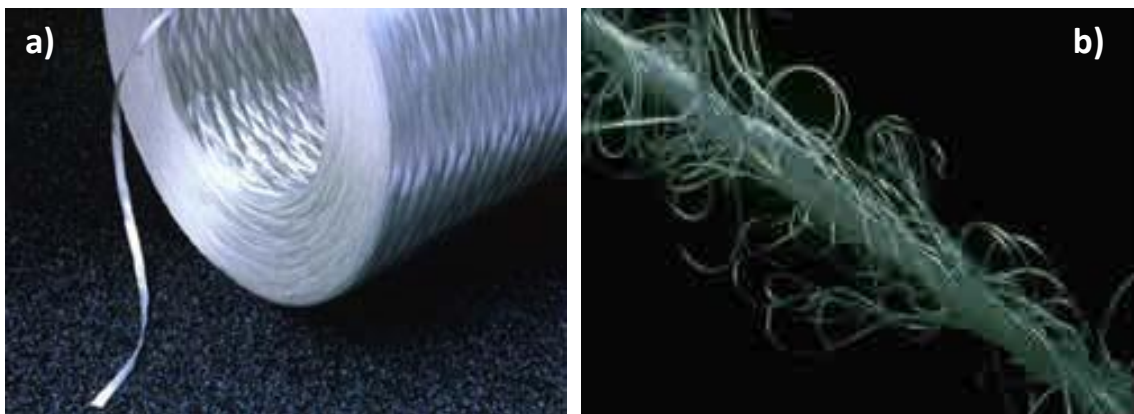


Figura 21 - 'Roving' (a) sob a forma de filamento contínuo [57] e (b) sob a forma de filamento repuxado [58]

O 'roving' pode ser utilizado em processos de enrolamento filamentar, spray-up e Pultrusão [2, 5, 6].

2.2.6.2. Manta

As mantas são constituídas por fibras distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial, em emulsão ou em pó, que confere estabilidade e deve ser solúvel na impregnação. Este método é o mais rentável economicamente na obtenção de boas propriedades físicas transversais. O rácio entre mantas e roving determina a relação das propriedades longitudinais e transversais. As mantas poderão assumir três configurações diferentes: as mantas de filamentos cortados, designadas por CSM ('Chopped Strand Mat' Figura 22a), as mantas de filamentos contínuos designadas por CRM ('Continuous Random Mat', Figura 22b) e as mantas de superfície [59,60].



Figura 22 – Mantas sob a forma de 'Continuous Strand Mat'(a) e 'Chopped Strand Mat'(b) [57].

2.2.6.3. Tecido

O tecido utilizado na produção de PRF pode ser do tipo 2D ou 3D e define-se como sendo a confecção de uma ligação entre feixes de fibras longas de vidro, carbono, aramida, ou a combinação destas, para aplicações em que se exigem elevadas propriedades mecânicas. Os tecidos 2D têm menor ondulação, pelo que apresentam maior conformabilidade ao molde, ou seja, adaptam-se melhor às formas exigidas pelo molde. Os tecidos 3D distinguem-se pela sua resistência interlaminar, na medida em que possuem fibras na direcção da espessura. Uma vez

que estes materiais apresentam custos superiores aos das mantas, dão origem a compósitos com um preço final mais elevado [61].



Figura 23 - Tecido utilizado no fabrico de alguns PRF [57]

2.2.6.4. Vêu de superfície

O uso do vêu de superfície consiste na aplicação de uma película bastante fina de fibras que proporciona um aumento da resistência às intempéries e da resistência à corrosão, sendo também utilizada para aumentar a vida da fiação assim como a velocidade de produção na pultrusão. Os véus também visam eliminar qualquer possibilidade de expor as fibras de vidro à erosão a longo prazo da camada de resina existente na superfície.

Os véus de superfície são feitos com um vidro resistente ao ataque químico, o que permite a durabilidade dos produtos em que são usados, dando-lhe resistência contra soluções alcalinas e ácidas. Os filamentos de vidro usados na fabricação destes véus são tratados com resinas sintéticas formuladas para dar compatibilidade, tanto com resinas poliéster como epóxicas. É usado como reforço para o 'gelcoat' e em laminados que devem ter pequena espessura e/ou bom acabamento. Normalmente, apresentam as seguintes propriedades: [61]

- Densidade: 33,3 g/m²
- Largura: 1 m
- Comprimento: 250 m
- Espessura: 0,2 ± 0,1 mm



Figura 24 - Aspecto do véu utilizado na produção de PRF [63]

2.2.7. Características dos produtos obtidos por pultrusão

Os produtos obtidos através do processo de pultrusão possuem um infindável leque de características e pormenores de acabamento que merecem ser destacadas. As características estão directamente ligadas à constituição do perfil assim como à cura do mesmo [1, 2, 6, 9, 64, 65].

Na produção de perfis através de pultrusão, poderá ser obtido um amplo espectro de propriedades mecânicas, as quais são condicionadas pela selecção do tipo de reforço (fibra de vidro, fibra de carbono, fibra aramídica, fibras orgânicas ou outras), da quantidade e disposição das fibras ao longo da secção recta do perfil a produzir e também da resina utilizada como matriz. A direcção da força que se pretende exercer sobre o perfil determina a selecção do tipo de reforço ou direcção do mesmo. O valor absoluto da propriedade específica desejada depende do tipo de fibra escolhida.

Em termos específicos, os perfis pultrudidos apresentam níveis de resistência mecânica superiores aos valores patenteados pelos aços mais comuns, variando esta com o tipo e orientação do reforço, sendo que, em alguns casos, estabelecendo a melhor combinação entre os vários tipos de reforço e resina se pode obter uma resistência à tração superior a 1000 MPa. O seu 'design' pode ser adaptado para que possam ser obtidas determinadas propriedades específicas para uma dada aplicação. Apresenta-se na Figura 25 a relação

constitutiva, a tensão máxima que se atinge em tração e o módulo de elasticidade em flexão dos perfis pultrudidos de GFRP do fabricante europeu Fiberline. Nessa figura é feita a comparação com outros materiais, como o aço, o alumínio, a madeira e o PVC, sendo que o aço é o material que concorre mais directamente com os perfis de GFRP.

Analisando a figura seguinte, poderemos constatar que:

- A relação tensão-deformação elástica é linear até à rotura, o que contrasta com o comportamento dúctil do aço;
- A tensão de rutura destes materiais é superior à dos aços estruturais mais comuns;
- O módulo de elasticidade é relativamente reduzido.

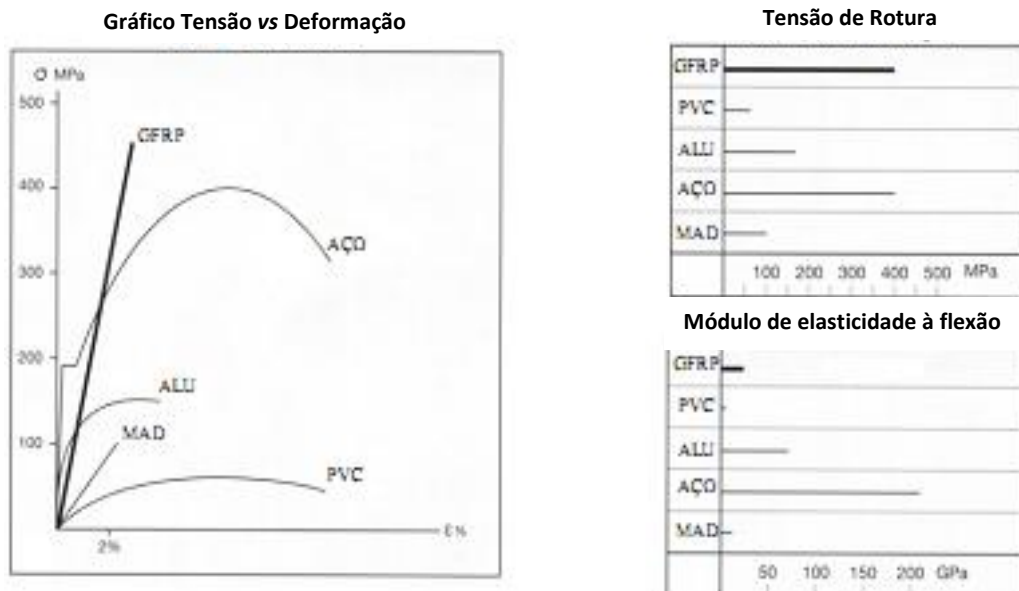


Figura 25 - Comparação entre algumas propriedades mecânicas dos compósitos e de outros materiais de uso comum [66].

No que respeita à Resistência ao Impacto, é sabido que é bastante elevada para os compósitos reforçados com fibra orgânica, tornando-os adequados para aplicações de absorção de energia. Os compósitos reforçados com fibra de vidro apresentam um desempenho relativamente modesto por comparação com as fibras orgânicas, mas são superiores aos compósitos reforçados com fibra de carbono. Aliás, nestes compósitos de fibra de carbono, a resistência ao impacto depende da dureza da resina utilizada como matriz.

Os perfis pultrudidos podem apresentar uma densidade 80% inferior à registada para o aço e 30% menos do que o alumínio, sendo neste campo que os perfis pultrudidos ganham grande vantagem, principalmente nas aplicações onde a redução de peso é uma exigência e se

mantém a necessidade de boas características mecânicas; nestas condições, os perfis pultrudidos são os produtos mais adequados. A natureza leve pode resultar numa forte economia que resulta da redução de custos associados à instalação, permitindo a utilização de transportes mais ligeiros, manipulação e posicionamento no local, mais fácil e mais económica, e à redução do custo na realização das fundações. [46].

No que toca às propriedades físicas, a condutividade térmica dos compósitos é afectada quer pela matriz quer pelo reforço. Geralmente, a fibra de vidro é o reforço usado para se conseguir excelente isolamento térmico. Os perfis pultrudidos têm uma baixa condutividade térmica, na ordem dos 1/250 da apresentada pelo alumínio e cerca de 1/60 da patenteada pelo aço, sendo ainda muito eficaz no caso de aplicações onde seja requerida uma rutura térmica. Relativamente à condutividade eléctrica, os materiais compósitos pultrudidos apresentam óptimas características de isolamento eléctrico sendo, no entanto, possível introduzir alguma condutividade com o fim de melhorar a dissipação estática, como por exemplo em grades anti-estáticas para aplicações no exterior. Os perfis pultrudidos são permeáveis às ondas de rádio, microondas e outras frequências electromagnéticas. Isso torna-os adequados para o uso na aeronáutica, em mastros aéreos ou outras aplicações. Estas propriedades acabam por ser úteis também em aplicações médicas, já que apresentam também transparência aos Raios-X e não apresentam propriedades magnéticas que prejudiquem a sua aplicação em digitalizadores para Tomografia Axial Computorizada (TAC). Na Figura 26 poderão ser observados alguns gráficos que comparam algumas das propriedades destes materiais com outros materiais de uso comum em Engenharia [1, 6, 46].

Da análise da Figura 26 poderemos inferir que estes perfis de GFRP, relativamente a perfis congéneres de aço:

- São extremamente leves, com densidade cerca de 4 a 5 vezes inferior à do aço;
- O coeficiente de dilatação térmica é semelhante ao do aço;
- O coeficiente de condutividade térmica é muito reduzido e significativamente inferior ao do aço.

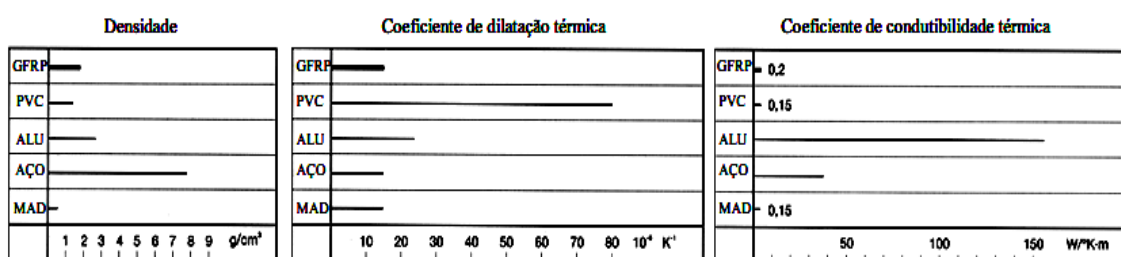


Figura 26 - Gráficos comparativos de algumas propriedades dos PRFV relativamente a outros materiais de uso corrente em Engenharia [Adaptado de 65]

A exposição contínua a temperaturas até 65 °C está dentro das especificações deste tipo de perfis. Perfis personalizados, ou seja, fabricados com aditivos específicos, podem resistir a temperaturas consideravelmente mais elevadas [6, 10]

O coeficiente de expansão térmica é semelhante ao do aço e significativamente menor do que o do alumínio. Um perfil totalmente curado é resistente ao estiramento, deformação ou dilatação numa ampla faixa de temperaturas [66].

Os perfis pultrudidos não são facilmente inflamáveis e uma boa combinação da matriz e da fibra de reforço pode ser formulada para atender a maiores exigências de segurança.

A elevada resistência à corrosão e outras características químicas dos compósitos pultrudidos são normalmente atribuídos às propriedades da resina utilizada. Quando ataques químicos e corrosão têm tendência a ocorrer na superfície do produto, a presença de uma barreira rica em resina proporciona maior grau de resistência. Para se conseguir uma superfície rica em resina é usado na superfície dos produtos pultrudidos um véu sintético (véu de superfície) normalmente constituído por fibra de poliéster. A camada de véu pode variar entre 0.15 e 1.00 mm de espessura, dependendo da secção do perfil a produzir. As excelentes propriedades anticorrosivas destes materiais resultam em produtos que requerem pouca ou nenhuma manutenção com o decorrer do tempo.

A Tabela 8 sintetiza os valores médios para as propriedades principais dos PRFV. Os valores assinalados na Tabela 8 com o índice (*) referem-se a ensaios efectuados segundo a direcção longitudinal do perfil, e a tolerância a considerar sobre esses valores é de $\pm 10\%$.

No âmbito de um projecto de substituição de uma ponte metálica com graves problemas de corrosão por estar inserida num ambiente salino, foi realizado um estudo [3] em que se comparou o desempenho de cinco soluções correspondentes a diferentes materiais: aço estrutural (pintado), aço inoxidável, perfis de GFRP, alumínio e betão armado. Em particular, foram analisados os custos iniciais e de manutenção e o impacto ambiental de cada solução, com os resultados descritos na Tabela 9.

Considerando a soma dos custos iniciais e de manutenção, a solução mais económica foi a de utilizar betão armado, à qual se seguiram o aço estrutural, os perfis de PRFV, o alumínio e, por último, o aço inoxidável.

Tabela 8 - Valores médios das principais propriedades dos PRFV [65, adaptado de 46])

Propriedades	Norma	Unidades	Valor médio
Densidade	ASTM D 792/UNI 7092	g/cm ³	1.8
Conteúdo de substâncias inorgânicas	ISO 1172	%	60
Absorção de água	ASTM D 570/ISO 62	%	0.15
Dureza Barcol	ASTM D 2583	-	50
Resistência ao impacto Charpy	ASTM D 256/UNI 6062	kJ/m ²	230
Propriedades à tração (*)	ASTM D 638/UNI 5819		
Resistência à rutura	"	MPa	450
Alongamento à rutura	"	%	1,5
Propriedades à flexão (*)	ASTM D 790/UNI 7219		
Propriedades à compressão (*)	ASTM D 695/UNI 4279		
Módulo de Elasticidade	"	MPa	23 000
Coefficiente de Expansão Térmica (*)	ASTM D 696/UNI 6061	1/ °C	11x10 ⁻⁶

Tabela 9 - Matriz relativa ao estudo comparativo de 5 materiais para aplicação numa ponte (caso de estudo) [3]

Material estrutural	Critério			
	Custos iniciais (€)	Custos de manutenção (€)	Consumo de energia (MJ)	Volume crítico de poluição (m ³)
Aço estrutural	40 000	30 000	294 000	Água: 697,4 Ar: 7,09 × 10 ⁶
Aço inoxidável	110 000	6 000	329 600	Não disponível (mas certamente superior ao do aço estrutural)
Perfis de PRFV	70 000	17 000	120 000	Água: 85,8 Ar: 7,92 × 10 ⁶
Alumínio	77 000	19 000	268 700	Água: 565,3 Ar: 41,1 × 10 ⁶
Betão armado	30 000	10 000	277 200	Água: 341,9 Ar: 31,04 × 10 ⁶

Se forem considerados os aspectos ambientais, as vantagens da utilização dos perfis de PRFV são claras, quer em termos do consumo de energia, quer em termos de emissões de poluentes. Em particular, a poluição da água devida aos perfis de PRFV (devida sobretudo às emissões de cobalto na produção de poliéster) é uma ordem de grandeza inferior à dos restantes materiais analisados. No que diz respeito à poluição do ar, os perfis de PRFV constituem, a par do aço estrutural, a solução ecologicamente mais “limpa”.

No entanto, e como é referido pelo autor deste estudo [3], os resultados obtidos são válidos para a ponte analisada, não podendo ser extrapolados para outros casos. Por outro lado, o autor reconhece que, neste tipo de estudos, a qualidade da informação disponível nem sempre é a desejada.

2.2.8. Vantagens e limitações do processo de pultrusão

A pultrusão é um processo produtivo axial e contínuo, podendo o perfil ser cortado com o comprimento desejado, quer em medidas padronizadas quer específicas. O processo tem a capacidade de produzir formas de grandes dimensões (18 "x 36" ou 457.2 x 914.4mm), estando a sua limitação condicionada pela força necessária para puxar o perfil e da secção deste, sendo que as máquinas de pultrusão terão que possuir tanto maior robustez quanto maior for a secção do perfil a produzir. É um processo muito eficiente para grandes volumes de perfil, já que pode ser realizado numa base de trabalho de 24 horas/dia. É particularmente adequado para aplicações onde é exigida boa qualidade superficial [55, 56].

Além disso, o processo de pultrusão dá à fibra tensão consistente, controlada e orientada, o que se traduz num menor teor de vazios no perfil e, como tal, a uniformidade das fibras ao longo do perfil

Com o fabrico de perfis compósitos utilizando o processo de pultrusão são reduzidos os desperdícios de material (resíduos), ou seja, não contabilizando o material não conforme, é aproveitado cerca de 95% do material que é utilizado na produção, em comparação com o processo de 'spray-up' que aproveita apenas 75% da matéria-prima gasta na sua produção [71].

O processo de pultrusão é mais lento, quando comparado com a extrusão, tanto no caso da extrusão de alumínio como na de termoplásticos, devido à velocidade de transferência de calor, pois é um factor limitativo que pode afectar o custo total do produto. Ou seja, quanto mais espessa for a parede do perfil a produzir por pultrusão, mais tempo é necessário para curar devidamente o material [35, 36, 68].

Este processo tem algumas vantagens [6, 41, 71-75], tais como:

Ausência de manutenção;

- Excelente resistência à corrosão;

- Leveza: cerca de 4 vezes mais leve que o aço e 2/3 do que o alumínio;
- Elevada relação resistência/ peso;
- Excelente isolamento eléctrico, térmico e magnético;
- Estabilidade dimensional que se traduz num coeficiente de dilatação térmica baixo e resistência ao calor e ao frio intenso;
- Cor, são adicionados pigmentos para obter a cor pretendida. A matriz é toda da mesma cor, o que faz com que os riscos sejam disfarçados;
- Fácil manipulação. Estes materiais são facilmente cortados, furados, colados rebitados ou aparafusados utilizando equipamento convencional;
- Excelente comportamento à fadiga e fluência;
- Transparente à transmissão de rádio frequência;
- Grande variedade de secções possíveis, que permite uma liberdade de design e escolha de propriedades como a resistência, densidade, cor e flexibilidade;
- Reprodutibilidade no processo de fabrico e o comprimento dos perfis apenas é limitado pelos meios de transporte. Perfis de secções pequenas podem ser enrolados;
- Bom amortecimento de vibrações mecânicas.

No entanto, este processo possui também algumas limitações [41, 71, 72], nomeadamente:

- Os investimentos necessários são muito elevados;
- A conclusão da instalação deve ser feita por pessoal muito qualificado;
- Variáveis do processo nem sempre controláveis;
- Reduzido módulo de elasticidade;
- Custos iniciais ainda pouco competitivos na maior parte das aplicações.

2.2.9. Principais desenvolvimentos no processo de pultrusão

Recentemente, têm sido realizados esforços na área da investigação para otimizar tanto a utilização de matrizes termoplásticas como os procedimentos necessários à realização da impregnação. Se a impregnação for realizada com recurso à injeção, há menores perdas de resina e melhor impregnação devido ao gradiente de pressão aplicado, reduzindo-se também a emissão de produtos voláteis.

Ao contrário do processo de pultrusão actualmente utilizado à escala industrial, na pultrusão por injeção, as fibras não impregnadas são puxadas para o molde metálico

enquanto as resinas, já preparadas com os 'fillers' e os aditivos, são adicionadas por injeção junto à fieira ou na própria fieira, através de um dispositivo criado para o efeito. [6]

O sistema de pultrusão por injeção permite controlar melhor a posição dos reforços, garantindo uma maior uniformidade do material. Por outro lado, permite alterar rapidamente a produção, ou introduzir alterações na composição da matriz durante o processo de fabrico. O processo de injeção reduz ainda a evaporação dos solventes da matriz, garantindo um melhor ambiente de trabalho. [6]

Na Figura 27(a) a impregnação é executada por injeção por pressurização directamente na cavidade do molde. Já na Figura 27(b) é usado o típico sistema de impregnação em sistema aberto sem gradiente de pressão [43].

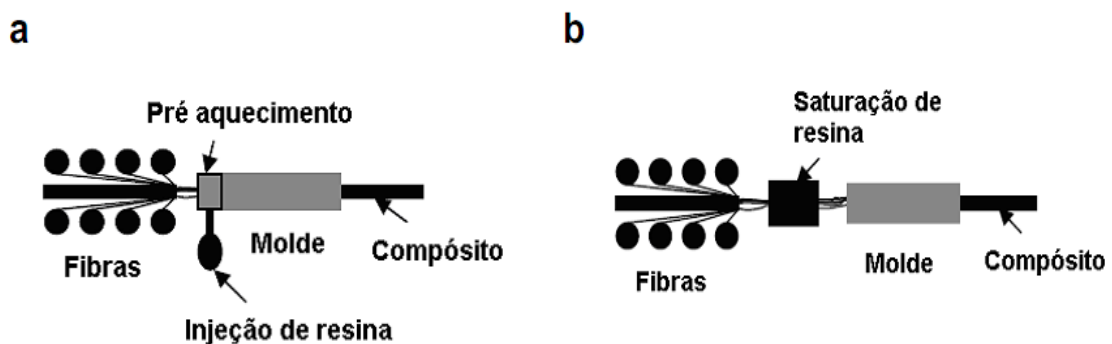


Figura 27 - Pultrusão (a) com injeção de resina e (b) em banho aberto

Trabalhos mais recentes [43, 73] têm focado os seus esforços em estudos computacionais relativos à pultrusão por injeção. Apesar disso, o método de banho aberto é ainda o mais tradicionalmente utilizado na indústria, devido à sua maior aplicabilidade.

2.2.10. Principais aplicações dos produtos pultrudidos

A aplicação de materiais compósitos tem sido incrementada exponencialmente, essencialmente devido às vantagens que este tipo de produtos apresenta relativamente aos materiais convencionais. No entanto, os produtos compósitos obtidos por pultrusão possuem aplicações bem mais específicas, ligadas muitas vezes à área estrutural.

Os perfis pultrudidos podem assumir diversas formas, tal como se pode visualizar na Figura 28. A actividade económica ligada ao fabrico de perfis pultrudidos tem estado em crescimento acelerado [72] e as suas aplicações são cada vez mais vastas, graças

essencialmente à óptima relação resistência/peso, o que permite a redução significativa de custos e esforço na montagem de estruturas que se fossem, por exemplo, em aço implicariam meios muito mais pesados e significativos em termos económicos, acarretando também outros riscos em termos de segurança. Para além disso, o facto de apresentar uma forte resistência à corrosão e poder ser fabricado na cor pretendida pelo cliente, permite também economizar significativamente em manutenção ao longo da vida útil do produto.



Figura 28 - Exemplos de geometrias possíveis para produtos pultrudidos [76]

Tendo em conta as características e formas disponibilizadas no mercado, podemos afirmar que os produtos pultrudidos poderão ser aplicados em várias áreas distintas tais como as que seguidamente se apontam.

2.2.10.1. Área da Construção

A construção civil é uma vasta área com distintas aplicações, desde simples suportes de auxílio até importantes elementos estruturais como sendo o caso das pontes. A primeira ponte pedonal 100% compósita foi construída no Reino Unido em 1992. A Ponte Aberfeldy (Figura 29) tem um tabuleiro constituído por painéis pré-fabricados, suspenso por tirantes em aramida, apoiados em colunas de GFRP [77].

A ponte pedonal em Lérida, em Espanha, foi construída em 2001. Como requisitos para esta ponte, exigia-se uma manutenção reduzida, facilidade/rapidez de instalação e ausência de interacção com o campo magnético das catenárias da linha de alta velocidade que estaria adjacente. A superestrutura da ponte, em arco, com um vão de 38 metros, é materializada apenas por perfis de GFRP, conforme poderá ser observado na Figura 30, sem que produzisse qualquer interferência electromagnética. Por outro lado, o peso total da ponte (19 ton) permitiu que a colocação na posição final demorasse apenas 3 horas [68].



Figura 29 - Ponte de Aberfeldy (Escócia), construída em perfis pultrudidos [33]



Figura 30 - Ponte de Lérida (Espanha) totalmente construída em perfis pultrudidos [68]

Devido às suas características mecânicas e químicas, estes perfis e/ou componentes resistem à oxidação e à água salgada. Perante estas características, a sua aplicação torna-se desejável em vedações, porões, docas, escadas para ETAR's (Figura 31 a Figura 35), entre outras [6, 59, 60]. Sendo perfis leves, podem facilmente ser transportados para qualquer local utilizando-se meios de transporte e de movimentação mais ligeiros e menos dispendiosos, tendo a dupla vantagem de reduzir as emissões de CO₂, pois necessita de menor esforço.



Figura 31 - Aplicação de perfis pultrudidos numa ETAR [46].



Figura 32 - Aplicação de perfis pultrudidos numa ETAR (Leiria) [46].



Figura 33 - Aplicação de perfis pultrudidos e gradil numa ETAR [46].



Figura 34 - Estruturas de varandins em perfil pultrudido [46].



Figura 35 - Estrutura de uma cobertura e escadas de acesso, realizadas em perfis pultrudidos [59, 60]

2.2.10.2. Aplicações que requerem isolamento eléctrico

As aplicações onde é necessário salvaguardar a segurança de pessoas contra riscos eléctricos é outro grande campo de aplicação, que compreende elementos tão diversificados como suportes de cabos eléctricos ou escadas de acesso a postes de alta tensão. Dado que os perfis são em material compósito, são bons isolantes eléctricos, factor que conjugado com as características mecânicas permite obter aplicações excelentes, conforme poderá ser visto na Figura 36 onde os perfis pultrudidos são utilizados como estrutura de uma porta de um posto de transformação [6, 72].



Figura 36 - Porta de posto de transformação com estrutura executada com perfil pultrudido [46]

2.2.10.3. Outras aplicações

Para além das aplicações referidas anteriormente de forma mais específica, existem ainda inúmeras áreas de aplicação já exploradas, e outras ainda por explorar, das quais se dão seguidamente alguns exemplos:

- Construção aeroespacial;
- Construção militar;
- Construção automóvel;
- Sector de transportes;
- Indústria petroquímica;
- Indústria papeleira;
- Indústria de bens destinados ao lazer.

3. Desenvolvimento

3.1. Introdução ao trabalho prático

A realização deste trabalho visou corresponder a uma solicitação realizada pela empresa ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., tendo como suporte financeiro o Projecto N. 5488 da AdI, com o acrónimo PULTReficaz e a Referência Nº 5488, financiado pelo QREN. Os objectivos principais deste trabalho estão já descritos no capítulo 1.2.

3.2. A máquina de pultrusão – Situação inicial

Com vista a contextualizar o trabalho que foi desenvolvido, é de toda a conveniência referir as condições iniciais de funcionamento da máquina de pultrusão, para que o leitor possa perceber quais as dificuldades que eram verificadas pelos responsáveis e operários da empresa ao lidarem com o processo, quais os principais vectores delineados para a actuação e quais os níveis de prioridade estabelecidos. A situação inicial poderá ser descrita pelas três imagens seguintes.



Figura 37 - Aspecto do 'layout' inicial da máquina de pultrusão [ALTO]



Figura 38 - Aspecto do sistema de suporte e guiamento das mantas e véus [ALTO]



Figura 39 - Aspecto da feira e do respectivo sistema de aquecimento [ALTO]

Os equipamentos de pultrusão que a ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. possui, partiram de uma ideia inicial, em torno da qual se foi desenvolvendo, tendo em conta os desenvolvimentos necessariamente impostos pelos novos compromissos que a empresa ia assumindo, em termos de novos perfis a produzir. Assim, não será de estranhar que a solução que foi encontrada no início deste trabalho apresentasse algumas incoerências, das quais a empresa tinha perfeita consciência.

Numa primeira análise, foram inventariadas todas as questões que constituíam entraves a uma adequada produtividade, tanto relacionadas com o tempo de preparação do equipamento, como com a operação do mesmo e ainda com problemas de paragem relacionados com situações inesperadas no processo de fabrico.

3.2.1. Inventariação dos problemas a resolver no equipamento

Após algumas reuniões entre os Responsáveis da ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., investigadores do ISEP e da FEUP, foram inventariados os seguintes problemas:

- O tempo de preparação do equipamento (setup), aquando da mudança de tipo de perfil a produzir, era demasiado longo, podendo atingir com facilidade um turno de trabalho;
- O processo de montagem e ordenamento das fibras nos guiamentos era complexo, já que o quadro de guiamento inicial é universal, exigindo muita atenção e apresentando sérios riscos de erro, o que se pode traduzir no cruzamento de fibras, o qual poderá originar a rotura das mesmas durante a alimentação;
- O sistema de colocação das mantas e véus não era ergonómico, não possuía a versatilidade e a rigidez necessária e não cumpria a legislação vigente de segurança no trabalho;
- A tina que continha a resina no estado líquido não possuía qualquer controlo de temperatura, originando por vezes processos de cura espontânea, solidificando a resina, o que provocava a paragem do processo e necessidade de limpar a tina, arrancando a resina sólida através de processos manuais demorados, com o conseqüente transtorno provocado pela paragem do equipamento, com implicações directas nos custos e nos prazos de entrega;

- O guiamento intermédio das fibras era efectuado também por uma matriz universal, o que exigia um plano próprio para cada perfil, com o consequente risco de erro por parte do operador;
- A matriz não possuía batentes delimitadores adequados, devido ao facto de ter que albergar resistências por baixo da mesma. Isto implicava que o seu processo de montagem fosse mais demorado, sendo necessário verificar alinhamentos e fixar todas as resistências externas envolvidas no processo de aquecimento;
- As resistências planas utilizadas no aquecimento da matriz apresentavam uma escassa área efectiva de passagem do calor para a fieira por condução. Grande parte das mesmas estava em contacto com o ar, promovendo um forte desperdício do calor;
- O processo de pultrusão gerava resíduos resultantes de produtos fabricados com defeito, quebra de produção por rompimento das fibras, etc. Esses resíduos, assim como outros desperdícios resultantes da trança efectuada na preparação do processo para a execução de cada obra, constituíam uma preocupação para a empresa, já que a única solução existente até ao momento era enviá-los para aterro sanitário, tendo a ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. que pagar a respectiva taxa, representando isto mais um custo para a empresa.

A preparação do equipamento compreende as etapas abaixo discriminadas, necessitando dos tempos seguidamente mencionados:

- Mudança dos sistemas de tração ('pullers'), existindo um adaptador para cada tipo de perfil: 15 minutos;
- Desmontagem da fieira e das resistências: 15 minutos;
- Desmontagem das fibras colocadas nos guiamentos finais: 15 minutos;
- Limpeza da tina e dos garfos: 60 minutos;
- Desmontagem das fibras dos guiamentos iniciais e intermédios: 45 minutos;
- Montagem da nova fieira: 30 minutos;
- Montagem dos fios no sistema de guiamento inicial (universal): 90 minutos;
- Montagem dos fios nos garfos da tina: 15 minutos;
- Montagem dos rolos de manta e véus para o novo perfil: 15 minutos;
- Montagem dos fios nos guiamentos finais: 30 minutos;
- Montar os fios através da fieira e proceder ao seu fecho: 60 minutos;
- Unir os fios com fita adesiva e prendê-los no 'puller': 120 minutos.

Para além destas operações, é ainda necessário o arranque do sistema de aquecimento, o qual é responsável por mais cerca de 30 minutos.

3.2.2. Plano de intervenção

Face aos problemas atrás inventariados, foi estabelecido um plano de intervenção tendo em conta os seguintes factores:

- Urgência de intervenção;
- Exequibilidade de projecto;
- Facilidade de intervenção.

Assim, foi estabelecida a seguinte sequência de abordagem aos problemas atrás referidos:

- Projecto, construção e implementação de um novo sistema de colocação das mantas e véus;
- Estudo de um novo sistema de aquecimento para a feira;
- Projecto e construção de um novo sistema de guiamento final das fibras;
- Projecto e construção de uma nova tina com controlo de temperatura;
- Projecto de um sistema versátil de posicionamento e montagem das feiras.

3.3. Projecto e implementação de novas soluções

Com base nas prioridades anteriormente estabelecidas, foi dado início ao trabalho de projecto simultaneamente em duas frentes, contemplando os dois primeiros itens apontados.

3.3.1. Projecto, construção e implementação de um novo sistema de colocação das mantas e véus

Conforme anteriormente referido, e tal como pode ser observado parcialmente na Figura 38, esta era uma situação que urgia resolver a curto prazo, já que a solução

implementada constituía algum risco para os operários e traduzia alguma improvisação aplicada até ao momento, como resultado de um processo evolutivo que não tinha disposto do tempo de estudo e maturação necessário para ficar convenientemente resolvido.

As premissas principais que foram acordadas com a empresa sobre este sistemas, passavam essencialmente pelos seguintes pontos:

- O sistema deverá ser versátil, resolvendo de imediato todos os problemas identificados e sendo capaz de se adaptar às mais diversas situações a que a empresa se encontra exposta, face ao diversificado número de perfis produzidos;
- O sistema deverá permitir uma posterior expansão;
- O sistema deverá ser ergonómico;
- O sistema ser resistente ao trato normal dado pelos colaboradores em situação de trabalho e de stress.

Com base nestas premissas, foi projectado o sistema que é mostrado na figura seguinte e desenho em anexo.

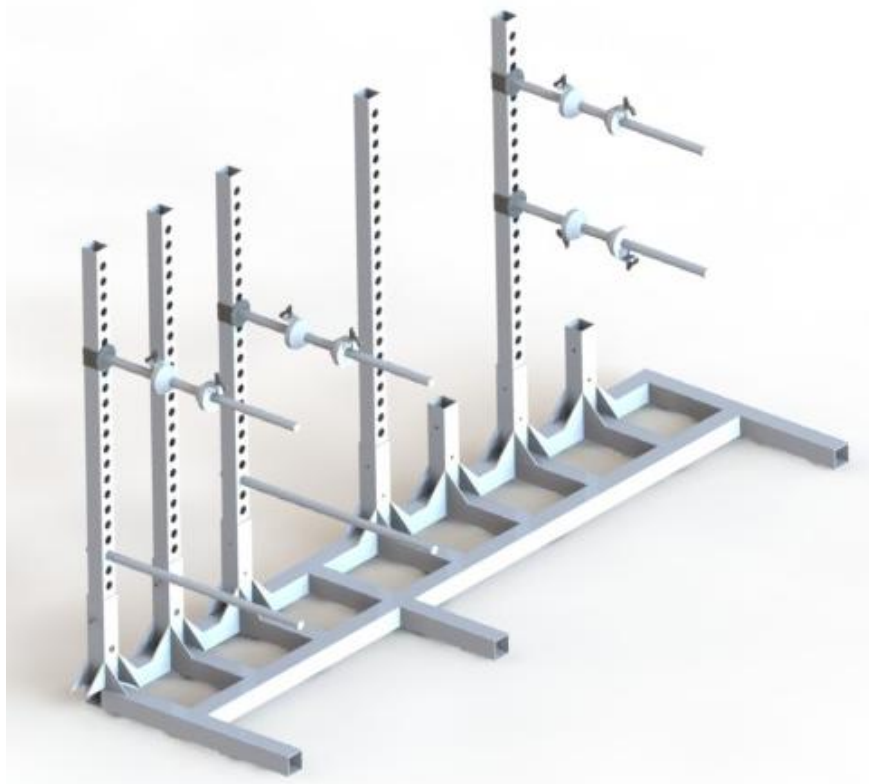


Figura 40 – Desenho 3D da estrutura de suporte e guiamento das mantas e véus

A estrutura atrás apresentada foi projectada tendo em consideração os seguintes aspectos:

- A estrutura irá ser construída predominantemente em aço de construção, com semi-produtos de fácil aquisição no mercado, tais como tubos, chapas, varões, etc.;
- É dada preferência a acessórios standard existentes no mercado, sempre que possível;
- A estrutura de apoio no chão deverá permitir o fácil acesso dos operários à estrutura, facilitando as operações de troca dos rolos de manta e véus;
- O suporte da estrutura deverá permitir a colocação de um número alargado de pilares verticais, com vista a uma posterior expansão do sistema e uma alargada flexibilidade de disposição dessas vigas verticais, com vista a permitir trabalhar com rolos de manta e véus de diferentes diâmetros e segundo diferentes configurações de montagem/uso nos perfis pultrudidos;
- Os pilares verticais deverão estar munidos de intensa furação ao longo dos mesmos, sem que a viga fique fragilizada, permitindo a colocação dos eixos a diferentes alturas, consoante a necessidade em cada tipo de perfil pultrudido;
- Os eixos onde ficarão suportados os rolos de manta e véus deverão ser montados facilmente nas colunas, não sendo dadas hipóteses de rotação dos mesmos;
- Os veios deverão ser construídos em aço e irão permitir que um rolo com o peso máximo de 60 kg possa ser colocado na sua extremidade, sem que se verifique uma flecha máxima de 20 mm;
- Os sistemas de posicionamento e fixação dos rolos ao longo dos eixos deverão ser preferencialmente normalizados e deverão permitir a fixação rápida.

Nas imagens seguintes poderão ser vistos pormenores do suporte dos pilares verticais, do sistema de encaixe dos veios nos pilares verticais e do sistema de fixação adoptado para determinar a posição dos rolos de manta e de véu que se pretenderem montar na estrutura.

Mais adiante, poderá ser analisada a estrutura já fabricada e instalada na ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., tendo a mesma sido bastante bem aceite pelos colaboradores desta empresa. Este sistema permitiu uma redução de cerca de 65% no tempo necessário à montagem dos rolos de manta e véus.

O material eleito para esta estrutura, no geral, foi o aço S275JR (tubos e varões), pela facilidade de aquisição e resistência assegurada, enquanto para os cones de posicionamento foi escolhida a Poliamida 6.6, pela facilidade de maquinagem e baixo atrito.

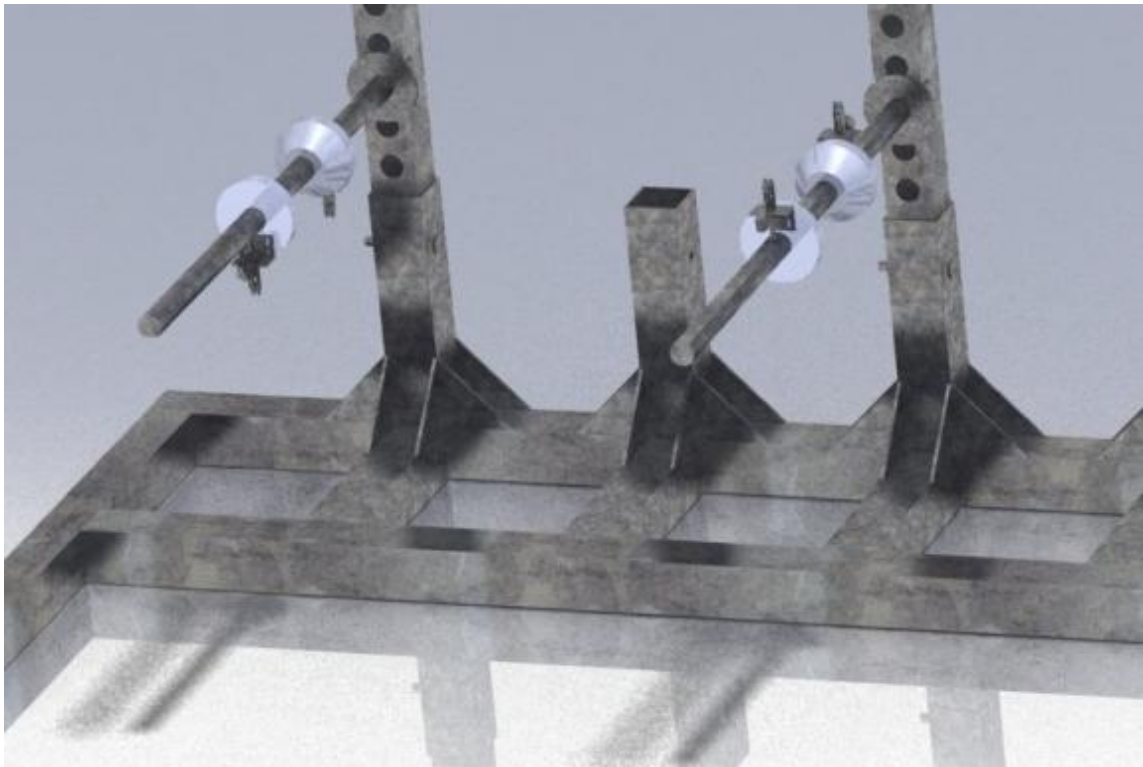


Figura 41 - Pormenor do sistema de encaixe dos pilares verticais no estrado da estrutura



Figura 42 - Pormenor do sistema de encaixe dos veios nos pilares verticais

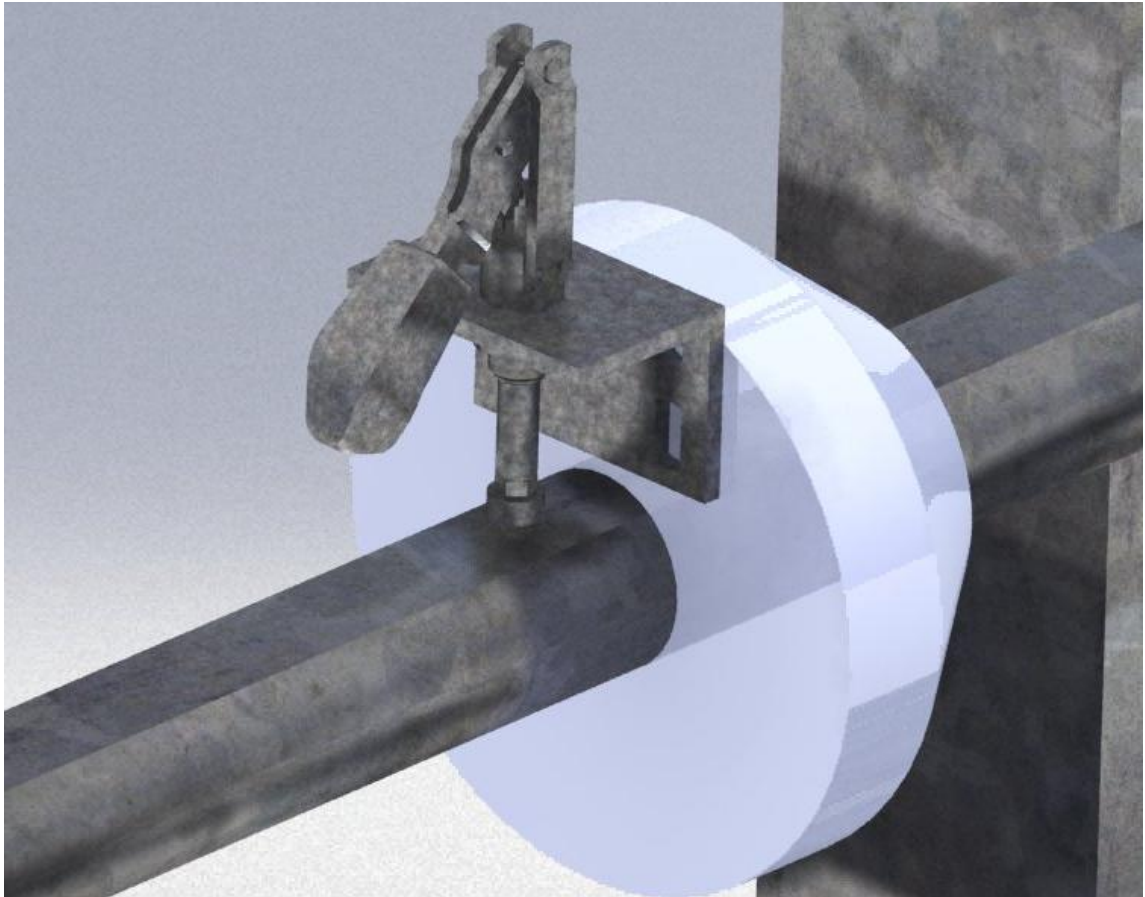


Figura 43 - Pormenor do sistema de fixação dos rolos de manta e de véu nos eixos



Figura 44 - Imagem da estrutura já em serviço

3.3.1.1. Dimensionamento dos veios e do pilar vertical

Atendendo às premissas atrás enunciadas relativamente ao peso máximo que poderá assumir cada rolo de manta ou véu, e à flecha máxima admissível estipulada pela ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda., procedeu-se a uma análise prévia dos esforços nos pilares e veios, com recurso a uma ferramenta informática com a designação de FTool.

Com vista a parametrizar o cálculo a efectuar pelo programa informático, foram introduzidas as propriedades do material.

No que respeita ao cálculo dos pilares, foi efectuado o dimensionamento considerando-os encastrados no chão. Já no que diz respeito aos veios, foi considerado que o mesmo se encontrava encastrado numa das extremidades e suspenso na outra, e ainda que estava sujeito a um peso concentrado na extremidade não apoiada de 60 kg (~600 N), correspondente ao peso do próprio rolo de manta a montar e do esforço que o operário poderá realizar sobre ele na montagem. De facto, esta representa a situação mais desfavorável, já que o rolo é normalmente montado no meio do veio, provocando uma menor ‘flecha’ e momento torsor no apoio.

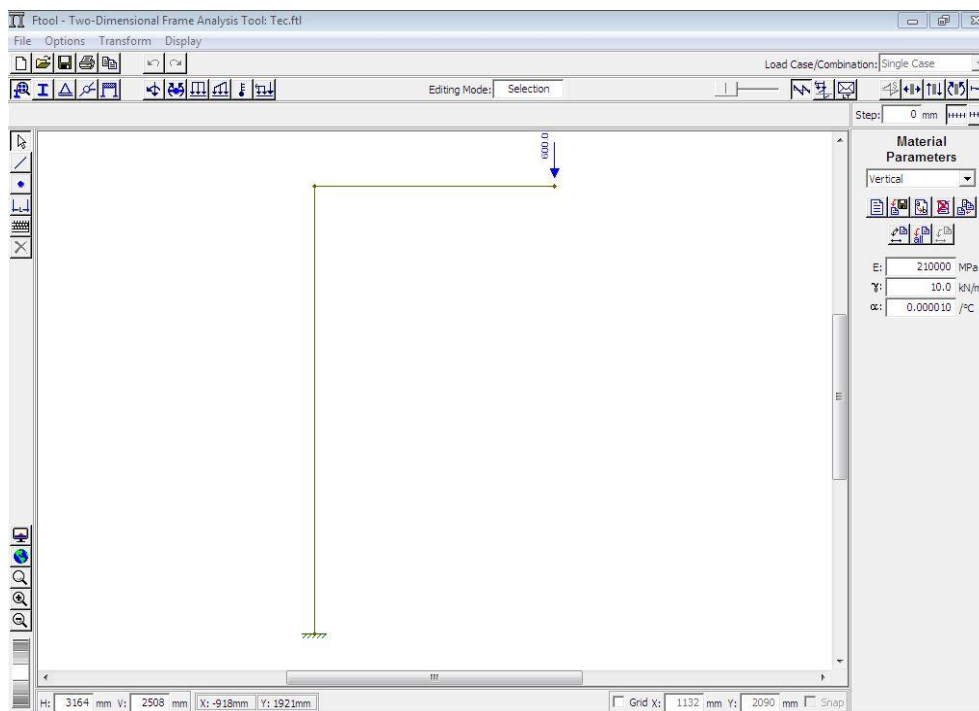


Figura 45 – Aspecto da simulação da carga considerada sobre o veio encastrado

Seguidamente serão apresentados os vários esforços da estrutura nomeadamente os de tração, corte e flexão.

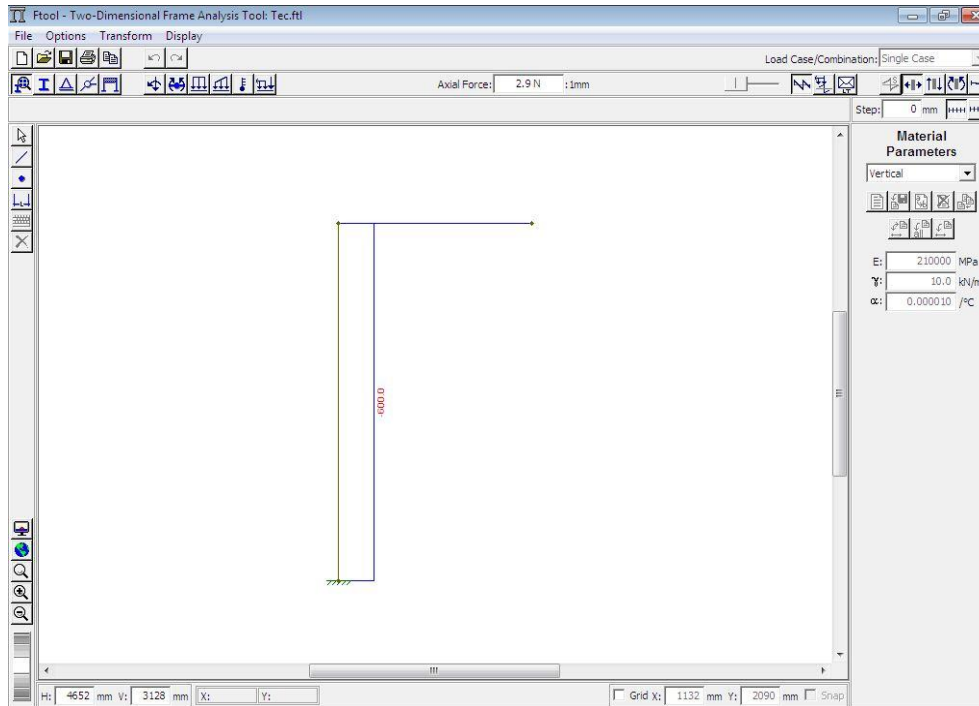


Figura 46 - Esforços resultantes da análise à flexão

Considerando o esforço à flexão, a viga estará sujeita a um esforço de 600 N.

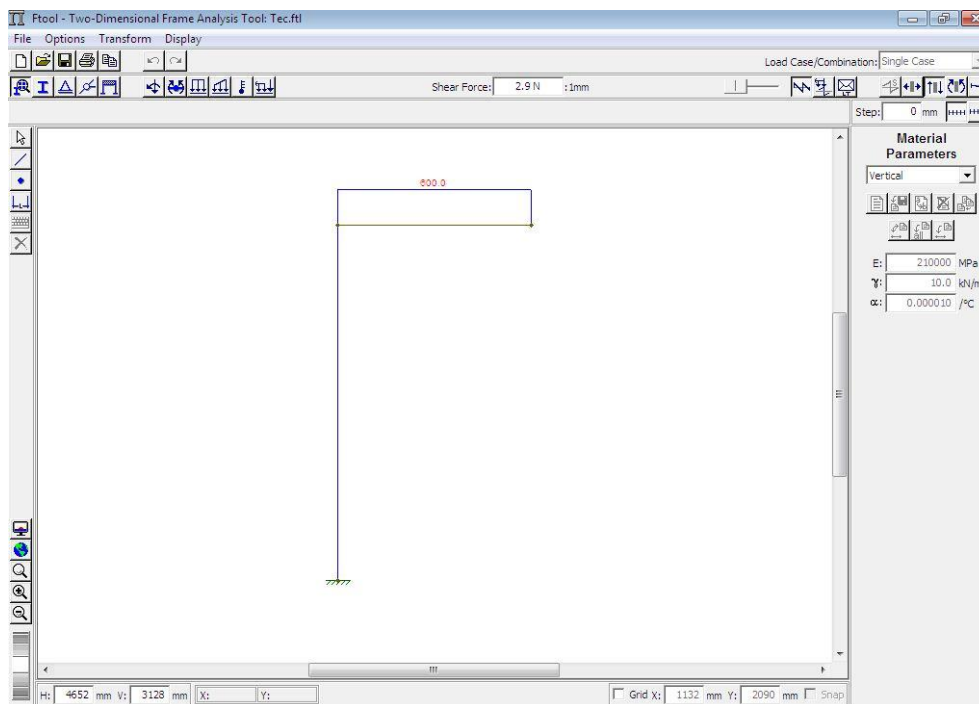


Figura 47 - Análise da solicitação ao corte

Neste caso, verifica-se que o esforço é constante e de 600 N ao longo de toda a viga.

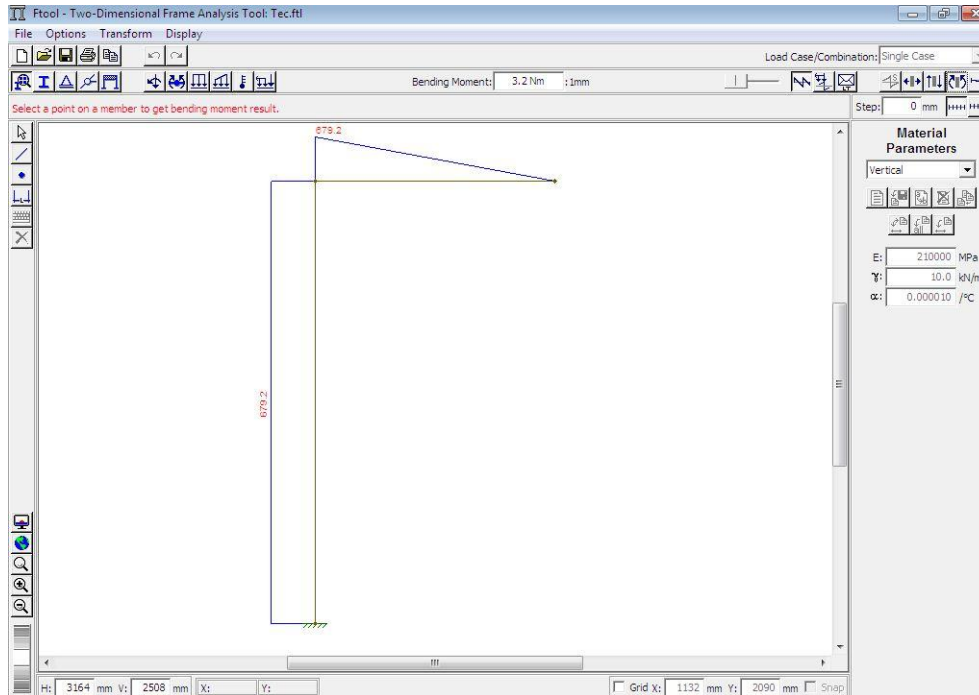


Figura 48 - Análise dos esforços de flexão

Na viga vertical temos um esforço constante de 679,2 Nm e no eixo horizontal um esforço que diminui até zero na extremidade.

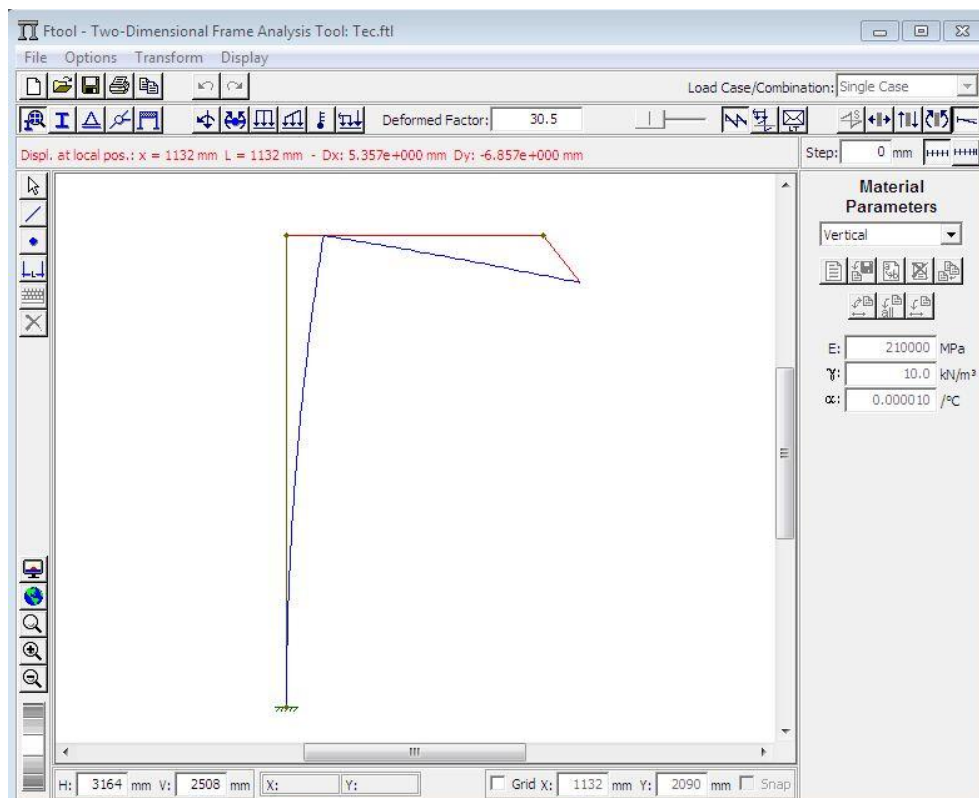


Figura 49 - Análise de solicitação à flecha

Apesar de todos os esforços serem importantes, foi imposto que a ‘flecha’ na extremidade não apoiada do veio não deveria ultrapassar os 20 mm. Verificou-se que, com base no material utilizado, se obtinham valores bastante inferiores, na ordem dos 6mm. Verifica-se assim que a estrutura fica sobredimensionada, ou seja, com um elevado factor de segurança, como aliás era solicitado pela ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., precavendo eventuais situações de uso incorrecto da estrutura. Seguidamente, e com vista a confirmar os resultados obtidos, foi utilizada a simulação estrutural facultada pela ferramenta informática Solidworks®, com vista a validar com mais rigor os resultados. As condições de entrada mantiveram-se, sendo a simulação efectuada apenas para um pilar e um veio, e considerando as mesmas condições de apoio.



Figura 50 – Representação esquemática das solicitações e apoio da viga e do eixo

Tabela 10 – Propriedades volumétricas consideradas em cada situação

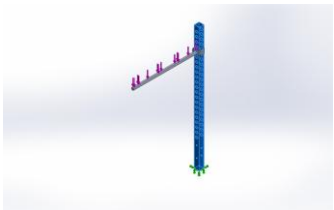
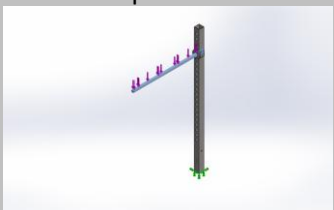
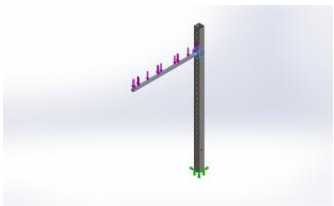
Peça	Propriedades volumétricas
<p>Pilar</p> 	<p>Massa: 17,219 4 kg Volume: 0,002 207 61 m³ Densidade: 7 800 kg/m³ Peso: 168,75 N Seção quadrada 80 mm</p>
<p>Veio suporte mantas</p> 	<p>Massa: 10,504 1 kg Volume: 0,001 346 68 m³ Densidade: 7 800 kg/ m³ Peso: 102,94 N Varão 40 mm</p>
<p>Anilha batente</p> 	<p>Massa: 1,044 77 kg Volume: 0,000 133 944 m³ Densidade: 7 800 kg/ m³ Peso: 10,238 7 N</p>

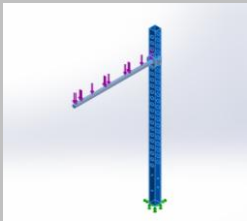
Tabela 11 – Mapa de variáveis consideradas na simulação

Tipo de análise	Estática
Tipo de malha	Malha sólida
Efeitos térmicos:	On
Temperatura de ensaio	298 Kelvin
Efeito de impacto	Off
Opções de incompatibilidade de fronteira	Automático
Grandes deslocamentos	Off
Calculo das forças de corpo livre	On
Fricção	Off

Tabela 12 – Mapa de variáveis consideradas na simulação

Sistema de unidades:	SI (MKS)
Comprimento/deslocamento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidade angular	Rad/sec
Pressão/Tensão	N/m ²

Tabela 13 – Mapa de propriedades consideradas para o material

Modelo em causa	Propriedades	Componentes
	Nome:	Aço ao carbono S235
	Tipo de modelo	Linear elástico isotrópicc
	Critério Tensão	Max von Mises Tensão
	Tensão de corte:	2,205 94e+008 N/m²
	Resistência à tração:	3,998 26e+008 N/m²
	Módulo de elasticidade	2,1e+011 N/m²
	Coeficiente de Poisson	0,28
	Massa densidade:	7 800 kg/m³
	Módulo de corte	7,9e+010 N/m²
	Coeficiente térmico de expansão	1,3e-005 /Kelvin
		Corpo
		Suporte vertical 80 mm x80 mm x4 mm
		Veio suporte mantas
		Anilha batente-

Contacto	Imagem representativa
Contacto global	

Figura 52 – Representação esquemática das solicitações

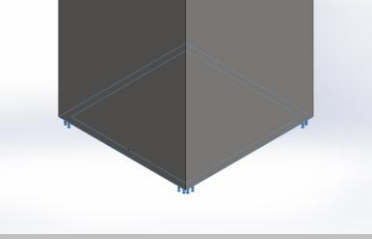
Imagem	Detalhes
	<p>Entidade: Tipo:</p> <p>1 face (s) Fixada geometricamente na base</p>

Figura 51 – Representação esquemática das cargas e apoios

Tabela 14 – Resultados da simulação para as condições anteriormente impostas

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Forças de reação (N)	-0,040 323 3	599,944	-0,013 824 5	599,944
Momentos de reação (N-m)	0	0	0	0

Tabela 15 – Detalhe de informações sobre a malha no elemento em análise

Informação da Malha	
Tipo malha	Malha sólida
Malha usada	Standard
Pontos	4 Pontos
Tamanho do elemento	23,895 3 mm
Tolerância	1,194 77 mm
Qualidade da malha	Alta
Informações de malha – Detalhes	
Total Nós	17 829
Total Elementos	8 374
Proporção máxima	28,162
Percentagem de elementos com proporção < 3	11,9
Percentagem de elementos com proporção > 10	2,48
Percentagem de elementos destorcidos (Jacobian)	0




Tabela 16 – Mapa de forças e momentos

Forças de Reação

Seleção	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo modelo	N	-0,040 323 3	599,944	-0,013 824 5	599,944

Momentos de Reação

Seleção	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo modelo	N-m	0	0	0	0

Com base nas simulações efectuadas, foi possível extrair alguns diagramas que permitem verificar o estado de tensão em cada componente, conforme se poderá ver nas figuras seguintes.

Nome	Tipo	Min	Max
Tensão	VON: Tensão de Von Mises	822,438 N/m ² Nós: 7 170	5,411 94e+007 N/m ² Nós: 17 811

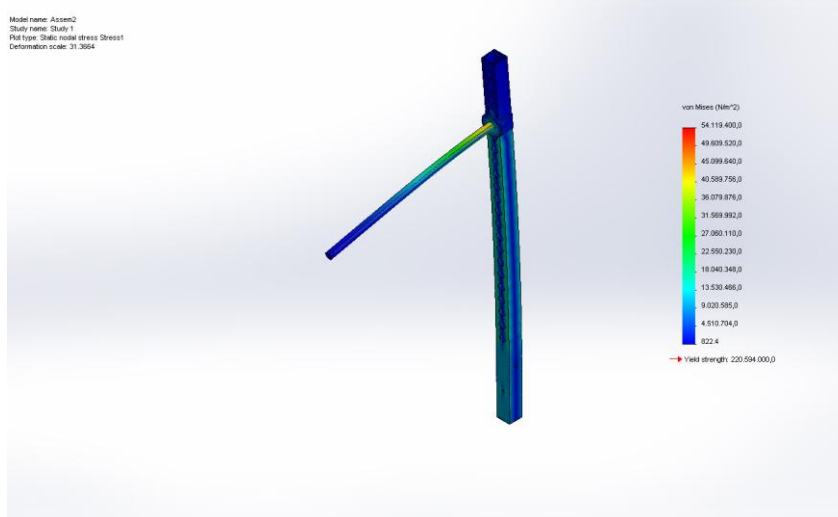


Figura 53 – Diagrama esquemático das solicitações impostas à viga de suporte vertical e eixo de suporte do rolo das mantas, pelo critério de Von Mises

Nome	Tipo	Min	Max
Deslocamento	URES: Deslocamento resultante	0 mm Nós: 234	6,746 84 mm Nós: 15 526

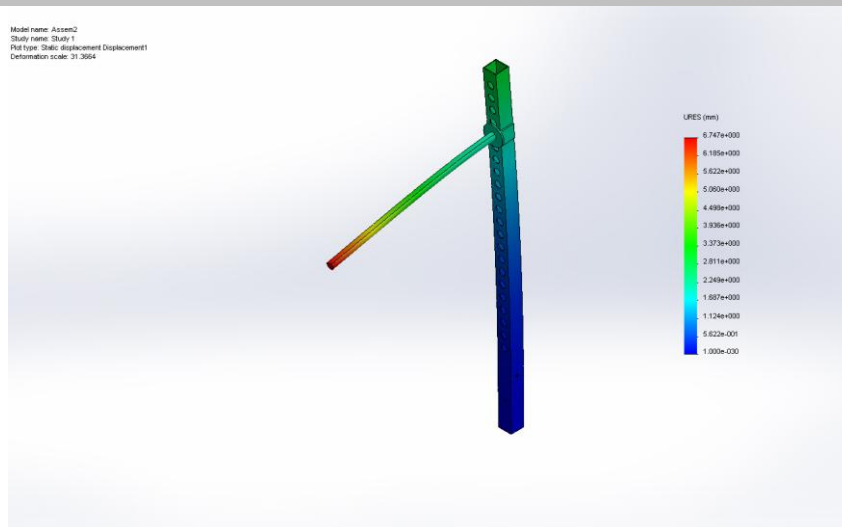


Figura 54 – Diagrama esquemático dos deslocamentos impostos à viga de suporte vertical e eixo de suporte do rolo das mantas

Nome	Tipo	Min	Max
Tensão	ESTRN: Tensão equivalente	2,339 1e-009	0,000 139 914
		Elementos: 3101	Elementos: 7 362

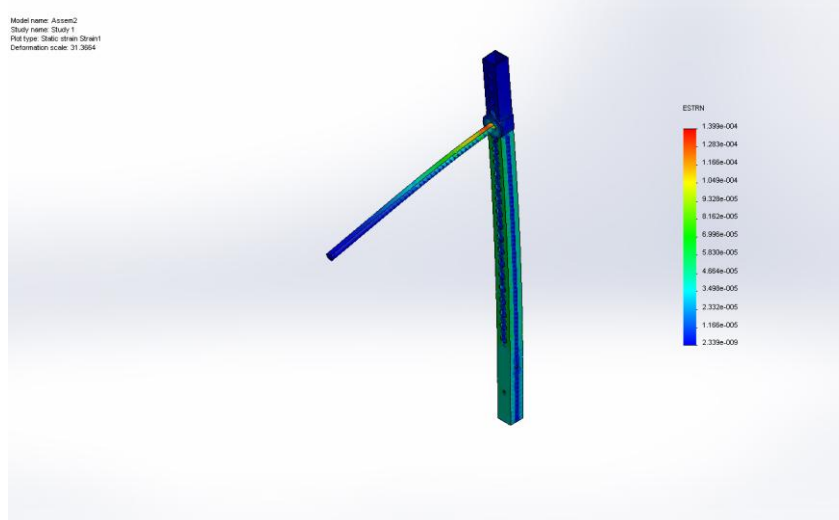


Figura 55 – Diagrama de tensões equivalentes impostas à viga de suporte vertical e eixo de suporte do rolo das mantas

Nome	Tipo	Min	Max
Coefficiente de segurança	Automático	4,076 06	268 220
		Nós: 17 811	Nós: 7 170

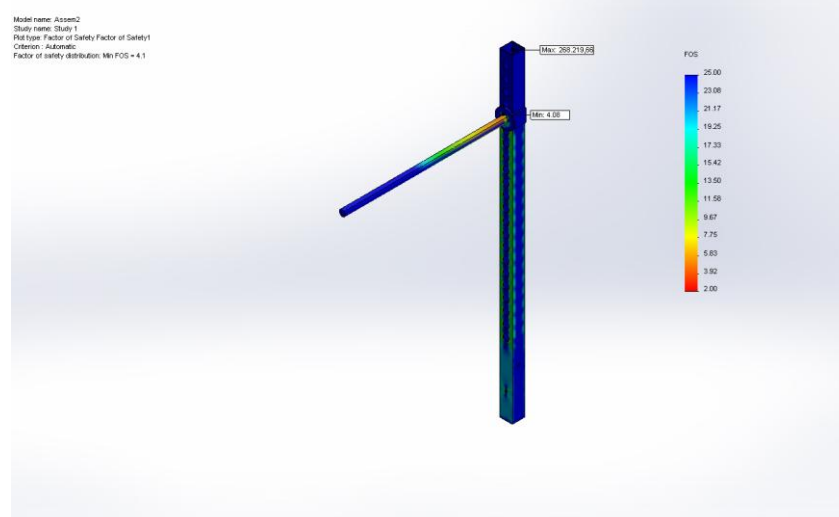


Figura 56 – Diagrama dos Coeficientes de Segurança presentes no sistema

Com esta análise tornou-se possível concluir que a estrutura, construída com os materiais atrás referidos, apresenta um coeficiente de segurança de 4,1 e um deslocamento máximo de 6,7 mm, o que é coerente com a análise realizada com o Ftool, cumprindo com o deslocamento inferior a 20 mm conforme o pretendido.

O sobredimensionamento foi desde o início desejado pela empresa, já que poderão existir obras, no futuro, que necessitem de vários rolos de manta e assim está garantido que a estrutura suportará o respectivo acréscimo de peso. Atendendo ao valor obtido, e à robustez desejada para este equipamento, entendeu-se por bem optar por um varão em aço S235 com o diâmetro nominal de 40 mm. Atendendo a que o pilar terá que suportar o momento provocado pelo peso máximo do rolo colocado na extremidade oposta do veio, procedeu-se ao cálculo do momento flector máximo provocado no pilar, atendendo ao esquema e expressão de cálculo seguinte:

Tabela 17 – Mapa de dados e expressões usadas

Aço	Y = Flecha max (m)	0,02
E = 210GPa	F = Força (N)	600
$\sigma_{ced} = 600\text{MPa}$	L = comp (m)	1
	E = Mod. Young (Pa)	2,1E+11
Flecha	I = Mom. Inercia	
$Y_{max} = (F \times L^3) / (3 \times E \times I)$	σ = Tensão Instalada	
	M = Momento flector	
Tensão = $M / (I / Y)$	Y = Raio	

Tabela 18 – Mapa de dados para o cálculo

I [m⁴]	4,7619E-08
r [m]	0,015 691 798
D [mm]	31,383 595 79
D [mm]	39,229 494 74
com 25% Cs	

Tendo em atenção o estudo anterior, e atendendo ao trato que a estrutura vai sofrer e à robustez pretendida, e tendo ainda em consideração que os pilares vão sofrer uma furação regular ao longo de uma mesma face, o que estará na origem de alguma concentração de tensões que se fará notar, optou-se por utilizar tubo quadrado normalizado de 80 mm x 80 mm x 4 mm.

Como suporte dos pilares, foi selecionado um tubo de aço de maior dimensão, no qual os pilares pudessem ser montados, existindo uma folga de montagem suficientemente pequena para que não se verificassem oscilações do pilar em funcionamento mas, simultaneamente, não dificultasse a montagem dos pilares no suporte da estrutura. Assim, foi

selecionado para todo o estrado da estrutura e para o suporte dos pilares, tubo de aço normalizado de 90 x 90 x 4 mm.

3.3.2. Desenvolvimento de um novo sistema de aquecimento para as feiras

Conforme referido anteriormente, o sistema de resistências planares usado no aquecimento das diferentes feiras pareceu, desde o início, provocar fortes perdas de calor, visto a área de contacto das resistências com a feira ser significativamente inferior à área total (e útil) das resistências. Sendo a condução a forma mais eficaz de transmitir o calor gerado pelas resistências à feira, verificou-se que facilmente se poderia poupar energia neste sistema.

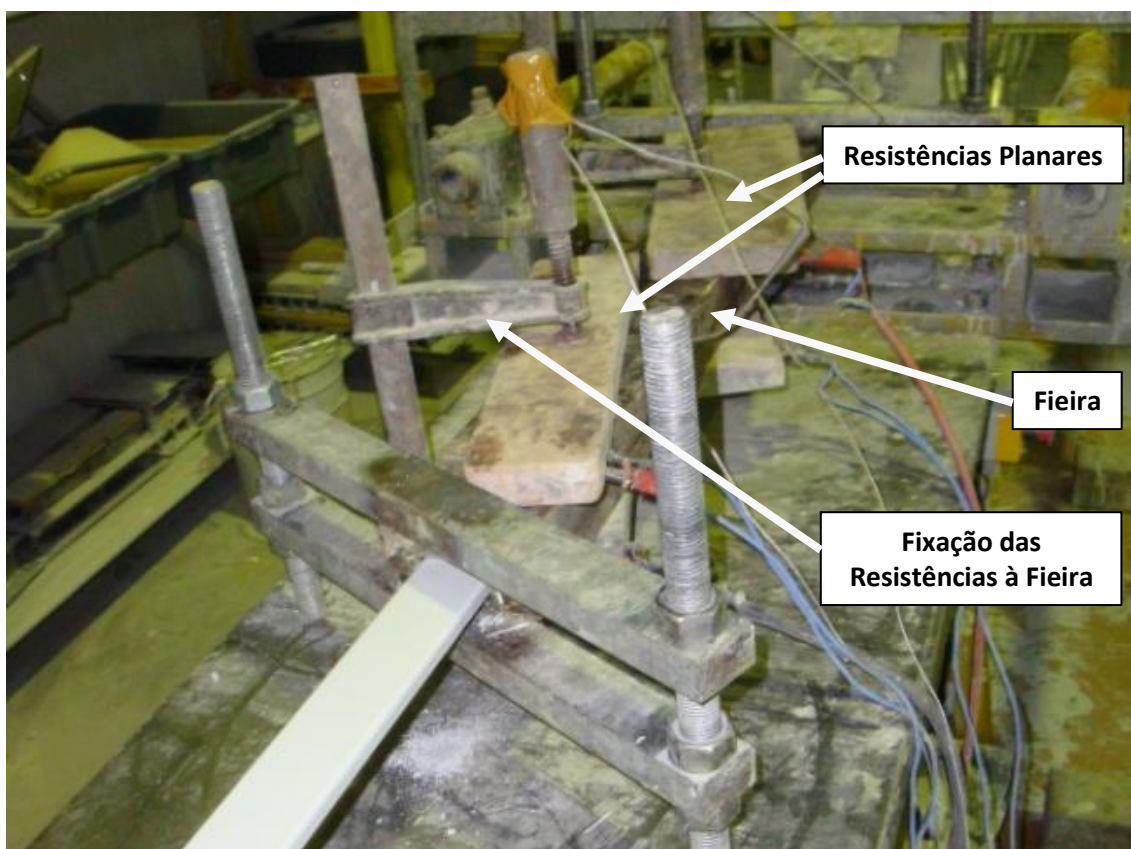


Figura 57 - Pormenor do sistema inicial de aquecimento da feira

Atendendo a que existia espaço entre a superfície superior e a cavidade do molde da feira, assim como entre a superfície inferior e a mesma cavidade, e atendendo às experiências já levadas a cabo por Sumerak et al. [48, 50, 52], foi decidido que a alternativa de incorporar resistências cilíndricas na matriz, através de furos correctamente localizados e devidamente calibrados ao longo da feira, mereceria ser estudada.

Assim, procedeu-se à selecção de uma feira de uso mais corrente, e procedeu-se à modelação 3D da mesma, com vista ao estudo por elementos finitos da energia consumida no

modelo de aquecimento inicial e no modelo provido de resistências embebidas na fieira. No entanto, como a fieira é simétrica em relação ao plano vertical que passa pelo seu centro, e com o intuito de economizar esforço e tempo de simulação, procedeu-se ao corte vertical da mesma pelo seu centro, conforme o ilustrado na figura seguinte.

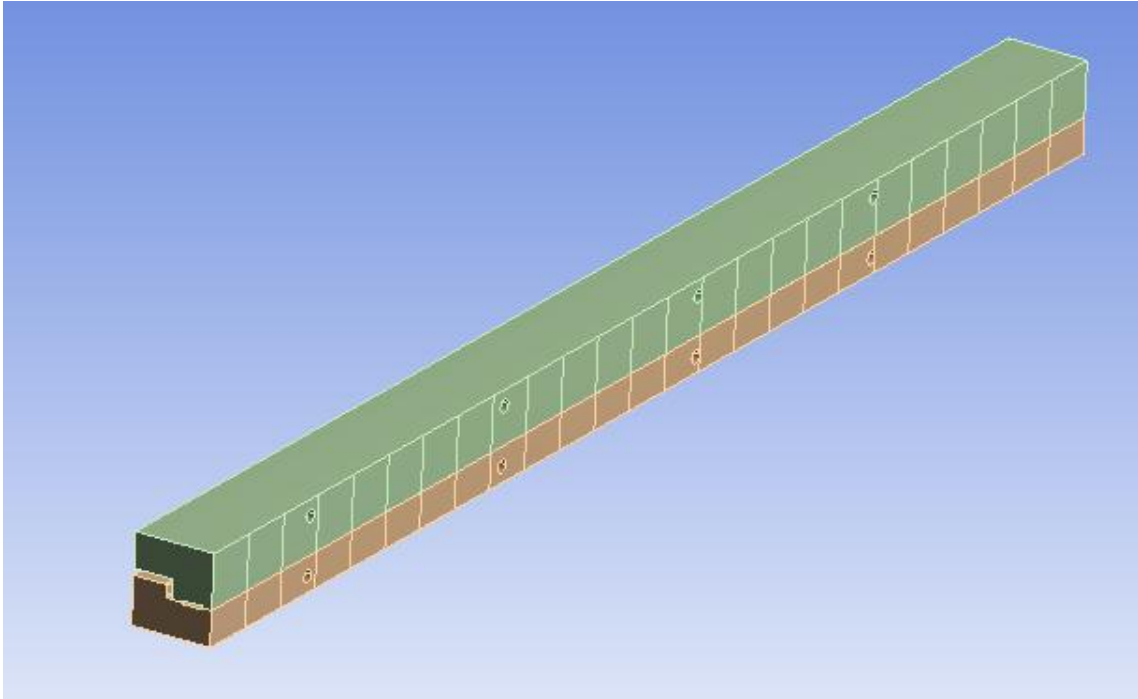


Figura 58 - Pormenor da modelação 3D utilizada no software de simulação (meia-fieira)

Para dar início ao estudo da simulação, tornava-se entretanto necessário saber o comportamento da temperatura ao longo da fieira na situação inicial, para que a posição das resistências embebidas pudesse salvaguardar o mesmo perfil de temperaturas ao longo do perfil. Assim, com o objectivo de se obter o perfil de temperaturas ao longo da fieira com as resistências planares iniciais, procedeu-se a um estudo por termografia da fieira, recolhendo assim a temperatura medida ao longo da mesma.

3.3.2.1. Análise termográfica do perfil de temperaturas ao longo da fieira tendo em conta o modelo de aquecimento original

Para a realização deste ensaio, foi utilizada uma câmara termográfica da marca FLIR, modelo i40 que possuía as seguintes características:

- Espectro: Banda larga (7,5 - 13 μm);
- Tipo de detector: Focal Plane Array (FPA) microbolometer 120x120 pixels;
- Taxa de aquisição de imagens: 9 Hz;
- Precisão: $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$ da leitura;
- Sensibilidade térmica: $<0.20\text{ }^\circ\text{C}$ a $+25\text{ }^\circ\text{C}$;
- Intervalo de temperatura: -10 a $+350\text{ }^\circ\text{C}$;
- Características do display: 89 mm LCD colorido, 18 bit de cor;
- Interpolação: Detector de imagem interpolado de 240x240 pixels.

Salvaguardando todas as condições impostas por uma análise desta natureza, nomeadamente a minimização de outras fontes de radiação de calor e direccionamento do feixe perpendicularmente à superfície em análise, procedeu-se à realização das imagens de termografia a todo o comprimento lateral da fieira.

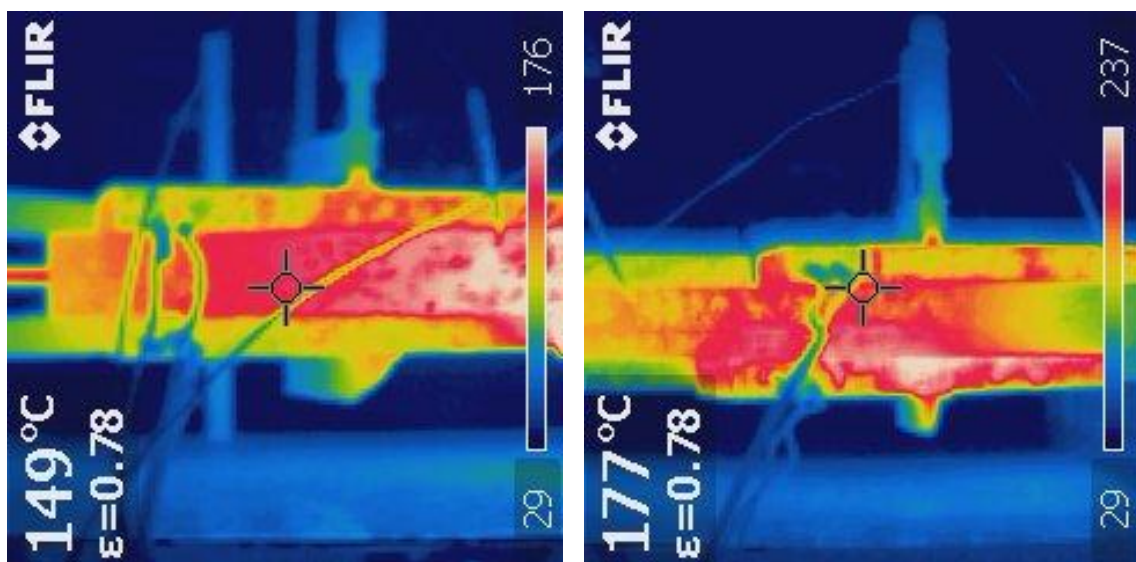


Figura 59 - Imagens resultantes da análise termográfica de uma das superfícies laterais da fieira em estudo (análise realizada em dois segmentos ao longo da fieira)

Na Figura 59 poderão ser vistas as imagens resultantes da análise termográfica. Visto a análise ter sido feita numa das superfícies laterais, existe alguma interferência do sistema de fixação das resistências à fieira, nomeadamente os grampos de aperto. Para não perder rigor na análise, e seguindo as instruções da distância máxima recomendada pelo fabricante para a aquisição das imagens, a análise foi dividida em dois segmentos que se complementam e que perfazem o comprimento total da fieira. O equipamento de termografia vem acompanhado de uma aplicação informática específica que permite, através da imagem, converter a mesma em

valores concretos de temperatura, atendendo ao material em análise. Assim, a superfície lateral da fieira foi dividida em 100 áreas de análise, correspondendo a 4 diferentes linhas com 25 elementos cada linha e, com estes valores, foi possível traçar o gráfico correspondente ao perfil de temperaturas existente na matriz. De salientar que a análise foi efectuada depois do processo de pultrusão e temperatura na matriz estar completamente estabilizado, ou seja, muito depois do processo ter arrancado, embora durante o arranque as condições de temperatura já sejam próximas das condições estáveis de funcionamento na pultrusão.

De referir ainda que foi manifestamente impossível obter a partir do fornecedor da resina utilizada no processo, os dados relativos à temperatura gerada pela reação exotérmica da resina durante o processo de cura, facto que se tornou impossível de contornar e que introduz na análise um erro impossível de quantificar.

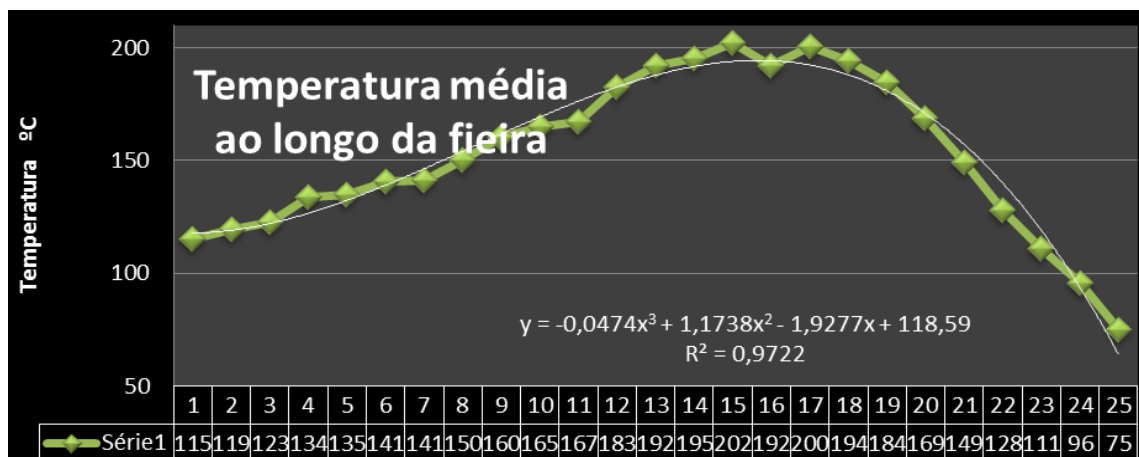


Figura 60 - Perfil de temperatura ao longo da fieira, resultante da análise termográfica (entrada da fieira do lado esquerdo e saída da fieira do lado direito)

3.3.2.2. Simulação e análise dos resultados

Tendo agora por base a curva de temperatura obtida, modelou-se em 3D o sistema inicial de aquecimento, com as resistências planares, com vista à simulação do funcionamento das resistências e medição da energia consumida pelas mesmas, tanto na fase de arranque como na fase estável de pultrusão.

Na Figura 61 poderá ser analisada a posição estudada das resistências planares, face à posição normal da fieira, sendo esta a configuração normalmente utilizada pela ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. para o fabrico do perfil em análise.

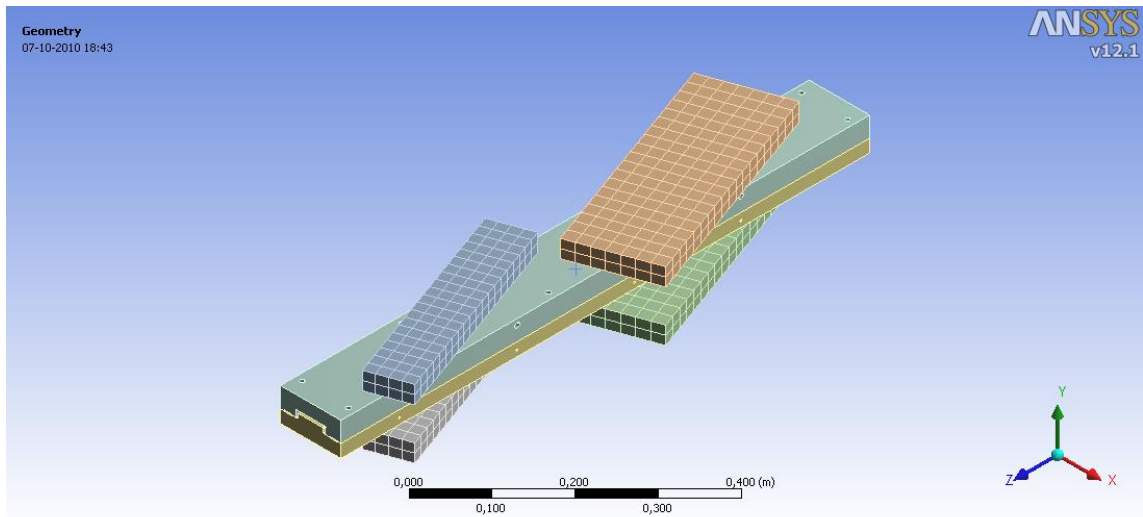


Figura 61 - Modelação 3D do sistema inicial de aquecimento da fieira

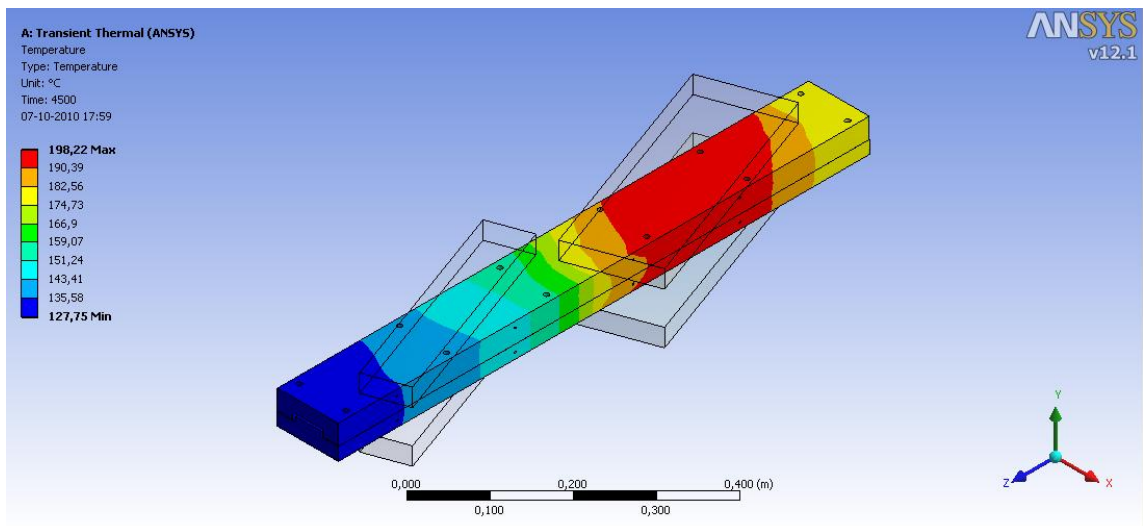


Figura 62 - Modelação da distribuição da temperatura na fieira em regime estável de funcionamento

Com recurso à aplicação informática ANSYS, versão 12.1, foi possível simular as fontes de calor (resistências) e a sua distribuição no tempo e no espaço. A Figura 62 ilustra a forma como a temperatura se encontra distribuída pela fieira, quando em regime estável de funcionamento da mesma, ou seja, no decurso normal do processo de pultrusão.

Como metodologia de análise foi considerada a medição da temperatura em 4 pontos distintos ao longo da fieira e foi estabelecida a correspondente temperatura tendo por base o perfil de temperaturas, em torno da qual foi permitida uma flutuação de ± 5 °C. O equipamento de pultrusão está dotado de 4 canais de controlo que permitem analisar a temperatura e ligar ou desligar as resistências, consoante a temperatura nos pontos em análise desce ou sobe 5 °C em relação à referência, respectivamente.

Como base de trabalho para a análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF), foram consideradas as seguintes condições:

- Os contactos foram considerados perfeitos;
- Temperatura inicial para todos os corpos: 22 °C;
- Temperatura ambiente constante;
- Coeficiente de Convexão: $2\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{°C}$;
- Emissividade: 0,8.

Com vista a incrementar a precisão de análise, foi utilizada uma malha tetraédrica de 4 nós, a qual, após convergência, resultou em 256 975 pontos em análise. Esta análise permitiu verificar quanto tempo é necessário para as resistências aquecerem até à temperatura de trabalho, quais os intervalos de tempo em que as resistências necessitam ligar para manter a temperatura dentro do intervalo anteriormente referido, permitindo depois calcular qual a energia consumida pelas resistências no processo.

O tempo utilizado na simulação foi de 4 500 segundos. Verificou-se, após as primeiras análises, que o sistema necessita de 3 600 segundos para entrar no regime estável de funcionamento, pelo que os restantes 900 segundos foram utilizados para estudar o comportamento do sistema em situação de funcionamento contínuo/estável. Este processo de simulação resultou no gráfico de funcionamento das resistências mostrado na Figura 63, onde é possível verificar que os dois pares de resistências planas têm funcionamento distinto, apesar de possuírem a mesma potência. A inércia no aquecimento das resistências maiores é vincadamente maior. Por outro lado, as resistências mais pequenas demoram mais tempo a entrar num regime estável de funcionamento. De referir, ainda, que a temperatura que o sistema necessita a partir de cada par de resistências é também diferente, como facilmente se poderá observar a partir da análise do gráfico mostrado na Figura 63. Na tabela 19 poderão ser observados os dados referentes ao consumo energético da solução de aquecimento inicialmente presente na fieira em estudo.

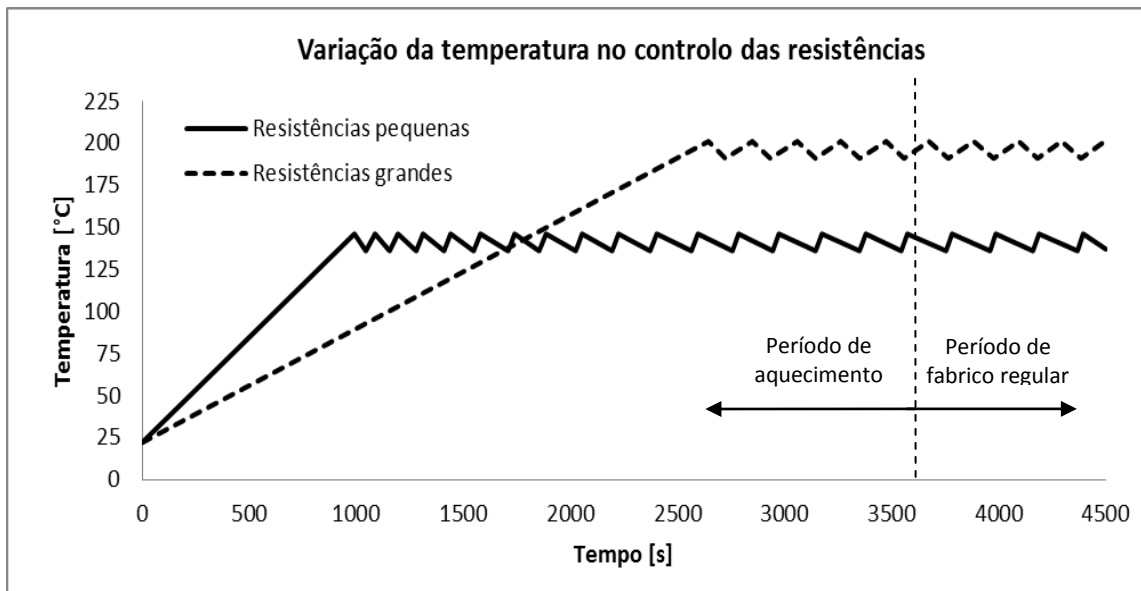


Figura 63 - Simulação do funcionamento das resistências no sistema inicial de aquecimento

Tabela 19 - Dados de funcionamento do sistema de aquecimento inicial

	Resistências planas		
	Aquecimento (1h) [kWh]	Produção (7h) [kWh]	Subtotal do tempo de trabalho (8h) [kWh]
Resistências pequenas	0,660	0,192	2,0
Resistências grandes	1,412	0,948	8,0
Consumo total de potência por dia de fabrico [kWh]			10,0
Consumo total de potência por mês de fabrico (22 dias) [kWh]			221,1

Seguidamente, o trabalho concentrou-se em voltar a reproduzir o perfil de temperaturas inicialmente obtido na análise termográfica, mas agora baseado num aquecimento gerado por quatro pares de resistências cilíndricas embebidas na feira. De referir que a feira em estudo já possuía quatro pares de furos com o diâmetro de 8 mm, os quais eram utilizados para inserir os termopares responsáveis pela medição da temperatura segundo quatro pares de pontos. Estes furos foram realizados com o intuito de ficarem uniformemente distribuídos ao longo da feira mas, devido ao facto de existirem parafusos de conexão da parte superior com a parte inferior da feira, os mesmos acabaram por não ficar uniformemente distribuídos. Mesmo assim, e para evitar a realização de novas furações numa fase experimental, sem que se dispusesse de dados que permitissem assegurar que esta solução poderia ser substancialmente melhor do que a original, e quando ainda não tinha sido realizado qualquer estudo com vista a um adequado posicionamento das mesmas, a utilização dos furos já existentes mostrou ser uma alternativa expedita para a realização dos ensaios prévios.

Assim, tendo por base a disposição possível para os quatro pares de resistências, partiu-se para a simulação dos ciclos de aquecimento e arrefecimento da feira para cada par de resistências, tendo em atenção a sua localização e o intervalo de temperaturas de trabalho inicialmente definido para o sistema de aquecimento inicial. Os resultados da simulação efectuada com o auxílio da ferramenta informática ANSYS permitiram obter o conjunto de gráficos que seguidamente são mostrados, tendo por base o esquema de posicionamento e referenciação dos pares de resistências mostrado na Figura 64.

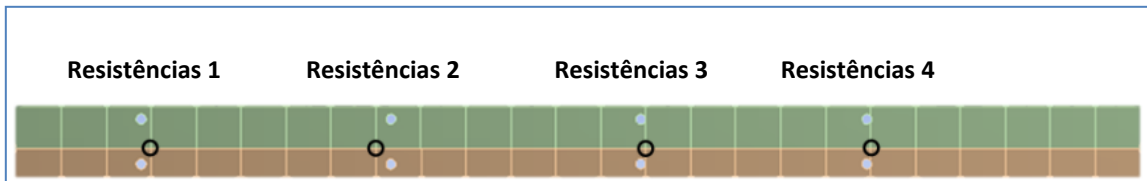


Figura 64 - Disposição dos diferentes pares de resistências ao longo da feira

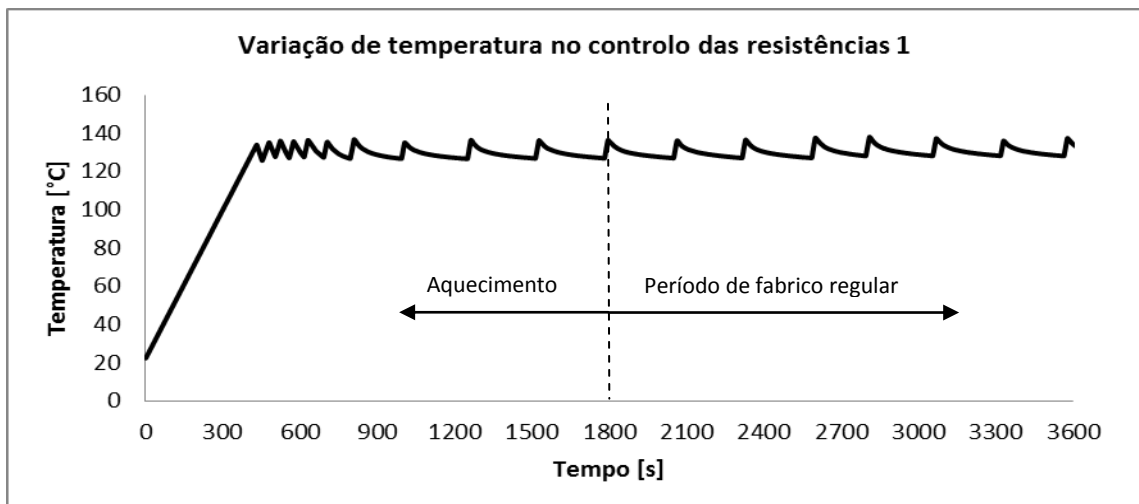


Figura 65 - Simulação do funcionamento do par de resistências 1

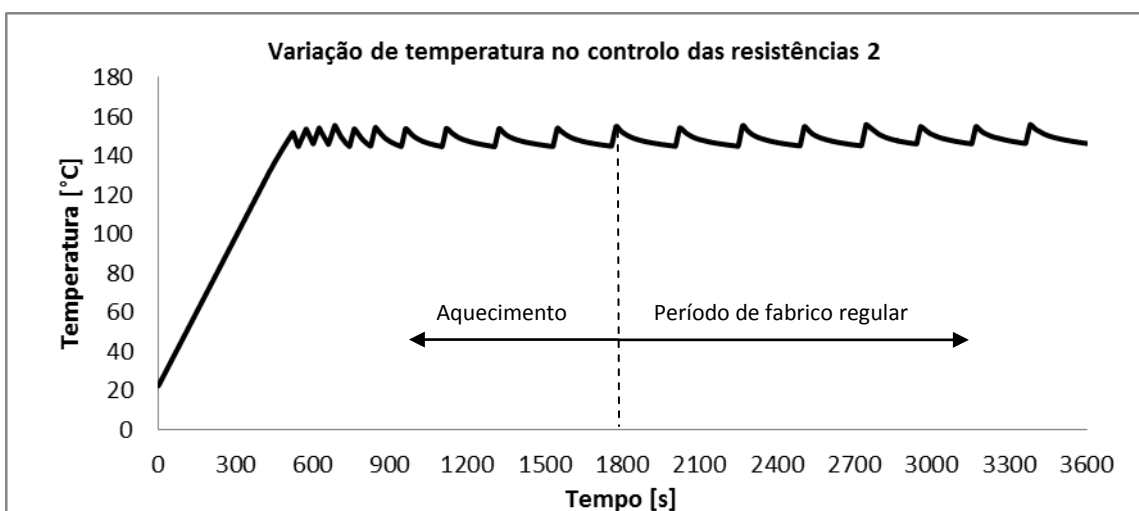


Figura 66 - Simulação do funcionamento do par de resistências 2

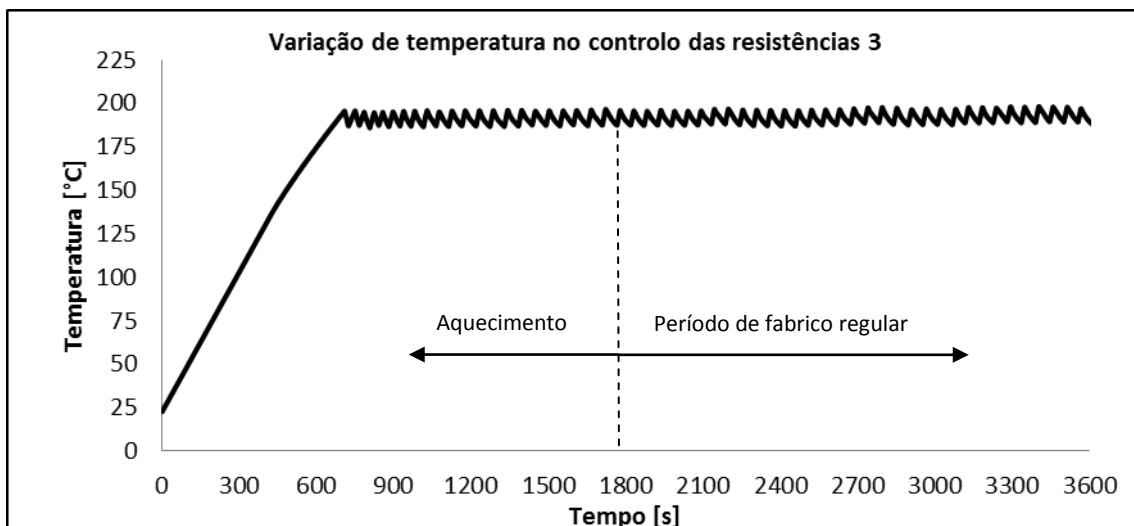


Figura 66 - Simulação do funcionamento do par de resistências 3

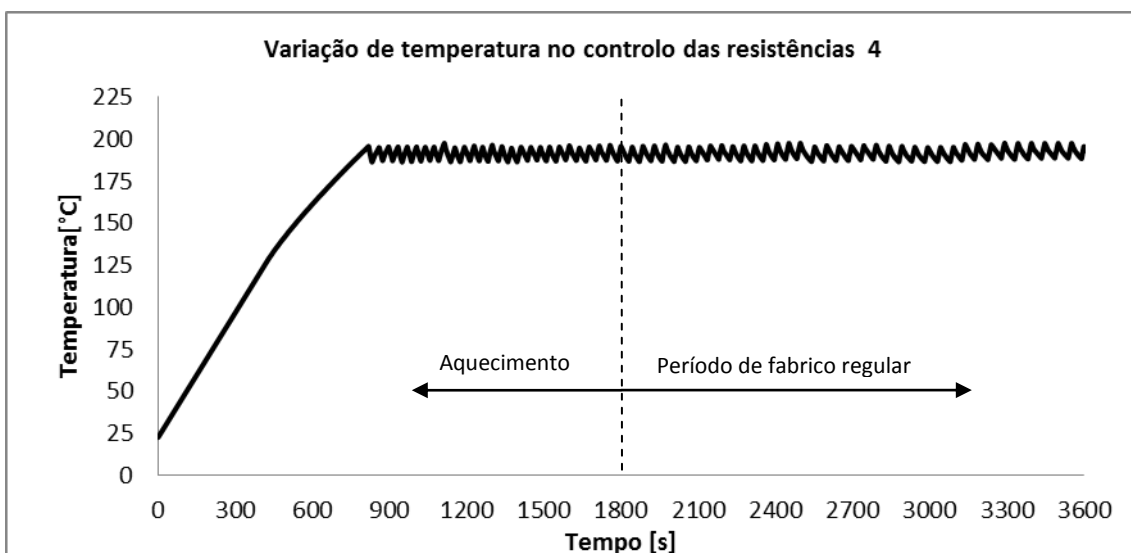


Figura 67 - Simulação do funcionamento do par de resistências 4

Com base nestes gráficos provenientes da simulação efectuada com o auxílio do módulo de Análise de Elementos Finitos da ferramenta informática ANSYS, foram elaborados os quadros referentes ao consumo energético referente a cada par de resistências estudado. Os dados poderão ser observados nos quadros que seguidamente são mostrados, com a compilação da informação mais relevante.

Tabela 20 - Consumo energético referente a cada par de resistências

Resistências 1		Resistências 2	
Aquecimento [h]	0,5	Aquecimento [h]	0,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	9,65	Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	11,70
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,322	Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,390
Potência de aquecimento [W]	800	Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,258	Potência utilizada [kWh]	0,312
Tempo de produção [h]	7,5	Tempo de produção [h]	7,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	1,40	Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	2,05
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,047	Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,068
Potência de aquecimento [W]	800	Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,038	Potência utilizada [kWh]	0,054
Resistências 3		Resistências 4	
Aquecimento [h]	0,5	Aquecimento [h]	0,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	16,62	Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	20,18
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,554	Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,673
Potência de aquecimento [W]	800	Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,443	Potência utilizada [kWh]	0,538
Tempo de produção [h]	7,5	Tempo de produção [h]	7,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	6,72	Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	7,72
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,224	Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,257
Potência de aquecimento [W]	800	Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,179	Potência utilizada [kWh]	0,206

Da compilação dos dados referentes a estes quatro pares de resistências, resulta o quadro da tabela 21, que resulta no somatório da energia consumida pelo conjunto de todas as resistências agora embebidas na fieira.

Comparando os valores resultantes das tabelas 19 e 21, poderemos facilmente chegar ao quadro resumo apresentado na tabela 22.

Tabela 10 - Consumo energético referente à totalidade das resistências

Resistências cilíndricas			
	Aquecimento (0,5h) [kWh]	Produção (7,5h) [kWh]	Subtotal do tempo de trabalho (8h) [kWh]
Sistema de aquecimento 1 e 2	0,569	0,092	0,975
Sistema de aquecimento 3 e 4	0,981	0,385	3,377
Consumo total de potência por dia de fabrico [kWh]			4,352
Consumo total de potência por mês de fabrico (22 dias) [kWh]			95,744

Tabela 11 - Consumo energético referente a cada par de resistências

Resistências planas – Potência consumida por dia de fabrico [kWh]	10,048
Resistências cilíndricas – Potência consumida por dia de fabrico [kWh]	4,35
Redução [%]	-56,7%

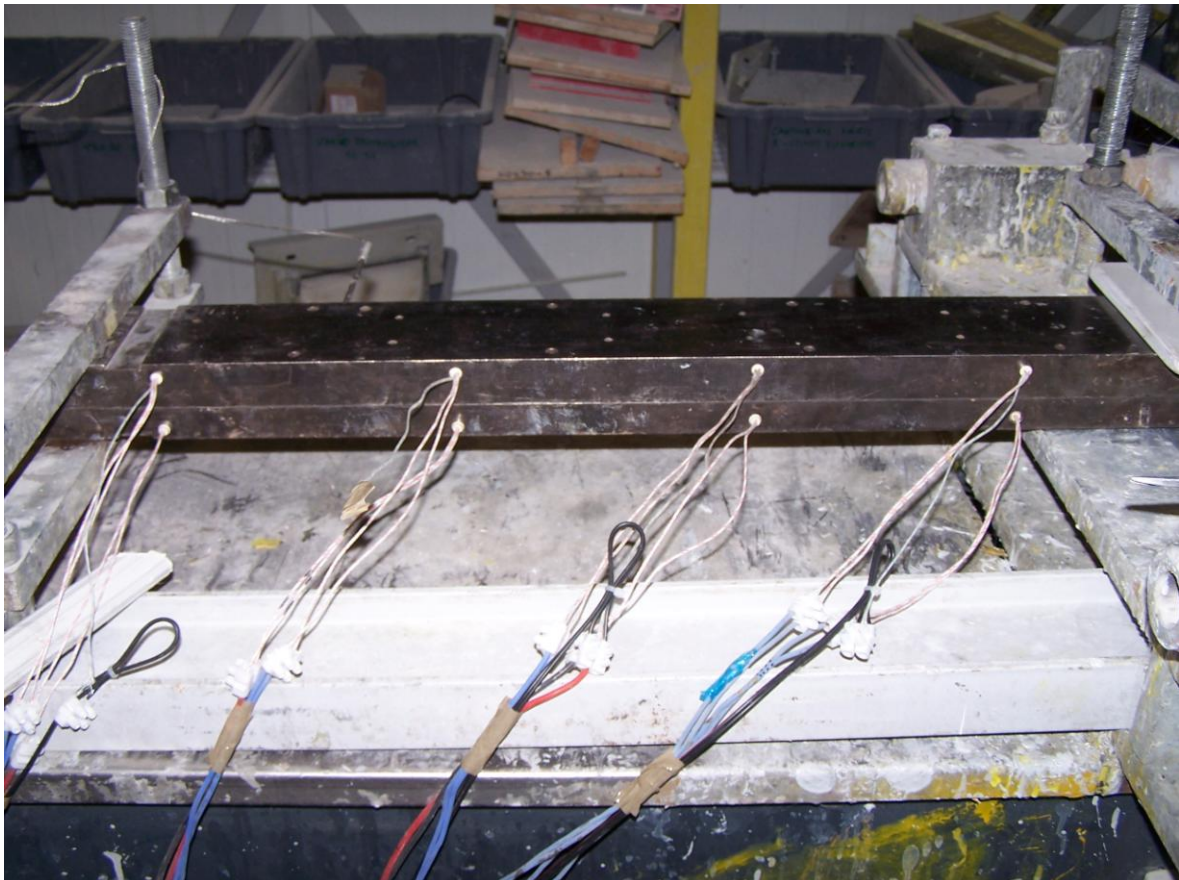


Figura 68 - Imagem ilustrativa da aplicação dos quatro pares de resistências cilíndricas na feira

Face aos resultados apresentados na Tabela 11, facilmente se constata que a poupança energética conseguida, em termos percentuais, é extremamente significativa, atingindo cerca de 57%. A implementação deste sistema permitirá uma poupança de energia significativa, com todas as repercussões possíveis em termos de produtividade e meio ambiente. A solução foi implementada na prática, sem qualquer optimização da posição das resistências ao longo da feira, permitindo comprovar experimentalmente os resultados obtidos por simulação.

3.3.3. Desenvolvimento de um novo sistema de guiamento final das fibras

As fibras, desde que saem do bastidor de armazenamento até à feira, passam por um sistema inicial de pré-posicionamento, um sistema intermédio de ordenamento e direccionamento das fibras, e um guiamento final já após a impregnação das mesmas em resina, na tina. Os sistemas de guiamento inicial e intermédio das fibras que estão instalados no equipamento de pultrusão poderão ser observados na Figura 69.



Figura 69 - Imagem dos sistemas de guiamento inicial e intermédio das fibras

Posteriormente a estes sistemas, as fibras passam pelos garfos que são mergulhados na tina e entram depois num conjunto de três placas de guiamento das fibras, as quais já se encontram impregnadas em resina. O sistema existente possuía uma série de furos, dispostos aproximadamente em forma de matriz. Cada perfil a produzir poderá necessitar de pouco mais do que uma ou duas dezenas de fibras, no caso de possuir uma secção relativamente pequena e não se destinar a grandes esforços, ou poderá necessitar de muitas dezenas de fibras, no caso de perfis estruturais de grandes dimensões. Cada Ordem de Fabrico, em função do tipo de perfil a produzir, incluía nas instruções de serviço, quais os furos das placas que deveriam ficar preenchidos com a passagem das fibras, competindo ao operador proceder à melhor montagem possível, atendendo também a que as fibras não deveriam ficar cruzadas relativamente ao posicionamento prévio e deveriam estar correctamente posicionadas antes de entrarem na feira.

Atendendo à complexidade da operação, imposta por vezes por um elevado número de fibras, esta tarefa implicava um tempo elevado de preparação, albergando ainda riscos consideráveis de falha por parte do operador. Assim, tornava-se vital proceder a um ajustamento da situação, minimizando o tempo de preparação e tentando fazer decrescer drasticamente o nível de risco de erro de montagem associado à operação.

Com base nas premissas anteriormente descritas, foram delineadas as condições que deveriam nortear o projecto do novo sistema:

- O sistema passaria a contar com três novas placas para cada tipo de perfil produzido;
- Cada placa conteria apenas a furação por onde efectivamente deveriam passar as fibras, tentando moldar a posição das mesmas ao perfil a produzir;
- Estas placas passariam a dispor de locais apropriados para a passagem das mantas e véus associados à produção de cada perfil, moldando igualmente a sua posição e forma, para facilitar a sua entrada na matriz;
- O sistema onde estas placas seriam montadas, deveria ser flexível, por forma a que se trocasse facilmente de placas;
- O sistema deveria estar dotado da rigidez necessária para que não introduzisse problemas no normal funcionamento da alimentação das fibras na pultrusão, mas deveria apoiar-se na estrutura da máquina já existente, exigindo o mínimo de adaptações necessárias;
- As placas deveriam permitir a montagem de mandris, quando da produção de perfis ocós.

Atendendo a estes requisitos iniciais do projecto, será de esperar que se consigam as seguintes vantagens:

- Cada placa só tem os furos que deve ter para o perfil em causa, o que elimina em larga escala as hipóteses de erro de montagem das fibras;
- Para além disso, a operação de verificação torna-se muito mais fácil, já que passa a ser necessário apenas verificar se todos os furos existentes em cada placa contêm a respectiva fibra;
- Mudar a placa torna-se bastante simples, já que a mesma passa a encaixar num sistema em “U”, constituído por sua vez em calhas em “U”, que permitem o encaixe da placa na posição vertical. A mesma, sobre acção do seu peso, encaixa e posiciona-se no respectivo sítio, sendo depois limitada no seu curso vertical por uma cavilha, evitando a sua deslocação vertical no decurso do processo de fabrico;
- As placas podem possuir os locais apropriados para a passagem do respectivo mandril, quando o produto a produzir é tubular;
- Poderão ser traçados rasgos nas placas que permitirão a passagem das diferentes mantas e véus, sendo possível efectuar uma pré-configuração das mesmas à forma como deverão entrar na feira;
- A fabricação das placas é simples, já que, ao fazer-se o projecto de um novo produto, e da feira correspondente, faz-se também o desenho destas placas, que serão posteriormente furadas num centro de maquinagem CNC com toda a facilidade.

O sistema projectado baseou-se numa ideia extremamente simples, que congrega todos os requisitos anteriormente enumerados para este componente. A figura seguinte mostra, em formato 3D, o projecto realizado para este sistema.

De notar que se verificaram também condicionalismos na forma de apoio deste sistema. De facto, o equipamento de pultrusão já existente possui uns tubos que se estendem a partir da mesa de apoio da feira, os quais possuíam a rigidez necessária para o apoio dos mesmos. Assim, o novo sistema foi desenhado por forma a garantir o respectivo apoio nessa estrutura tubular já existente.



Figura 70 - Imagem 3D do sistema de guiamento final das fibras

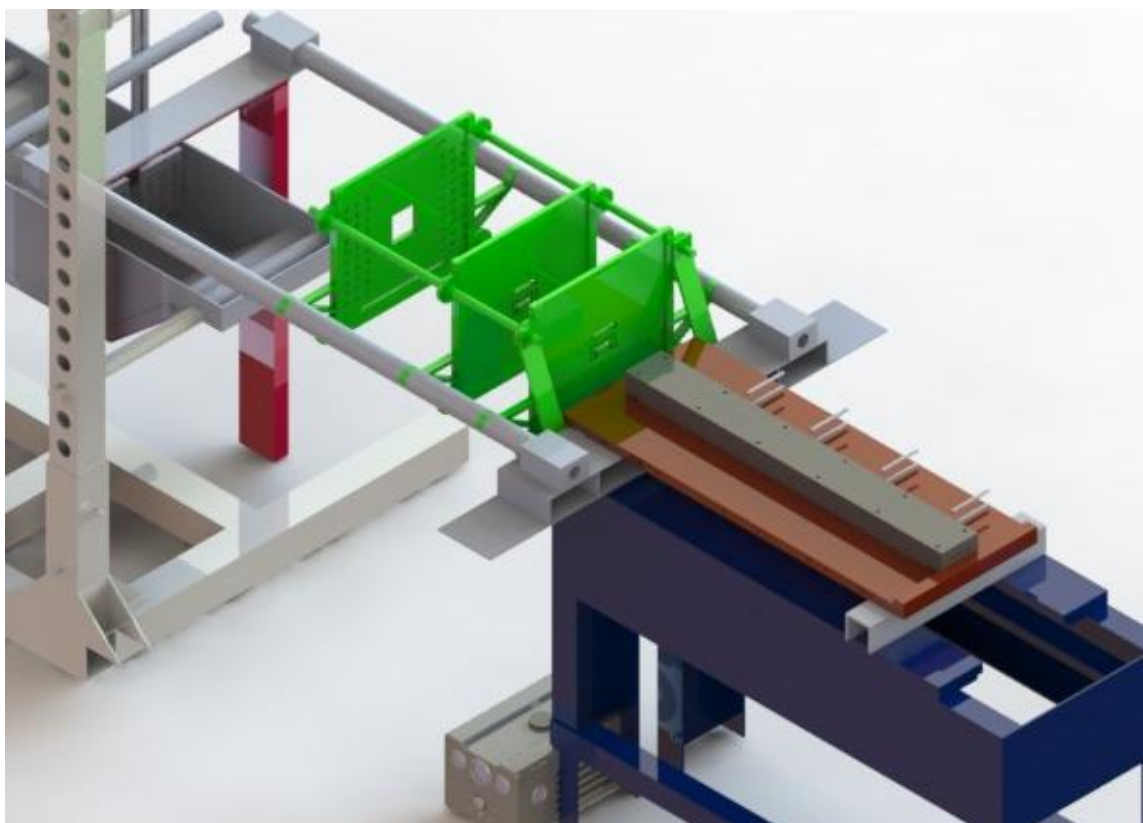


Figura 71 - Esquema do sistema de guiamento final das fibras (a verde) já inserido no equipamento de pultrusão, usando os apoios tubulares como referência



Figura 72 - Imagem que ilustra o sistema projectado já instalado no equipamento de pultrusão e em funcionamento

Para estas placas foi escolhido como material a Poliamida (Nylon PA 6.6). A escolha recaiu sobre este material pelas seguintes razões:

- Peso específico relativamente baixo ($1,02 - 1,4 \text{ g/cm}^3$);
- Elevada resistência ao impacto à temperatura ambiente ($0,45 \text{ J/cm}^2$);
- Elevada temperatura de deflexão;
- Inércia química adequada ao contacto com a resina e com os solventes utilizados na limpeza (acetona, entre outros);
- Facilidade de maquinagem;
- Coeficiente de atrito relativamente baixo, tanto com o aço (montagem das placas), como com as fibras de vidro já impregnadas.

De notar que a resistência ao desgaste não foi uma das preocupações principais no lote de requisitos impostos ao material das placas, já que as fibras passam por estas placas impregnadas em resina, provocando um desgaste irrelevante. Já a preocupação com os solventes utilizados foi grande, pois as placas necessitam ser limpas sempre que um turno de

trabalho é concluído. O peso específico e a facilidade de maquinagem foram factores igualmente importantes na selecção do material das placas, no primeiro caso por facilitar o seu manuseamento, e no segundo porque é necessário efectuar um conjunto de três placas por cada tipo de perfil que é necessário produzir e o tempo que medeia a encomenda e o prazo de entrega é geralmente diminuto.

É ainda de referir que, tal como pode ser observado na figura 70, o sistema foi aprovado pela ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., tendo sido fabricado e instalado de imediato, tendo sido produzidas as placas necessárias para a maior parte das feiras em uso. O sistema permitiu desde logo poupar bastante tempo na preparação de cada ordem de produção e facilitou de sobremaneira essas tarefas para os operários, que podem agora auto-controlar de forma mais segura o serviço de montagem das fibras no sistema de guiamento.

3.3.4. Desenvolvimento de uma nova tina com controlo de temperatura

Conforme referido anteriormente, subsistiam alguns problemas de cura precipitada da resina em algumas épocas do ano em que se verificavam fortes gradientes de temperatura, tanto no próprio dia, como em dias consecutivos. Não sendo um problema sistemático, era no entanto mais um problema que conduzia a paragens súbitas da produção, com os consequentes atrasos no planeamento das entregas e a quebra natural da produtividade, com todos os custos que lhe ficavam associados. De ressaltar que o problema tanto se colocava com um aumento súbito da temperatura, em que deveria ser necessário baixar a temperatura da resina para que não reaja prematuramente, como quando a temperatura desce abruptamente e a resina passa a não ter a temperatura necessária para se encontrar suficientemente fluída para impregnar convenientemente as fibras.

Do anteriormente exposto resulta que a tina deveria ter um controlo de temperatura, em que a mesma fosse aquecida sempre que a resina necessitasse de uma maior temperatura, ou fosse arrefecida quando a temperatura máxima de segurança para que a resina não curasse fosse prematuramente atingida. Efectivamente, a temperatura da resina deveria ser constante e na ordem dos 25 °C, segundo a revista *'PULTRUSION FOR ENGINEERS'*. Assim, e após a correspondente “tempestade de ideias” efectuada sobre o problema, verificou-se que colocar resistências na base da feira não seria uma solução capaz, já que as mesmas não teriam qualquer proveito quando fosse necessário arrefecer a tina. Do exposto resulta que deveriam ser contempladas soluções que permitissem tanto o aquecimento como o arrefecimento do leito da tina.

Depois de escutada a opinião da ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., e de analisados os custos de um permutador de calor, foi entendido por bem que a solução final passasse pela circulação de água numa câmara alojada no fundo da tina, a qual seria aquecida ou arrefecida de forma automática em função da leitura da temperatura obtida e do correspondente desvio em relação aos 25°C estipulados como temperatura ideal de trabalho.

Após delineada a solução mais favorável, tornou-se necessário desenvolver os requisitos entendidos por necessários para a tina:

- A água deveria passar através de todo o fundo da tina, homogeneizando assim a temperatura na face inferior da mesma (tipo cortina de água);
- O item anterior obrigou a uma alimentação mais cuidada da água, através de um distribuidor de um dos lados e um colector do outro;
- O sistema deveria permitir a paragem da circulação de água, quando a mesma se tornasse desnecessária;
- A tina deveria apresentar a rigidez e resistência mecânica necessárias ao tratamento por vezes descuidado dos operários;
- A tina não deveria ser atacada quer pela resina quer pelos solventes utilizados na limpeza da mesma;
- A tina deve apresentar adequada resistência à corrosão;
- Deve ser assegurada facilidade nas operações de limpeza mecânica que são necessárias efectuar na tina (cura accidental da resina).

Atendendo aos requisitos anteriormente elencados, e por opção da empresa, foi decidido fabricar a tina em aço ao carbono, o qual seria posteriormente revestido com uma adequada película de Politetrafluoretileno (PTFE), facilitando assim as operações de limpeza da mesma. No entanto, a deposição do revestimento veio a acarretar alguns problemas, já que as empresas que efectuem esse serviço necessitam furar a tina para que haja uma correcta deposição do polímero por toda a superfície, o que veio a revelar-se catastrófico para o uso da tina. Assim, a empresa pondera agora avançar para a fabricação de uma nova tina em aço inoxidável AISI 304L, eliminando assim todos os problemas associados ao revestimento e garantindo uma fácil limpeza da tina quando o fabrico é interrompido ou a ordem de produção está terminada.

O alçado lateral da tina pode ser visto na figura seguinte. De facto, a geometria da tina mantém-se semelhante à original, mas passam a existir um “fundo falso” e uns canais de alimentação e recolha da água em circulação.



Figura 73 - Alçado lateral da tina projectada, com o respectivo "fundo falso" e os canais de distribuição e recolha de água

De referir ainda que a tina foi projectada de forma a que pudesse ser inserida numa futura ampliação da estrutura inicialmente desenhada para o suporte e desenrolamento dos rolos de manta e véus associados ao processo. Na figura anterior poderão ser observados os canais em forma de "meia circunferência" correspondentes ao apoio da tina em varões que ficarão apoiados de forma similar àqueles que suportam os rolos das mantas e véus. A figura seguinte mostra, em corte, a geometria da tina, permitindo perceber qual o volume correspondente à circulação da água que manterá estável a temperatura da resina na tina. De salientar ainda que foram colocadas umas baías de retenção da resina no sentido longitudinal, tentando minimizar a quantidade de resina que sai indevidamente da tina.

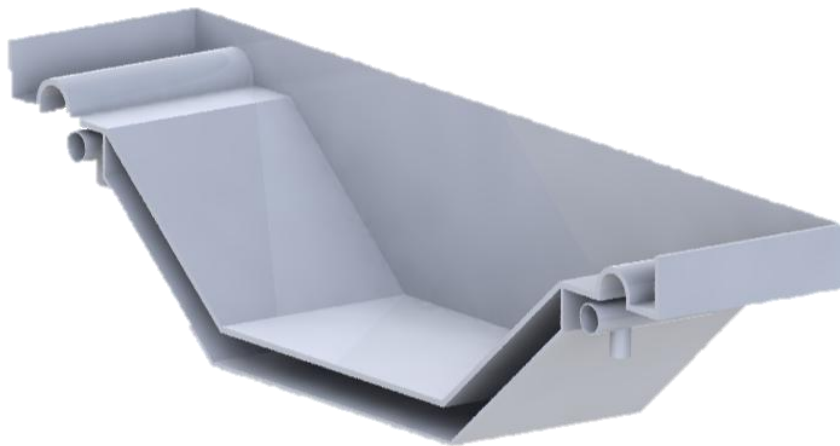


Figura 74 - Vista em corte da geometria da tina, mostrando o "fundo falso" por onde circulará a água que manterá constante a temperatura da resina na tina

A tina, depois de fabricada e antes de ser revestida, apresenta o aspecto que poderá ser observado na figura seguinte, sendo possível observar que foram efectuadas algumas alterações de pormenor no local de conexão do distribuidor e do colector de água que circula no “fundo falso”, as quais se vieram a tornar necessárias no sentido de facilitar as operações de soldadura.



Figura 75 - (a) Aspecto geral da tina e (b) pormenor do distribuidor de água

3.3.5. Desenvolvimento de um novo sistema de fixação rápida da fieira

Conforme referido anteriormente, um dos problemas que contribuíam de forma significativa para um tempo de preparação exagerado entre ordens de fabrico de produtos diferentes, era o posicionamento e fixação da fieira. Parecendo uma operação banal, deverá aqui ser recordado que:

- A fieira tem que estar devidamente alinhada, para que as forças de tração que actuam no perfil que está a ser pultrudido estejam uniformemente distribuídas e não introduzam forças de atrito suplementares;
- São exercidas constantemente forças axiais de tração sobre a fieira, que a obrigam a estar convenientemente fixa à estrutura/mesa do equipamento de pultrusão;
- A fieira está sujeira a ligeiras dilatações e contracções de origem térmica, que devem ser tidas em consideração;
- A configuração da fieira irá mudar num futuro próximo, através da introdução do novo sistema de aquecimento, deixando de necessitar dos grampos que actualmente são usados para fixação das resistências planas à fieira.

- Atendendo à necessidade de colocar a feira devidamente centrada, foi inicialmente sugerida a hipótese de se integrar um sistema mecânico equivalente ao existente nas impressoras para centrar a entrada de papel. O esquema da solução inicialmente pensada poderá ser observado na figura seguinte. No entanto, este sistema acabou por não ser desenvolvido devido à sua complexidade mecânica e aos problemas que poderia acarretar no contacto frequente com resina que, não raras vezes, acaba por vir parar à mesa de apoio da feira, e que poderia tornar extremamente difícil a operação deste sistema.

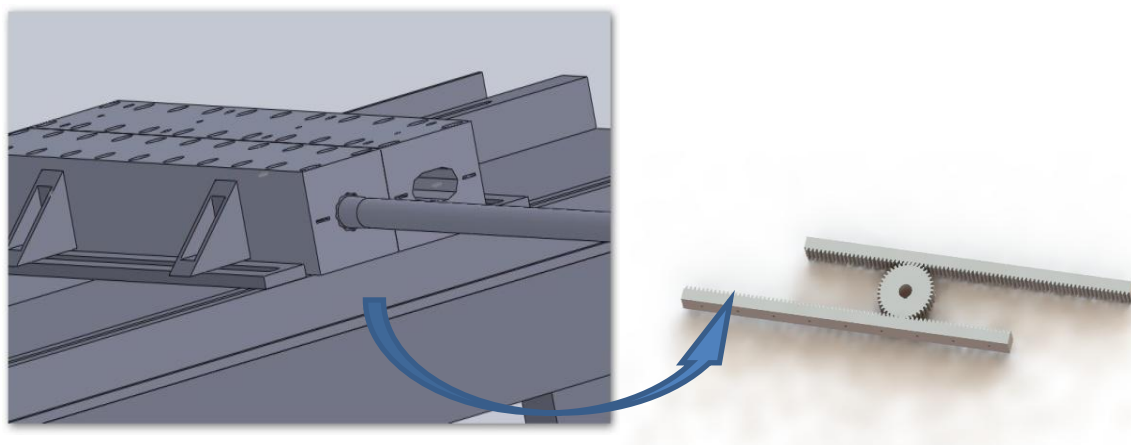


Figura 76 - Aspecto geral do projecto inicialmente desenvolvido para a centragem e fixação da feira na mesa de trabalho do equipamento de pultrusão

Depois de mais uma “tempestade de ideias” com os Orientadores deste trabalho e corpo técnico da ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda., foi possível encontrar um conjunto de soluções que permitissem o bloqueio mecânico simultaneamente na direcção transversal e longitudinal, que permitisse uma fácil limpeza e remoção de resina que pudesse vir a ser depositada na mesa e que garantisse a robustez e alinhamento necessários ao correcto funcionamento da feira.

Com vista a garantir o correcto alinhamento da feira no sentido transversal, foi desenhado um ressalto que será acoplado à mesa de trabalho, devidamente alinhado, sendo necessário reproduzir a mesma forma, mas em formato “fêmea” na feira. Sendo este ressalto triangular, o ajuste da feira, quando colocada sobre a mesa, irá produzir-se facilmente, permitindo um correcto posicionamento sem necessidade de operações especiais de medição e verificação por parte do operador responsável pela montagem da feira.

Relativamente ao bloqueio no sentido longitudinal, tudo se torna mais fácil já que se trata apenas de garantir que um esbarro, correctamente posicionado numa linha normal ao eixo da feira, impede a sua movimentação quando a feira começa a ser solicitada através das

forças de tração exercidas pelo “puller” sobre o perfil, quando este está a ser pultrudido. As imagens seguintes demonstram o quanto as soluções encontradas são fáceis de colocar em funcionamento e a forma como são práticas de manter limpas, assegurando simultaneamente as funções a que se destinam.

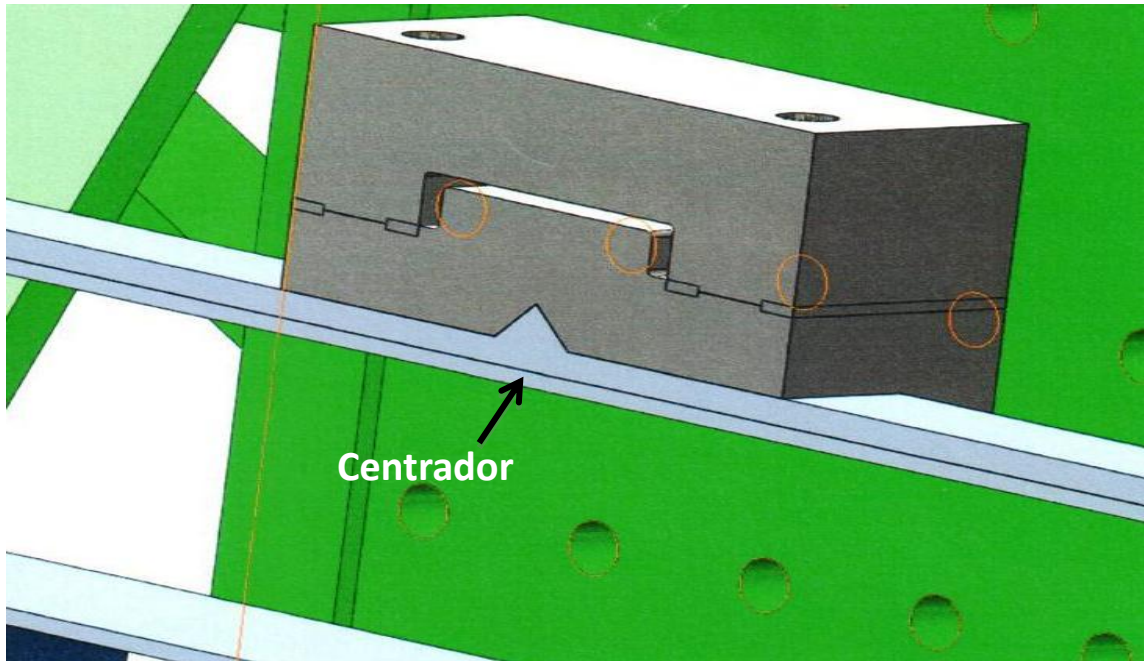


Figura 77 - Aspecto do centrador longitudinal que garante o posicionamento axialmente correcto da fieira

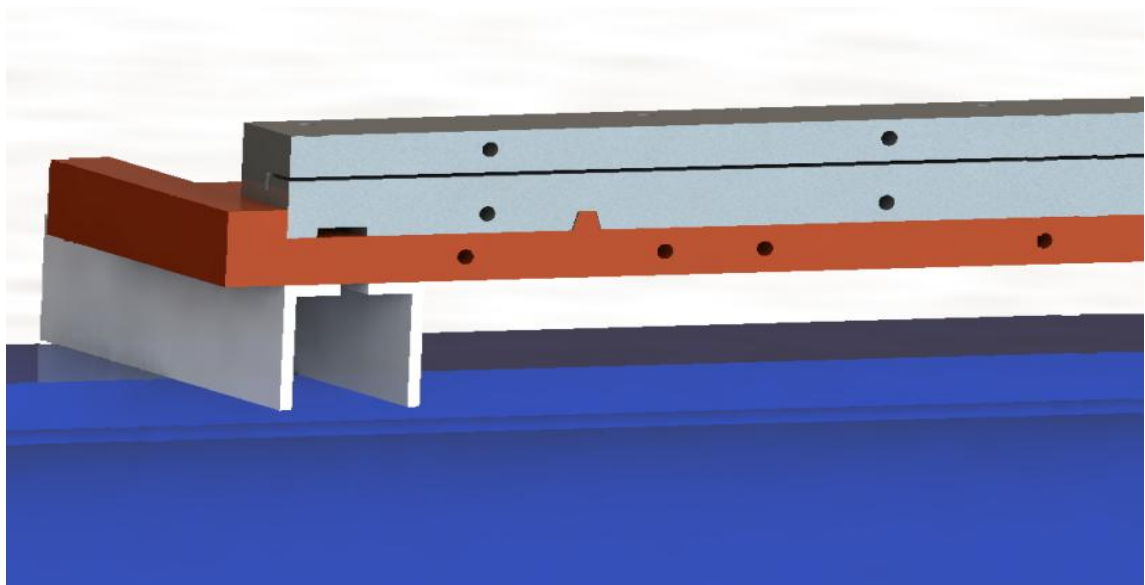


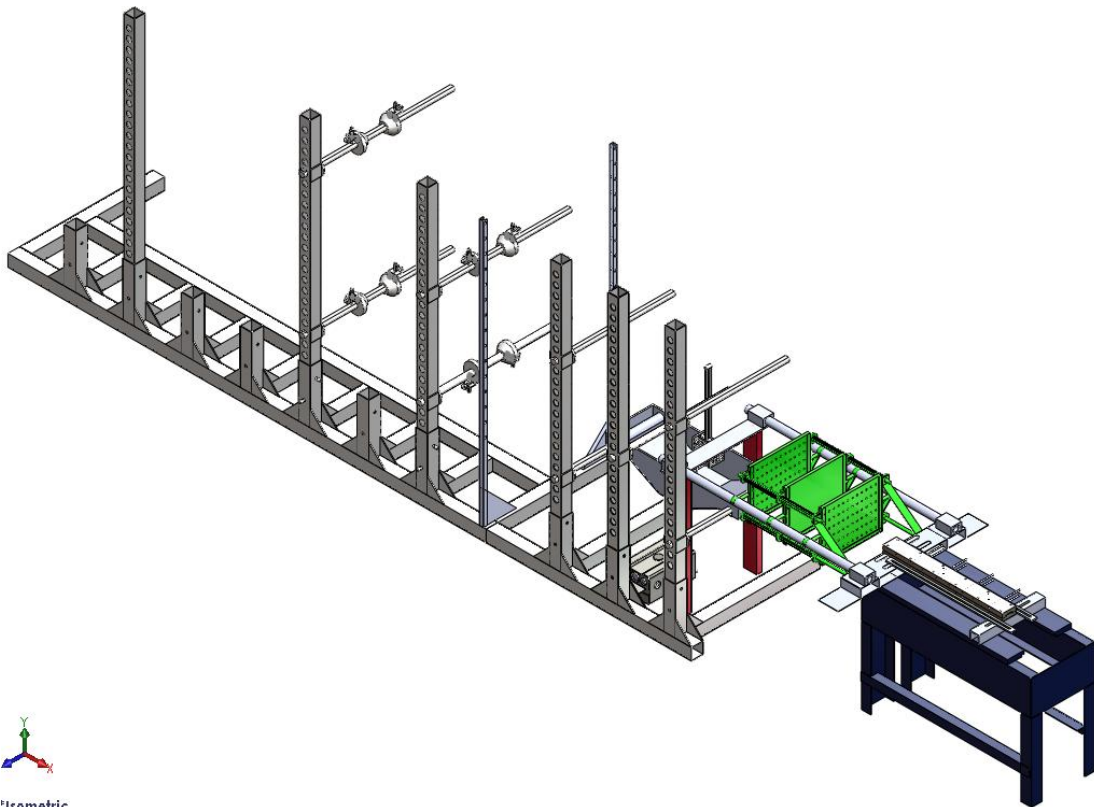
Figura 78 - Aspecto do esbarro responsável pelo bloqueio mecânico longitudinal da fieira

À data de escrita desta Dissertação, esta solução ainda se encontra por implementar na empresa, já que a mesma implica uma reformulação quase completa das fieiras existentes, pelo que a empresa optou por ir modificando todas as fieiras que são realizadas de novo,

segundo os padrões agora estabelecidos e, quando conveniente, proceder à alteração definitiva do processo de fixação das fieiras à mesa de trabalho do equipamento de pultrusão.

3.4. Resumo da situação após a realização do projecto

Conforme o ilustrado no capítulo 3.2., e apesar do equipamento de pultrusão cumprir efectivamente com as funções para as quais tinha sido concebido, existiam algumas lacunas no projecto inicial que conduziam a perdas de produtividade que a empresa ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. queria eliminar, na medida do possível. O trabalho, desenvolvido por etapas, permitiu chegar à configuração final do equipamento de pultrusão, que deverá ter o aspecto ilustrado nas duas figuras seguintes, depois de todas as propostas implementadas.




Isometric

Figura 79 - Perspectiva isométrica da configuração do equipamento de pultrusão após todas as intervenções planeadas e implementadas

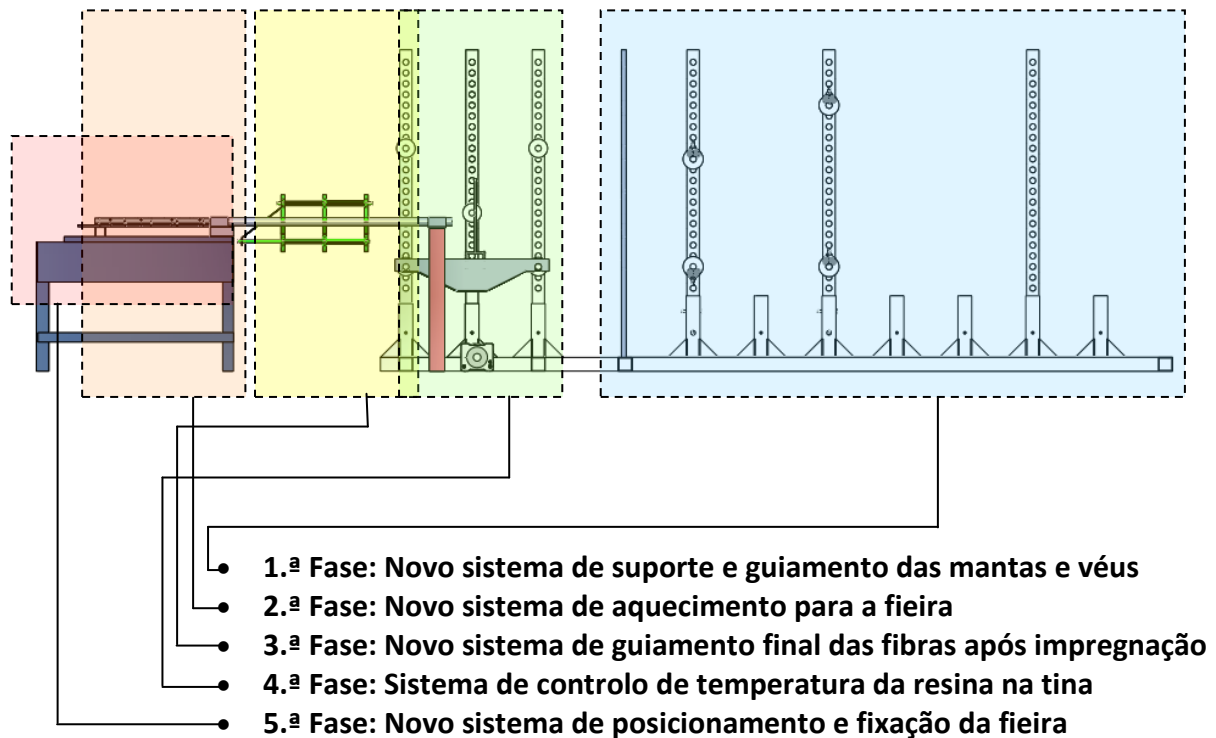


Figura 80 - Vista do alçado lateral do equipamento de pultrusão após todas as intervenções planeadas e implementadas, com indicação das diferentes fases do projecto

Atendendo às modificações já efectuadas e a todas as outras que ainda estão em fase de implementação gradual, verifica-se, desde logo, uma poupança de 57% da energia consumida no aquecimento da fieira, para além de se ter conseguido um decréscimo do tempo necessário à obtenção das condições de estabilidade de temperatura na fieira, reduzindo também por esta via o tempo de preparação. Mas, para além disso, os tempos correspondentes às diferentes tarefas integradas no processo de preparação da máquina foram também significativamente melhorados, possibilitando poupanças de tempo significativas, as quais poderão ser observadas no quadro seguinte.

De notar que alguns dos tempos mencionados no quadro se referem a estimativas fornecidas pela empresa, já que nem todas as soluções foram ainda implementadas pela empresa.

De referir ainda que o valor correspondente à poupança de energia conseguida diz respeito a uma solução em que a posição das resistências não está ainda otimizada, pelo que são de esperar maiores benefícios no futuro, quando o posicionamento foi ajustado através das indicações fornecidas pela simulação com recurso à Análise por Elementos Finitos que ainda decorre, e que não fazia parte deste trabalho.

Tabela 12 - Consumo energético referente a cada par de resistências

Tempo de preparação por tarefa		
Tarefa	Tempo necessário antes deste trabalho	Tempo necessário após implementação
Mudança dos sistemas de tração ('pullers'), existindo um adaptador para cada tipo de perfil	15 minutos	15 minutos
Desmontagem da fieira e das resistências	15 minutos	10 minutos
Desmontagem das fibras colocadas nos guiamentos finais	15 minutos	15 minutos
Limpeza da tina e dos garfos	60 minutos	60 minutos
Desmontagem das fibras dos guiamentos iniciais e intermédios	45 minutos	45 minutos
Montagem da nova fieira	30 minutos	15 minutos (a)
Montagem dos fios no sistema de guiamento inicial (universal)	90 minutos	45 minutos
Montagem dos fios nos garfos da tina	15 minutos	15 minutos
Montagem dos rolos de manta e véus para o novo perfil	15 minutos	5 minutos
Montagem dos fios nos guiamentos finais	30 minutos	20 minutos
Montar os fios através da fieira e proceder ao seu fecho	60 minutos	60 minutos
Unir os fios com fita adesiva e prendê-los no 'puller'	120 minutos	120 minutos
Operações acessórias diversas	30 minutos	15 minutos
TOTAL	540 minutos	425 minutos

(a) Estimativa: ainda em fase de implementação

Da análise da tabela anterior, poderá constatar-se que foi obtida uma poupança de 115 minutos no tempo total necessário, que era de 540 minutos, ou seja, o tempo de preparação foi abreviado em quase 2 horas, possibilitando uma poupança de cerca de 21% no tempo de preparação, o que possibilita ganhos de produtividade para a empresa e maior brevidade na resposta, encurtando o "lead-time" de cada ordem de fabrico.

De referir ainda que muitas das operações descritas na tabela anterior não são passíveis de alteração, o que encurta substancialmente as hipóteses de melhoria do processo. No entanto, deve ainda ser referido que não estão contabilizadas no quadro acima o tempo gasto com a limpeza da tina quando se verificava uma cura prematura da resina, situação que acarretava uma paragem prolongada da produção e a criação de imensos resíduos nocivos para o ambiente, conjugando-se estes dois factores numa perda económica significativa para a empresa, para além dos possíveis atrasos nas entregas, com consequências imprevisíveis.

Assim, este trabalho foi dado por concluído, sendo certo que ainda foi deixado muito trabalho por executar neste processo de melhoria contínua deste sistema de produção e que ficará patente na proposta de trabalhos futuros.

4. Considerações finais

A realização deste trabalho foi extremamente gratificante, graças ao forte empenho e colaboração da empresa na procura de soluções e na sua validação. Para além disso, a possibilidade de implementação de algumas das soluções em tempo útil (período de realização desta dissertação), tornou ainda mais aliciente este trabalho, do qual devem ser realçadas as seguintes ideias principais:

- A configuração inicial do equipamento de pultrusão apresentava lacunas substanciais ao nível da produtividade, as quais foram facilmente identificadas na fase inicial deste projecto, sendo estabelecidas de imediato as prioridades de actuação;
- O sistema de suporte e guiamento das mantas e véus foi significativamente melhorado, permitindo uma mais fácil operação por parte dos operários, sendo agora mais robusta, mais prática e mais segura;
- A alteração do sistema de aquecimento da fieira, passando de um sistema de resistências planas exteriores para um sistema de resistências cilíndricas embebidas, permitiu, numa primeira abordagem, uma poupança efectiva de 57% da energia aí consumida. Este valor poderá ainda ser melhorado, através de estudos por Análise de Elementos Finitos da distribuição de calor ao longo da fieira e da correspondente optimização do posicionamento das resistências;
- O sistema de guiamento intermédio das fibras foi codificado, deixando as mesmas de ser colocadas empiricamente, para passar a obedecer a instruções emanadas com cada ordem de produção, correspondentes a um código matricial que, a ser respeitado pelo operário, simplifica bastante a operação e permite uma diminuição do nível de concentração por parte do operário nesta tarefa, facilitando ainda a verificação;
- O sistema de guiamento final das fibras foi substancialmente alterado, sendo agora extremamente flexível e personalizado para cada tipo de perfil. A verificação tornou-se também muito mais simples e intuitiva;
- A tina de impregnação das fibras foi alterada, passando a ter um leito de água que corre na sua base, permitindo, por troca de calor, manter a temperatura da resina estável nos 25 °C, conforme o requerido. Este facto faz diminuir drasticamente o risco de cura prematura da resina na tina, a qual acarretava custos significativos para a empresa;

- O sistema de fixação da fieira foi também alterado, permitindo agora uma desmontagem e montagem muito mais célere e com um elevado rigor posicional;
- O conjunto global das alterações produzidas e a produzir, traduzir-se-á numa poupança de cerca de 115 minutos no tempo global de preparação do equipamento, o que se traduz em ganhos de produtividade na ordem dos 21% e possibilidade de redução do “lead-time” correspondente a cada ordem de fabrico

De referir ainda que a implementação de todas estas alterações foi inicialmente dificultada pela mudança de instalações operada pela ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. Do distrito de Matosinhos para o distrito da Maia no início do desenvolvimento dos trabalhos, mas que foi largamente compensada pela possibilidade de implementação das soluções, graças ao forte empenho da empresa, mas também ao apoio concedido pelo Programa QREN – SISTEMAS DE INCENTIVO À INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO, ao abrigo do Projecto em Co-Promoção com o acrónimo PULTRIFICAZ e com o N.º 5488 (2009-2011).

5. Proposta de trabalhos futuros

Atendendo ao anteriormente exposto, fica claro que ainda é possível proceder a algumas alterações no equipamento que possam trazer à ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. ganhos de produtividade interessantes. Desses, destacam-se:

- Optimização da localização das resistências na fieira, através da Análise de Elementos Finitos, a qual poderá ainda representar ganhos no consumo de energia na casa dos dois dígitos;
- Optimização das garras dos “pullers”, com vista a uma mais fácil adequação dos mesmos a cada tipo de perfil;
- Mudança da placa intermédia de guiamento das fibras, do sistema universal, para um sistema dedicado, à semelhança do adoptado para o sistema de guiamento final das fibras.

As ideias atrás apontadas, juntamente com uma maior disponibilidade dos operários para a formação, assim como um maior asseio no local de trabalho, contribuirão para uma organização mais eficiente e mais apurada, com os consequentes benefícios para todas as partes: operários e entidade patronal.

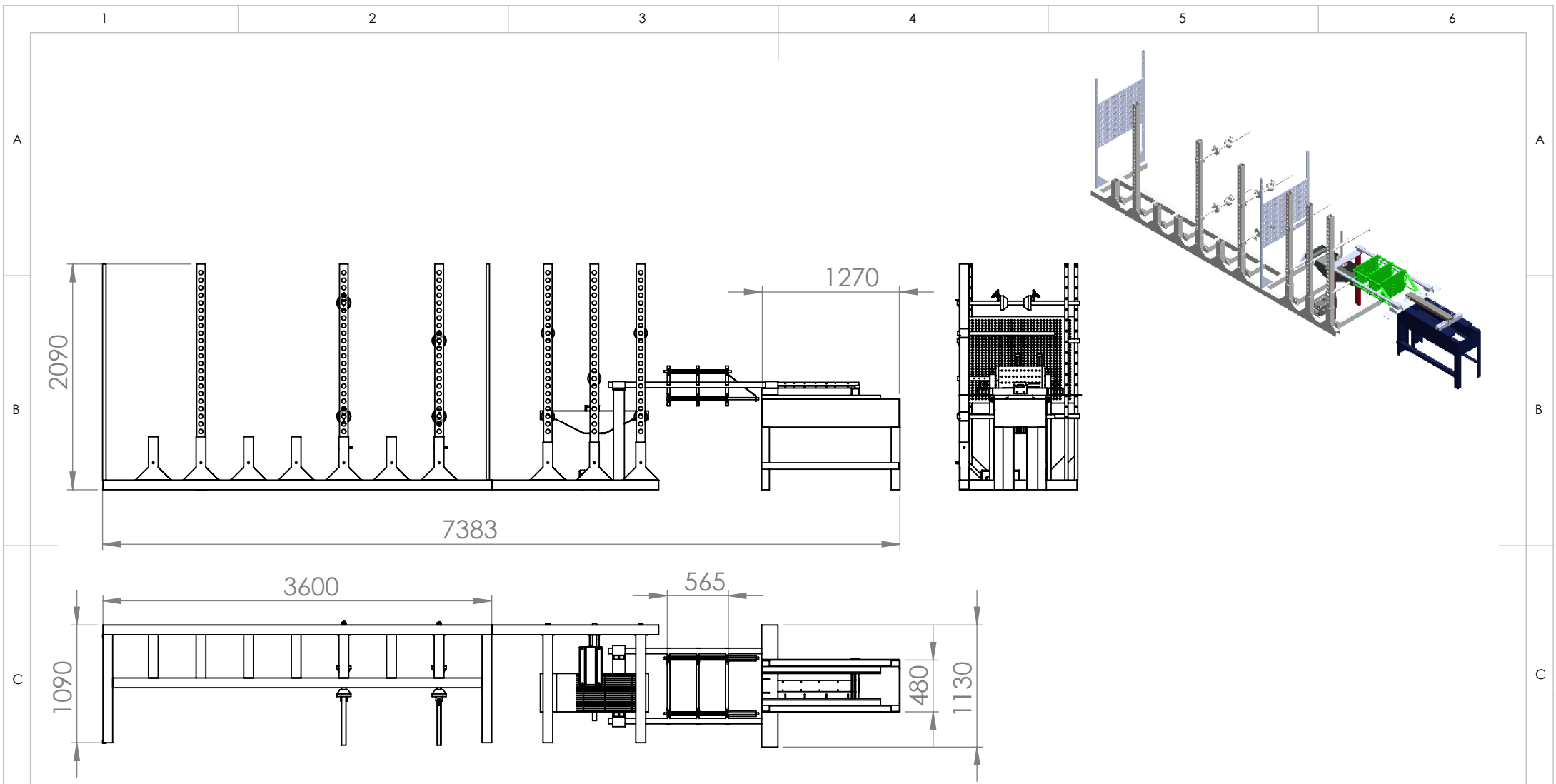
6. Bibliografia e Outras fontes de informação

- [1] Keller, 2003; Fibeline Composites, 1995; e Creative Pultrusions, 1999
- [2] Marcelo F. S. F de Moura, Alfredo B de Moraes, A. G. de Magalhães, “*Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*”, Publindústria, 2005
- [3] Daniel, R.A. (2003), “*Environmental Considerations to Structural Material Selection for a Bridge*”, Lightweight Bridge Decks Conference & European Bridge Engineering Conference, Conference Proceedings, Rotterdam, The Netherlands.
- [4] Araújo, Caroline Maia (2002), “*Reforço à Flexão e ao Corte de Vigas de Betão com Tecidos de fibra de Carbono*”, Dissertação para a obtenção do grau de M.Sc. em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, COPPE / UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.
- [5] Meyer R., *Handbook of Pultrusion Technology*, Chapman and Hall, 1985
- [6] Trevor Starr, *Pultrusion for Engineers*, Woodhead Publishing Ltd, August 28, 2000 (First Edition)
- [7] Karbhari, V. M. (1998), “*Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan*”, WTEC report, National Science Foundation
- [8] C. Costa, F. Ferreira, F. J. G. Silva, A. C. Meira Castro, C. Ribeiro, M. R. Castro, OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PULTRUSÃO, CIBEM 10, Porto, Portugal, 2011
- [9] M. Sarrionandia, I. Mondrago, S. M. Moschiar, M. M. Reboredo and A. Vazquez (2002), “*Heat Transfer for Pultrusion of a Modified Acrylic/Glass Reinforced Composite*”, Polymer Composites, Vol. 23, No. 1
- [10] S.T. Peters, *Handbook of Composites*. Second Edition 1998
- [11] A. Nanni, et al., *Fiber Reinforced Plastic (FRP) - Reinforcement for concrete structures: Properties and applications*, Elsevier Science Publishers B.V., Vol. 42, Amsterdam, p 450., 1993
- [12] Juvandes, Luís, Marques, António T., Figueiras, Joaquim, *Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão, Partes I*, Departamento de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P. (FEUP). (1996)
- [13] <http://www.tangram.co.uk/TI-Polymer-Pultrusion.html> (19-01-2012)
- [14] S. M. Moshiar, M. M. Reboredo, H. Larrondo and A. Vazquez (1996), “*Pultrusion of Epoxy Matrix Composites: Pulling Force Model and Thermal Stress Analysis*”, Polymer Composites, Vol. 17, No. 6.
- [15] Juvandes, Luís, Marques, António T., Figueiras, Joaquim, *Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão, Partes II e III*, Departamento de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P. (FEUP). (1996)
- [16] Juvandes, Luís Filipe Pereira; da Costa, Aníbal Guimarães (2002). *Reforço e Reabilitação de Estruturas*. Formação Profissional, Ordem dos Engenheiros, Secção Regional da Madeira.
- [17] Carvalho, F. J. X. de, 1992, *Fiberglass X Corrosão*, São José dos Campos, SP, Patrocinadores.
- [18] Fiorelli, J., 2002, *Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço em Vigas de Madeira*. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

- [19] Estevão Freire, Elisabeth E. C. Monteiro e Julio C. R. Cyrino, Polímeros: Ciência e Tecnologia - Jul/Set-94 Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cx p: 68.525,21945-900 - Rio de Janeiro.
- [20] <http://gfrcdpot.com/raw-materials/> (17-02-2012)
- [21] DONNET, J.B. e BANSAL, R.C., 1984, "Carbon Fibers", Marcel Dekker, New York. EDENBAUM, J., 1992, "Plastics Additives and Modifiers Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York.
- [22] DEIFENDORF, R.J., 1987, "Carbon/Graphite fibers", Section 2 of Engineered Materials Handbook, vol. 1, Composites, ASM International, Metals Park, OH, 49-53.
- [23] ACI, Committee 440, 1993, "State of the art report on application of FRP composites", American Concrete Institute.
- [24] <http://dsgperformance.wordpress.com/2010/03/23/north-america-carbon-fiber-plant-in-the-works-for-bmw/> (17-02-2012)
- [25] Modern Plastics: Encyclopedia Handbook, © 1994 McGraw-Hill Inc., hardcover,
- [26] PIGLIACAMPI, J.J., 1987, "Aramid Fibers", Section 3 of Engineered Materials Handbook, vol.
- [27] GERRITSE, A., 1990, "Arapree: a non-metallic prestressing tendon", Technical Contribution to the Conference on Durable Reinforcement for Aggressive Environments, Luton, Nov. 22.
- [28] KAKIHARA, R., KAMIYOSHI, M., KUMAGAI, S., e NORITAKE, K., 1991, "A new aramid rod for the reinforcement of prestressed concrete structures", Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures, S.L. Iyer and R. Sen., Eds., Am. Soc. Civil Engineers, New York, pp. 132-142.
- [29] Sunil C. Joshi, Y.C. Lam, Kyaw Zaw, "Optimization for quality thermosetting composites pultrudate through die heater layout and power control", ICCM 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto-Japan, 08-13 July 2007
- [30] http://www.supplierlist.com/product_view/gracelv/102098/101413/FRP_structural_profiles_FRP_pultrusion.htm (2012-02-14)
- [31] A. A. Safonov and Yu. V. Suvorova (2009), "Optimization of the Pultrusion Process for a Rod with a Large Diameter. Journal of Machinery Manufacture and Reliability", Vol. 38, Nr. 6, pp. 572-578.
- [32] S. M. Moschiar, M. M. Reboredo, J. M. Kenny, and A. Vazquez, "Analysis of Pultrusion Processing of Composites of Unsaturated Polyester Resin With Glass Fibers", Polymer Composites, Vol. 17, Nr. 3, 478-485, 1996.
- [33] Sunil C. Joshi, Y.C. Lam, "Integrated approach for modeling cure and crystallization kinetics of different polymers in 3D pultrusion simulation", Journal of Materials processing Technology 174 (2006) 178-182
- [34] X.-L. Liu, "Numerical modeling on pultrusion of composite I beam", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing
- [35] Sunil C. Joshi, Y. C. Lam, U. Win Tun, "Improved cure optimization with pre-heating and die-cooler temperature", Composites part A 34, 1151-1159, 2003.
- [36] L. Calabrese, A. Valenza, "the effect of a liquid CTBN rubber modifier on the thermo-kinetic parameters of an epoxy resin during a pultrusion process" Composites Science and Technology 63 (2003) 851-860.
- [37] S.U.K. Gadam , J.A. Roux , T.A. McCarty , J.G. Vaughan, "The impact of pultrusion processing parameters on resin pressure rise inside a tapered cylindrical die for glass-fibre/epoxy composites", Composites Science and Technology 60 (2000) 945-958.

- [38] Kathleen Van de Velde, Paul Kiekens, "Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composites", *Composite Structures* 54 (2001) 355-360.
- [39] Silva, F.J.G., Ferreira, F., Costa, C., Ribeiro, M.C.S., Meira Castro, A.C., Comparative study about heating systems for pultrusion process, *Composites: Part B* (2012), doi: 10.1016/j.compositesb.2012.01.057
- [40] F. Ferreira, C. Costa, F.J.G. Silva, Ana C. Meira Castro, M.C.S. Ribeiro, J.P. Meixedo, A. Fiúza e M.L. Dinis, 'Finite Element Analysis (FEA) Applied to Heat Transfer Optimization Process of Pultrusion Die Systems', in *Proceedings of ICCAM 2011, International Conference on Computational and Applied Mathematics, Bangkok, Thailand, 29-31 Mars, 2011* (published on World Academy of Science and Technology, Vol. 75 (2011), 270-276, ISBN: 2010-376X, ISSN: 2010-3778).
- [41] <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/textile-industry-articles/jute-reinforced-composite-technology/jute-reinforced-composite-technology5.asp> (11-10-2012)
- [42] J. Mackerle (2004), "Finite elements analyses and simulation of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985-2003)", *Computational Materials Science*, Volume 31, November 2004, 187-219.
- [43] Deepak Srinivasagupta, Sairam Potaraju, Babu Joseph, and John L. Kardos, "Steady State and Dynamic Analysis of a Bench-Scale Injected Pultrusion Process," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(9), 835, (2003).
- [44] <http://www.nuplacorp.com/technical%20support.htm> (18-02-2012)
- [45] <http://www.ashirvadtechno.com/> (18-02-2012)
- [46] www.alto.com.pt (22-02-2012)
- [47] <http://www.made-in-china.com/showroom/yaocao/product-detailXMxmQEzFaYu/China-ultrusion-Die.html> (18-02-2012)
- [48] Nicholas P. Cheremisinoff, United States Agency for International Development, *Advanced Polymer Processing Operations* ISBN: 978-0-8155-1426-8, 1998
- [48] Sumerak, Joseph E., "Understanding Pultrusion Process Variables for the First Time." 40th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., January 28 – February 1, 1985.
- [49] Outwater, John O., "On the Mechanics of Pultrusion," 41st Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., January 27-31, 1986.
- [50] Sumerak, Joseph E. and Martin, Jeffrey D., "Pultrusion Process Variables and their Effect upon Manufacturing Capability," 39th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., January 16-19, 1984, 1-B.
- [51] Lamb, D. W., et al, "Pultrusion Process Characterization in Terms of thermal parameters and Product/Die Interfacial Shear Stress," 44th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., February 6-9, 1989, 4-D.
- [52] Sumerak, Joseph E. and Martin, Jeffrey D., "The Pulse of Pultrusion: Pull Force Trending for Quality and productivity Management," 46th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., February 1-8, 1991, 4-B.[53] <http://www.itenindustries.com/pultrusion.shtml>
- [54] Conversation with Mr. Dustin L. Troutman, Creative Pultrusions Inc., April 23rd 1999.

- [55] Stanley, Jim M. and Matto, Milt W., "A Case History Approach to Demonstrating Pultrusion Design Versatility." 41st Annual Conference, reinforced Plastics/Composites Institute, The Society of Plastics Industry, Inc., January 27-31, 1986.
- [56] <http://userweb.port.ac.uk/~zhangz/Advanced%20Composites/Advanced%20Polymer%20Composites/Unit%202/content.htm>
- [57] http://www.glasforms.com/faq/pultrusion_process09.html (17-02-2012)
- [58] http://www.ashirvadtechno.com/product_application.html(18-02-2012)
- [59] http://www.ashirvadtechno.com/product_application.html (18-02-2012)
- [60] <http://www.fiberglassindustries.com/flex.htm> (17-02-2012)
- [61] http://www.vifiber.com.br/Html/prod_mantas.asp (17-02-2012)
- [62] <http://www.fiberglass-mat.com/img/FRP-surface-tissue-1.gif> (17-02-2012)
- [63] Myer Kutz, Mechanical Engineer's Handbook vol I pp 380 2nd edition, A Wiley-Interscience Publication, ISBN – 0-471-13007-9, 1998
- [64] <http://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Processes/Pultrusion.aspx> (20-02-2012)
- [65] Pinto Soares, Aços – características e tratamentos 6ª edição, Publindústria ISBN – 978-989-20-1797-6, 2010
- [66] Fiberline Composites (1995), "Fiberline Design Manual". www.fiberline.com.
- [67] Sobrino, J.A., Pulido, M.D.G., (2002), "Towards Advanced Composite Material Footbridges", Structural Engineering International, Vol. 12, No. 9, 84-86.
- [68]. Strong, Brent A., Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications, Society of Manufacturing Engineers, 1989, pp. 127.
- [69]. Jeff Martin, "Designing Pultruded Composite Profiles-Critical Process and Performance Considerations." 15th National SAMPE Technical Conference, October 4-6, 1983.
- [70] Antequera, P., Jiménez, L. e Mitavete, A. (sem data), Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio. Zaragoza, Secretariado de Publicaciones Ciudad Universitária (Geológicas) 50009 Zaragoza (España).
- [71] Y. C. Lam, Jianhua LI, and Sunil C. Joshi, "Simultaneous Optimization of Die-Heating and Pull-Speed in Pultrusion of Thermosetting Composites", Polymer Composites, Vol. 24, Nr. 1, 199-209, 2003.
- [72] S. Voorakaranam, "Model-Predictive Control of Polymer Composite Manufacturing Processes," D.Sc. Thesis, Washington University, St. Louis, MO, (1998).
- [73] The New and Improved Pultex Pultrusion Design Manual for Standard and Custom Fiber Reinforced Polymer Structural Profiles
- [74] Creative Pultrusions, Inc. (1999), "The New and Improved Pultex Pultrusion Design Manual for Standard and Custom Fiber Reinforced Polymer Structural Profiles".
- [75] <http://njlf-frp.en.made-in-china.com/product/HqAxlMSJsXYt/China-GRP-Pultruded-Profiles.html> (em 2012-02-15)
- [76] Burgoyne, C. (1999), "Advanced Composites in Civil Engineering in Europe", Structural Engineering International, Vol. 9, No. 9, 267-273.[78] Keller, T. (2002), "Fibre Reinforced Polymer Materials in Bridge Construction", Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology, IABSE Symposium, Melbourne,



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO. conjunto_global A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:100 SHEET 1 OF 1	

POUPANÇA DE ENERGIA NA PULTRUSÃO

F. Ferreira^{1,2}, C. Costa^{1,2}, F. J. G. Silva^{1,2}, A. C. Meira Castro^{1,3}, C. Ribeiro³, M. R. Castro^{1,4}

1 – Instituto Superior de Engenharia do Porto do Instituto Politécnico do Porto,
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal, email: {fntf, cjm, fgs, amc}@isep.ipp.pt; mario.alvim@alto.com.pt

2 – Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica,
Instituto Superior de Engenharia do Porto do Instituto Politécnico do Porto,
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal, email: {fntf, cjm, fgs}@isep.ipp.pt

3 – CIGAR, Centro de Investigação em Geo - Ambiente e Recursos,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal, email: amc@isep.ipp.pt ; cribeiro@inegi.up.pt

4 – ALTO Perfis Pultrudidos, Lda.,
Rua Raimundo Durães Magalhães, Lote 20, 4470-000 4475-189 Maia, Portugal, email: mario.alvim@alto.com.pt

Palavras-chave: Pultrusão, Poupança energética, Fibra de vidro

Resumo

Nos dias de hoje, a problemática energética toma um papel de destaque a nível mundial. Devido às elevadas emissões de CO₂ dos últimos anos, que promoveram o efeito de estufa e, conseqüente, aquecimento global, existe a necessidade de reunir esforços de forma a tornar cada vez mais eficiente e racional o uso de energia. Sendo grandes consumidores de energia, a indústria é uma área onde é imprescindível actuar, permitindo obter benefícios a nível ecológico bem como na competitividade do produto.

A pultrusão, como processo industrial cada vez mais utilizado no fabrico de perfis estruturais extremamente leves e resistentes é também uma forte consumidora de energia, com vista à cura da resina termoendurecível utilizada no processo. O sistema de aquecimento normalmente utilizado não tem levado em consideração alguns desperdícios de energia perfeitamente evidentes.

Neste trabalho, e recorrendo à termografia e ao método de elementos finitos (MEF), foi efectuado um estudo de utilização mais racional da energia, o qual veio a demonstrar alta eficácia permitindo uma poupança energética de cerca de 57%. Para além disso, este estudo permitiu ainda uma redução efectiva do tempo de set-up, incrementando a flexibilidade do processo.

1. Introdução

A pultrusão é um processo utilizado mundialmente no fabrico de tubos, barras e outros perfis de secção constante em matriz polimérica [1-4]. Este material, constituído por uma matriz termoplástica ou termoendurecível e por um reforço de fibras de vidro, é geralmente denominado compósito de fibra de vidro [5].

Os produtos pultrudidos de matriz termoendurecível são obtidos através da impregnação de fibras longas (denominadas roving) em resina, que são guiadas para uma feira que é responsável por conferir a forma final do perfil bem como pelo processo de cura da resina. Estes produtos são usados em aplicações estruturais que carecem de uma elevada tensão de cedência específica bem como de uma boa resistência química [6].

O gráfico apresentado na Figura 1 compara as propriedades dos compósitos de fibra de vidro com outros três materiais geralmente usados em construções mecânicas. Analisando a Figura 1, é possível concluir que entre os materiais apresentados, os compósitos de fibra de vidro são os que apresentam as características mais favoráveis, combinando um elevado valor de tensão de cedência específica com um baixo coeficiente de dilatação [7].

Este material pode chegar a ser 4 vezes mais leve que o aço e 2/3 mais leve que o alumínio mantendo a vantagem no rácio tensão de cedência/peso [6]. O baixo peso deste material permite o fácil transporte do mesmo, o que é extremamente útil em situações específicas, tais como locais de difícil instalação de gruas, etc. A assemblagem dos perfis pode ser feita através de rebites, adesivos, parafusos, entre outros.

Todas estas particularidades demonstram as grandes vantagens da utilização dos compósitos de fibra de vidro para a concepção de estruturas aplicadas em acessos de ETAR's ou até perto de ambientes marítimos, bem como para o fabrico de painéis laterais de autocarros, por exemplo, entre outros.

A feira, responsável por dar a forma ao produto final, é geralmente constituída em duas partes, a superior e a inferior. Quando o perfil a pultrudir possui ocos no seu interior, por exemplo no caso de um tubo, existe a necessidade de recorrer a mandris [5].

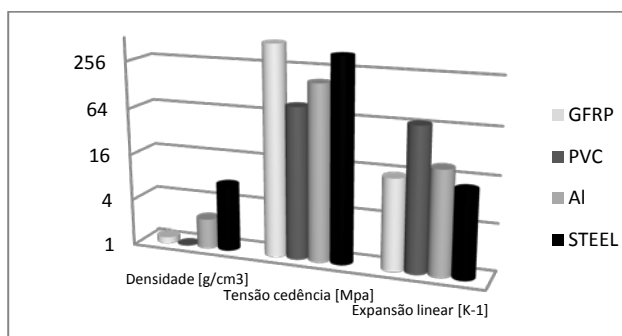


Figura 1: Comparação das propriedades do GFRP com outros materiais usados intensamente em aplicações estruturais.

A principal vantagem deste processo está relacionada com a baixa necessidade de mão-de-obra e pela simplicidade das ferramentas a usar. As fibras são puxadas dos racks, onde se encontram os rolos de roving com fibra de vidro tipo E com 4800 TEX, e são guiadas para uma tina de

resina onde são completamente submersas nesta, de modo a garantir uma molhagem total.

Enquanto isso, adiciona-se manta às fibras impregnadas com resina à entrada da feira. De forma a obter um produto que melhor se adequa à sua aplicação final, é necessário escolher a melhor combinação de materiais, visto que os compósitos podem ser reforçados com fibras unidireccionais, manta ou tecido, assim como os parâmetros de pultrusão. O uso de véus de superfície deve ser tomados em consideração quando se exige uma boa qualidade superficial [8].

As resinas de epóxido, poliéster e vinil éster são as mais utilizadas. As resinas de epóxido são mais adesivas, tendo mais tendência a aderir à feira do que as resinas de poliéster e vinil éster, o que aumenta a probabilidade de quebra do compósito no interior da feira. Para além disso, esta resina contraí menos do que as outras atrás referidas, o que ainda aumenta mais a probabilidade de quebra do compósito por não se “soltar” das paredes da feira [9]. Contudo, esta resina possui excelentes propriedades térmicas bem como boa resistência à corrosão, sendo assim utilizada como matriz quando se verificam estas condições.

Aditivos como catalisador e acelerador têm de ser adicionados à resina, nas devidas proporções, com o intuito de melhorar o processo de pultrusão. Contudo, existem outros aditivos como retardadores de chama, que são adicionados de modo a aumentar a segurança do produto. Estes aditivos influenciam na viscosidade da resina, sendo necessário verificar se as fibras estão a ser bem impregnadas durante o banho. Torna-se importante referir que a viscosidade é um factor crucial para a velocidade de pultrusão que o processo pode atingir.

Depois de as fibras serem impregnadas na resina termoendurecível, estas são guiadas através de placas perfuradas que as organizam e lhes conferem uma pré-forma, realizando-se em simultâneo a remoção do excesso de resina, acção conhecida como “debulking”. De modo a melhorar propriedades estruturais e o acabamento de superfície, são usualmente adicionados nesta fase do processo, manta e véus de superfície.

É nesta fase, que enquanto o compósito passa através da feira aquecida, se inicia a cura da resina. O fabrico desta feira impõe requisitos especiais, sendo de destaque o acabamento superficial do seu interior. Esta ferramenta, concebida em aço C45, é maquinada, obtendo assim a sua forma por fresagem de acordo com as tolerâncias definidas em projecto. De seguida, as suas faces internas são sujeitas a rectificação e a polimento, seguindo-se um tratamento superficial de cromagem dura [??] com o objectivo de reduzir o atrito. Com vista a melhorar este efeito, mais operações de rectificação e polimento são realizadas.

O comprimento da feira é um dos aspectos mais importantes, visto que este parâmetro determina a duração que o compósito estará sujeito a calor. O comprimento da feira também afecta a força a realizar pelo sistema de tracção (“pullers”) bem como a velocidade de produção da linha, já que a área interna desta ferramenta varia com o seu comprimento. Um PLC é responsável pela gestão do perfil de temperaturas ao longo da feira, realizando medições em tempo real através de termopar, permitindo assim uma cura otimizada da resina termoendurecível. Este perfil de temperatura tem um papel importante, pois

caso a temperatura seja demasiado baixa, a resina não cura completamente, originando produto rejeitado. Por outro lado, caso a temperatura seja demasiado elevada, a resina degrada-se, podendo ocorrer problemas na produção tais como rotura do perfil no interior da feira [8,10].

Dependendo do produto a fabricar, variáveis como o tipo de resina da matriz e a sua reacção exotérmica, velocidade da linha produtiva, perfil de temperatura da feira, número de fios de fibra do compósito e comprimento da feira, existe a necessidade de proceder a ajustes para otimizar a produção [8]. O processo de pultrusão é muitas vezes melhorado por testes realizados durante a produção, sendo nesta altura que as equipas de engenharia recolhem notas e relações que permitem as melhores afinações para cada perfil a produzir.

Quando o produto chega à saída da feira, obtêm-se um perfil curado que necessita apenas de ser cortado no tamanho desejado. Neste processo, um sistema de tracção duplo é responsável por puxar o compósito, o que permite uma tracção contínua do compósito ao longo da feira [1,5]

A velocidade da linha produtiva deve respeitar algumas condições tais como espessura do perfil, comprimento da feira e formulação da resina. Com todas estas condicionantes, é possível compreender que, uma vez mais, a experiencia é fundamental para conseguir uma boa produtividade combinada com os elevados padrões de qualidade.

Geralmente, a eficiência do sistema de aquecimento da feira não é um aspecto primordial para as empresas de pultrusão. Tal facto está relacionado com o uso generalizado de resistências externas [11-12], as quais estão associadas a perdas de calor significantes. Contudo, e essencialmente devido ao aquecimento global, é importante desenvolver sistemas de aquecimento mais eficientes onde é possível combinar o baixo custo de produção com as problemáticas ecológicas. O perfil de temperatura ao longo da feira toma, geralmente, a configuração apresentada na figura 2. Como é possível verificar, o efeito de exotermia faz com que a temperatura atinja o seu máximo na primeira metade da feira, caindo esta, de seguida, até atingir o valor final à saída da feira para a resina utilizada.

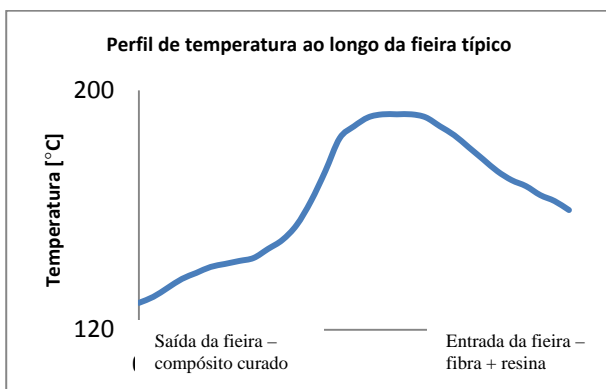


Figura 2: Perfil de temperatura típico ao longo da feira

Tal como foi referido anteriormente, o sistema de aquecimento mais comum aplicado no processo de pultrusão é o sistema de resistências externas, quer por placas largas, que abrangem a feira no seu todo, quer por

várias placas, que são colocadas sobre a feira. Estes sistemas possuem baixos tempos de set-up, contudo as elevadas perdas de calor são uma realidade. Assim, outros sistemas foram já apresentados para resolver este problema, como é o caso do aquecimento por circulação de fluido ou por resistências embebidas.

A solução de aquecimento por circulação de fluido é aquela que mais incrementa o tempo de set-up, necessitando também de bombas de circulação e consequente consumo eléctrico, não esquecendo que a sua utilização pressupõe maiores cuidados [12]. Assim, devido ao facto das resistências embebidas proporcionarem uma maior poupança de energia, permitirão melhores refinamentos de temperatura em diferentes zonas ao longo da feira e diminuirão o tempo de set-up, este estudo foi desenvolvido com base neste sistema de aquecimento.

Este estudo tem um forte suporte em análise por elementos finitos, tal como outros autores fizeram [11-15], devido aos elevados custos que seriam envolvidos em testes experimentais. Contudo, antes de proceder à análise por elementos finitos, realizaram-se capturas de imagens termográficas à feira durante período produtivo. De seguida, procedeu-se à simulação do sistema “feira + sistema de aquecimento”, e após obtidos os resultados da simulação, verificou-se a compatibilidade destes com os resultados obtidos na termografia. Após este procedimento, foi possível verificar que as simulações realizadas com pressupostos pré-determinados, são consideradas aceitáveis permitindo o uso da simulação numérica para desenvolvimento deste sistema de aquecimento.

2. Procedimentos Experimentais

O layout do sistema de pultrusão pode ser observado na Figura 3.

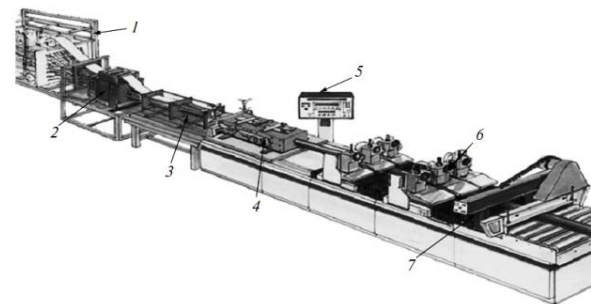


Figura 3: Layout de sistema de pultrusão (adaptado de [7]) onde se pode observar (1) as fibras e o rack, (2) zona de impregnação de fibras, (3) placas de guiamento, (4) feira, (5) painel de controlo, (6) sistema de tracção e o (7) sistema de corte.

No início deste estudo, o sistema utilizado para aquecimento da feira é o mostrado na figura 4. Dois sensores de temperatura, um para cada conjunto de aquecimento (conjunto “a” e conjunto “b”), são responsáveis por enviar informação em tempo real para um PLC (Programmable Logic Controller). Este controlador analisa a informação recebida verificando se o valor recebido se encontra dentro do domínio estabelecido.

Se o valor for inferior ao mínimo, então as resistências são ligadas, se o valor for superior ao máximo, as mesmas são

desligadas. O sistema de aquecimento é composto por quatro resistências rectangulares em alumínio, tendo cada uma delas 800W de potência. No entanto, é possível dividir este sistema em duas partes, devido ao facto de existir um grupo de duas resistências pequenas, representado por “a” na Figura 3, e outro grupo constituído por duas resistências grandes, representado por “b” na Figura 4. Desde que todas as resistências tenham a mesma potência, a diferença de tamanho e a consequente variação de volume apenas influencia o rácio W/m³. O contacto entre as resistências e a feira é feito por meio de clamps.

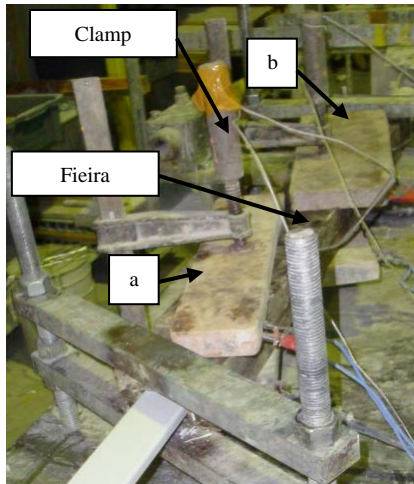


Figura 4: Set-up inicial da feira com resistências eléctricas planas de 800W: (a) pequena e (b) grande

O processo de pultrusão tem bastantes parâmetros que necessitam de ser controlados. Os parâmetros normais usados pelo fabricante deste perfil “U” são:

- Velocidade da linha: 50cm/min;
- Número de cordões de fibra: 34 com 4800 TEX;
- Rácio resina/fibra: 30/70;
- Tipo de resina: resina de poliéster insaturada com baixa viscosidade;
- Gel time to exothermic peak: 2 minutos;
- Pico de exotermia: 230°C;
- Tensão de cedência: 60 MPa;
- Flexural Strength: 110 MPa;
- Dureza Barcol: 45;
- Produção normal por hora: 30 m.

A feira usada no fabrico do compósito em estudo tem 900 mm de comprimento, 103 mm de largura e 56 mm de altura. A forma interna do “U” tem 51 mm de largura, 12 mm de altura e 4mm de espessura. O raio de concordância é de 1 mm. Todas as superfícies internas têm tratamento em cromagem dura electrocopada, sendo realizadas operações de rectificação e polimento até atingir a rugosidade de 0,08 μm .

Foram efectuadas medições de termografia com o objectivo de validar os resultados experimentais com as simulações efectuadas. Estas imagens foram obtidas durante um período de fabrico estável, permitindo obter o perfil de temperaturas ao longo da feira. As imagens termográficas foram realizadas usando o equipamento Flir® i40 com as seguintes características:

- Espectro: onda longa (7.5 – 13 μm);
- Tipo de detector: Focal Plane Array (FPA) microbolometer 120x120 píxeis;
- Número de frames: 9 Hz;
- Precisão de leitura: $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$;
- Sensibilidade térmica: : $<0.20\text{ }^\circ\text{C}$ to $+25\text{ }^\circ\text{C}$;
- Intervalo de temperaturas dos objectos: de -10 a $+350\text{ }^\circ\text{C}$;
- Ecrã: LCD a cores de 89 mm e 18 bit;
- Interpolação: detector de imagem interpolado de 240x240 píxeis.

Estes procedimentos de medição foram realizados seguindo as especificações do equipamento, respeitando 1 m de distância entre a câmara e a feira, e mantendo o alinhamento entre estas. A emissividade do material foi introduzida no equipamento de termografia, conduzindo a resultados mais precisos. As imagens termográficas foram analisadas através de um programa fornecido pelo fabricante do equipamento termográfico (Flir® quick report). Cada imagem foi dividida em 100 áreas diferentes correspondendo a uma matriz de 4 linhas em altura e 25 linhas em largura, considerando a superfície lateral da feira, como está representada na Figura 5.

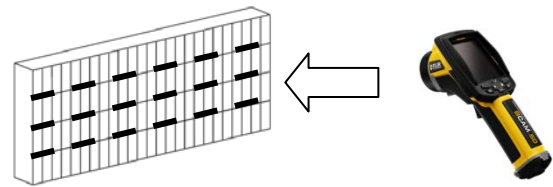


Figura 5: Representação esquemática de todos os pontos considerados na parede lateral da feira quando analisada por termografia

Após cada sessão, as imagens são analisadas usando o software acima referido, determinando as temperaturas nos pontos correspondendo ao cruzamento das linhas tracejadas horizontais com as verticais, como representado na Figura 5.

Com o objectivo de aumentar a definição da imagem, as medições foram efectuadas em duas secções diferentes da feira, o que resulta numa única sessão. Foram realizadas mais três sessões na parede lateral da feira, a fim de aumentar a precisão dos resultados.

Após analisar todas as imagens, aplicaram-se ferramentas estatísticas resultando num perfil de temperaturas ao longo da feira usado como referencial para futuros desenvolvimentos. Com o intuito de calcular o presente caso através de AEF (Análise por Elementos Finitos), utilizou-se o software SolidWorks® para modular o conjunto “feira+sistema de aquecimento”. A feira foi modulada possuindo uma parte superior e uma parte inferior e as resistências como corpos independentes.

Para executar os AEF, foi usado um software apropriado e realizada pesquisa em livros da especialidade, permitindo um conhecimento mais aprofundado sobre boas práticas e métodos neste tipo de análise [16]. Este caso trata-se de uma situação em regime transiente e tomados os seguintes pressupostos:

- Todos os contactos entre as diferentes partes foram considerados perfeitos;

- Todos os corpos estão inicialmente à temperatura ambiente, de 22°C, considerando-se a temperatura constante;
- O coeficiente de convecção é de 2W/m².°C;
- A emissividade é de 0,8.

Para aumentar a resposta do software, foi usada uma malha tetraédrica (4 nós) resultando, após convergência, em 256975 elementos. Foi usada literatura especializada para aprofundar o conhecimento sobre os procedimentos e métodos aplicados neste tipo de análise [16].

Este método foi aplicado com o objectivo de calcular a flutuação de temperaturas na feira, o que permite determinar quanto tempo é que as resistências necessitam de estar conectadas à fonte de energia. O sistema “a” e “b” (ver Figura 4) é controlado independentemente. Os pontos escolhidos para controlo da temperatura na simulação correspondem às zonas onde os sensores térmicos encontram-se localizados na feira, na situação real. Estes pontos de controlo estão localizados 180mm e 684mm afastados do lado de saída da feira.

Posteriormente, a temperatura destes dois pontos foi verificada no perfil de temperaturas desenhado e usada como referência para realizar a AEF. Foi considerada uma variação de temperatura de mais ou menos 5°C, utilizada normalmente pelos fabricantes deste perfil “U”. Isto significa que a fonte de energia é desligada assim que a temperatura atinja 5°C acima da temperatura de referência e ligada quando 5°C abaixo.

Esta simulação foi realizada para um período de 4500 segundos. Enquanto a simulação foi sendo desenvolvida e os resultados analisados, foi possível perceber que a feira necessita de cerca de 3600 segundos para aquecer (o objectivo era obter um comportamento estável da temperatura). Contudo, além deste período de aquecimento, foi simulado um período de 900 segundos, considerando-o como um período representativo que será repetido ao longo do dia de trabalho. No final desta simulação, o perfil de temperaturas foi desenhado o que possibilitou fazer a correspondência com o perfil obtido por termografia. Além disso, esta simulação permitiu estudar o tempo de funcionamento das resistências.

Este sistema de aquecimento possui fraquezas que podem ser resolvidas sem grandes investimentos. O tempo de set-up bem como o método de aplicação não são os melhores. A aplicação de duas resistências através de clamps faz como a resistência, depois de quente, dobre, não permitindo um contacto homogéneo com a feira, prejudicando assim a transferência de calor. Para além disso, apenas uma das seis superfícies da resistência se encontra em contacto com a feira, agravando o desperdício de energia. Assim, um novo sistema constituído por resistências cilíndricas embebidas na feira, já apresentado por Sumerak, J.E. [12], foi estudado neste caso.

O PLC da máquina de pultrusão utilizada para este estudo está apta para controlar até quatro canais de resistências, portanto os dois sistemas de aquecimento (“a” e “b”) previamente utilizados foram substituídos por quatro sistemas independentes, cada um com a sua própria sonda de temperatura, permitindo assim um controlo mais refinado da temperatura. No global, a potência utilizada para o aquecimento da feira é a mesma já que cada resistência cilíndrica debita 400W. O estudo deste sistema tem como objectivo a redução do tempo de set-up bem

como o melhoramento da eficiência energética. A disposição das resistências ao longo da feira, apresentada na Figura 6 (A), é devida a pequenos furos que já existiam na feira para colocação de sondas de temperatura aquando do uso das resistências planas. Estes furos foram alargados de forma a receberem estas novas resistências cilíndricas.

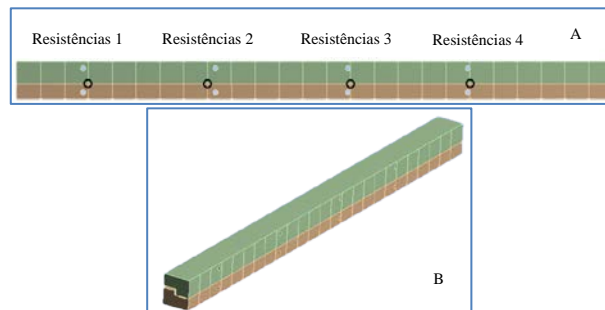


Figura 6: Esquema de localização dos pares de resistências e sondas de temperatura (A); Meia feira usada para a redução do esforço computacional (B).

O novo sistema foi simulado com os mesmos pressupostos usados na simulação anterior. Nesta, a temperatura de controlo foi realizada nos pontos pretos perto de cada par de resistências (ver Figura 6 A), e foi considerado um $\Delta T = \pm 5^\circ\text{C}$ como referido anteriormente. A temperatura de referência para o controlo de cada um dos quatro pontos foi obtida através do perfil de temperatura adquirido por termografia, já utilizado para a simulação do primeiro sistema. Apenas metade da feira foi simulada devido à sua simetria ao longo do seu comprimento, como é apresentado na Figura 6 (B), reduzindo o tempo de cálculo computacional. Uma malha tetraédrica (4 nós) foi utilizada, resultando, após convergência, em 11089 elementos.

3. Resultados

Na Figura 8 é apresentada uma imagem termográfica e a sua correspondente análise. Como já foi referido, as imagens termográficas capturadas à feira foram feitas em duas partes, metade da feira em cada imagem. Cada sessão é constituída por estas duas imagens. Este procedimento permite obter resultados mais precisos durante a análise das imagens termográficas.

Três sessões foram realizadas em três dias diferentes, contudo sobre as mesmas condições, e todas elas durante período produtivo, evitando-se sempre períodos de aquecimento. A Figura 7 demonstra uma imagem após análise como exemplo. Nesta é possível verificar a temperatura em cada ponto seleccionado.

Estes pontos foram obtidos pela intersecção das linhas interrompidas horizontais com as linhas verticais, de acordo com o exibido na Figura 5. Após analisadas todas as imagens das três sessões, ferramentas de estatística básica foram utilizadas. Para cada imagem, foi realizada uma média sobre os pontos da mesma linha vertical. De seguida, realizou-se uma média dos resultados de todas as imagens obtendo-se um perfil de temperaturas ao longo da feira tal como apresentado na Figura 8.

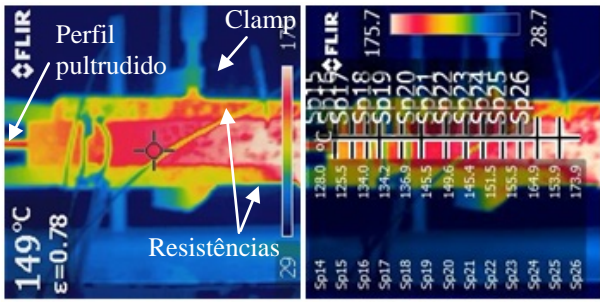


Figura 7: Imagens termográficas com e sem análise

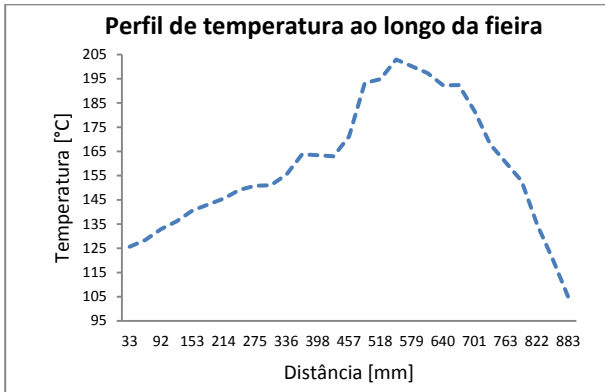


Figura 8: Perfil de temperatura ao longo da fieira obtido por termografia

A análise por elementos finitos foi realizada seguindo este método: primeiro, todas as resistências foram ligadas por um período de tempo longo e depois verificada a temperatura de cada ponto ao longo do tempo. Foi concluído que os pontos localizados a 180mm e 684mm da saída da fieira, eram aqueles que mais rapidamente atingiam a temperatura desejada.

Assim, estes pontos foram seleccionados para serem o pontos de controlo de cada sistema de aquecimento, “a” e “b” respectivamente. Deste modo, as resistências pequenas serão desligadas quando a temperatura atingir 146°C e ligadas quando a temperatura for inferior a 136°C, sendo a referência de temperatura 141°C e o $\Delta T = \pm 5^\circ\text{C}$.

No final da simulação, duas verificações foram realizadas. Primeiro, procedeu-se à comparação do perfil de temperatura obtido por termografia com o obtido pela AEF, como é demonstrado na figura 9. O desvio máximo obtido foi de 7%, o que é considerado aceitável para este estudo.

Do lado direito da figura pode ser observado uma grande discrepância entre as duas curvas, contudo, este facto deve-se a problemas operacionais. Seguindo os correctos procedimentos de termografia, esta parte da fieira fica por detrás de elementos de fixação que são usados para fixar esta à máquina de pultrusão, bloqueando os infravermelhos da camera.

O lado direito do gráfico (Figura 9) corresponde à entrada da fieira (fibras molhadas com resina) enquanto o lado esquerdo diz respeito à saída da mesma (perfil curado). Este perfil de temperaturas pode ser desenhado a partir dos 3600 segundos, visto que apenas a esta altura se obtêm uma temperatura estável ao longo da fieira, estando apenas sujeita a variações em longos períodos de tempo.

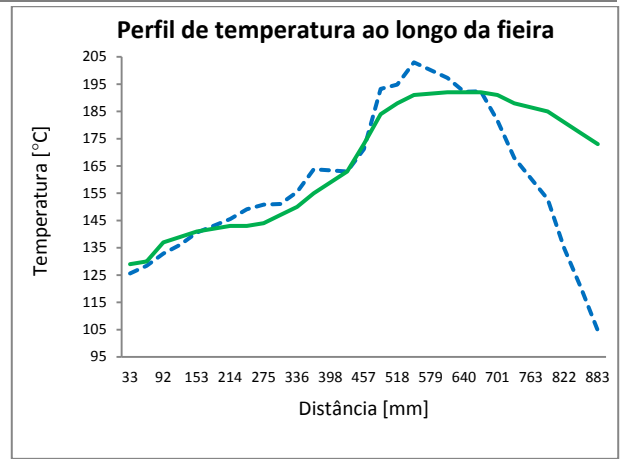


Figura 9: Comparação do perfil obtido por termografia e por simulação numérica

Seguidamente, foi realizado um estudo sobre o consumo de energia por parte das resistências de aquecimento da fieira para um dia completo de trabalho, sendo apresentado na tabela 1.

Tabela 1: Consumo de potência detalhado das resistências planares

Resistências planas			
	Aquecimento (1h) [kWh]	Produção (7h) [kWh]	Subtotal do tempo de trabalho (8h) [kWh]
Resistências pequenas	0,660	0,192	2,0
Resistências grandes	1,412	0,948	8,0
Consumo total de potência por dia de fabrico [kWh]			10,0
Consumo total de potência por mês de fabrico (22 dias) [kWh]			221,1

Esta tabela foi desenvolvida com base na duração em que as resistências se encontravam ligados. Sabendo o tempo por hora que cada grupo de resistências se encontra em funcionamento bem como a sua potência, é possível determinar o número de kWh utilizados. A figura 10 demonstra graficamente a informação utilizada para o efeito. A linha contínua diz respeito ao grupo de resistências pequenas (grupo “a” figura 4) enquanto que a linha interrompida diz respeito ao grupo de resistências grandes (grupo “b” figura 4).

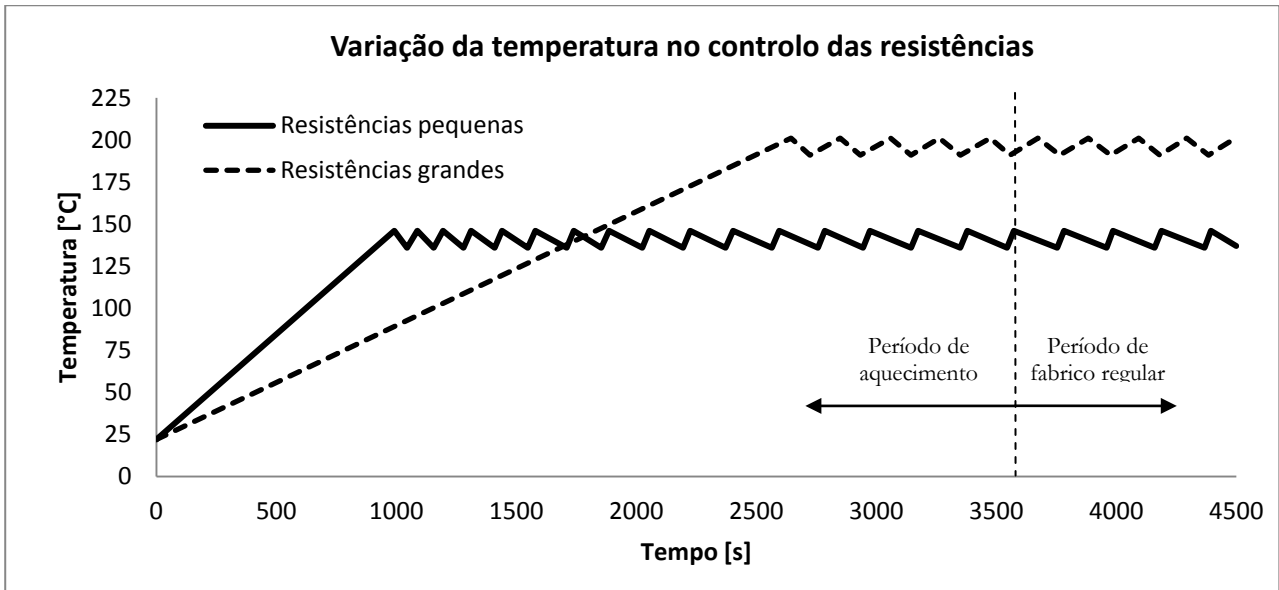


Figura 10: Variação da temperatura ao longo do tempo no controlo das resistências

É importante referir que a simulação do novo sistema de aquecimento, baseado em oito resistências cilíndricas embebidas na feira, irá seguir o mesmo perfil de temperatura obtido por termografia. Este estudo irá focar-se no tempo de trabalho destas resistências, sendo

posteriormente comparado com o tempo de trabalho do sistema actual. Concluída a AEF, são apresentados os gráficos de performance de cada sistema de aquecimento nas figuras 11 a 14.

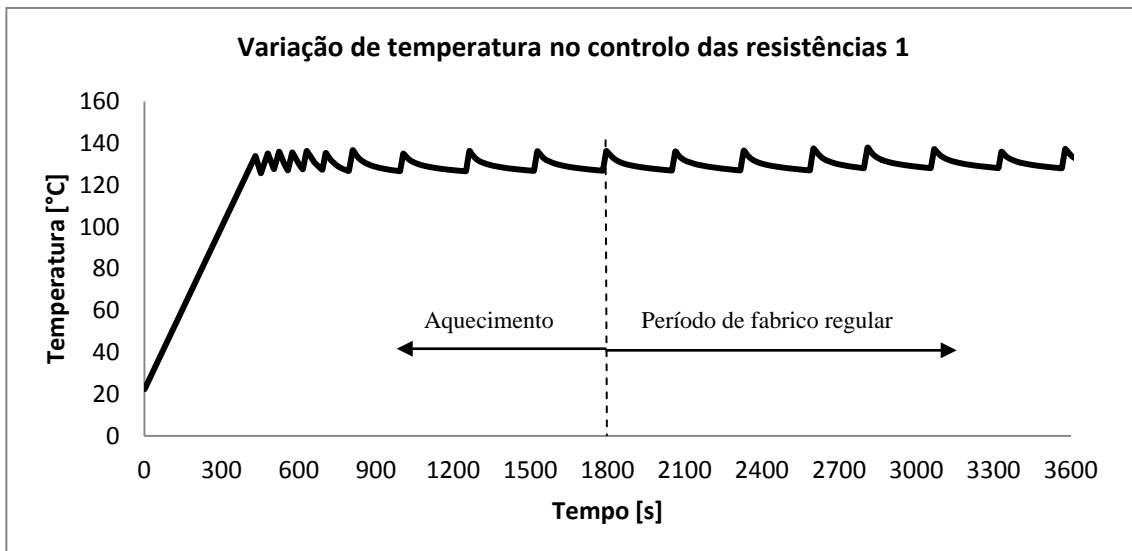


Figura 11: Variação de temperatura no controlo das resistências 1

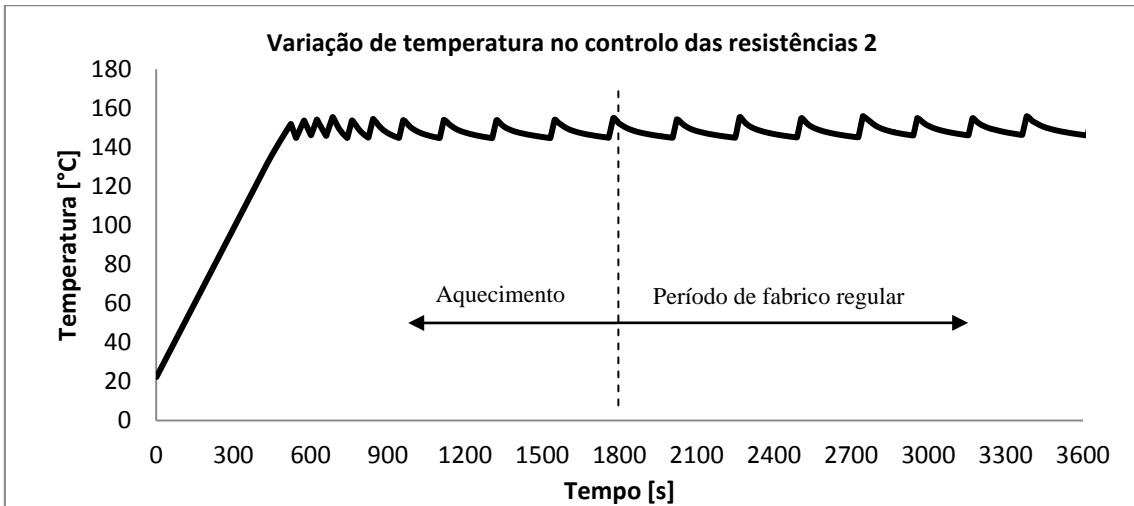


Figura 12: Variação de temperatura no controlo das resistências 2

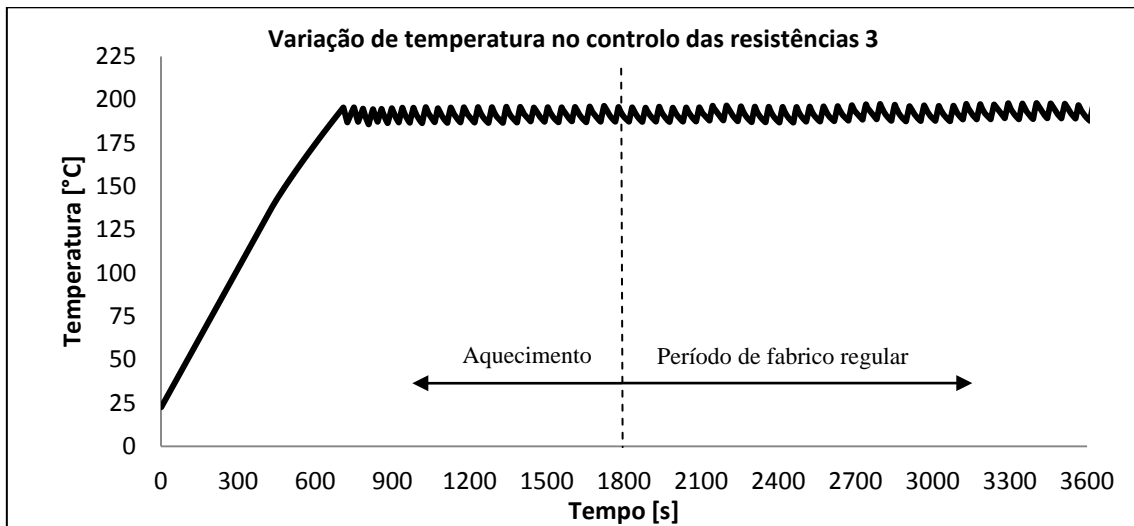


Figura 13: Variação de temperatura no controlo das resistências 3

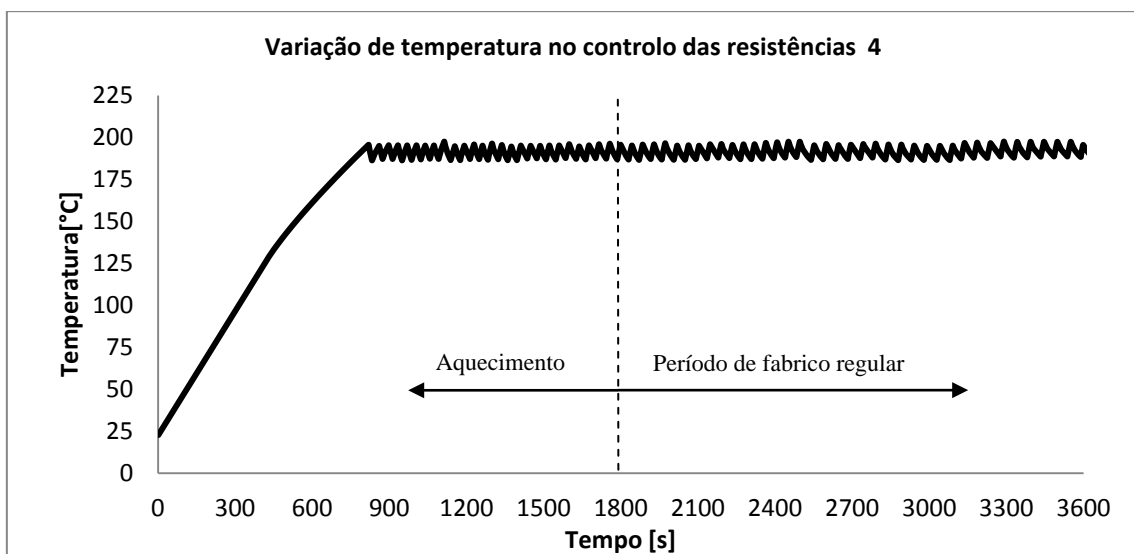


Figura 14: Variação de temperatura no controlo das resistências 4

Com os valores obtidos foi realizada a tabela 2 de modo a demonstrar detalhadamente toda a informação para cada grupo de aquecimento. De forma a melhor comparar os dois sistemas, foi realizada a tabela 3. Nesta, os resultados obtidos no sistema de aquecimento 1 e 2 da figura 6 foram somados, assim como os resultados obtidos no sistema de aquecimento 3 e 4 da figura 6 de forma a serem comparáveis com o sistema “a” e “b” da figura 4, respectivamente.

Tabela 2: Consumo de potência detalhado das resistências cilíndricas

Resistências 1	
Aquecimento [h]	0,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	9,65
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,322
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,258
Tempo de produção [h]	7,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	1,40
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,047
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,038
Resistências 2	
Aquecimento [h]	0,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	11,70
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,390
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,312
Tempo de produção [h]	7,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	2,05
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,068
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,054
Resistências 3	
Aquecimento [h]	0,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	16,62
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,554
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,443

Tempo de produção [h]	7,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	6,72
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,224
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,179
Resistências 4	
Aquecimento [h]	0,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	20,18
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,673
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,538
Tempo de produção [h]	7,5
Tempo total de trabalho em 30 min. [min]	7,72
Tempo total de trabalho em 1h [h]	0,257
Potência de aquecimento [W]	800
Potência utilizada [kWh]	0,206

Tabela 3: Resumo dos resultados de consumo de potência das resistências cilíndricas

Resistências cilíndricas			
	Aquecimento (0,5h) [kWh]	Produção (7,5h) [kWh]	Subtotal do tempo de trabalho (8h) [kWh]
Sistema de aquecimento 1 e 2	0,569	0,092	0,975
Sistema de aquecimento 3 e 4	0,981	0,385	3,377
Consumo total de potência por dia de fabrico [kWh]			4,352
Consumo total de potência por mês de fabrico (22 dias) [kWh]			95,744

Comparando a informação da tabela 1 e da tabela 3 é possível analisar a diferença entre os dois sistemas de aquecimento, tal como é apresentada a tabela 4.

Tabela 4: Comparação de potências consumidas pelos dois sistemas

Resistências planas – Potência consumida por dia de fabrico [kWh]	10,048
Resistências cilíndricas – Potência consumida por dia de fabrico [kWh]	4,35
Redução [%]	-56,7%

A redução obtida usando o novo sistema é de cerca de 57%, o que é um valor significativo. Como foram realizadas imagens termográficas durante um teste de produção, que foi realizado com as resistências cilíndricas, é possível comparar imagens termográficas dos dois sistemas de aquecimento. A figura 15 demonstra a mesma parte da feira a ser aquecida pelos dois sistemas, “A” corresponde as resistências planares e “B” às resistências cilíndricas. Como é possível verificar, para além de mais eficientes, este sistema permite uma maior homogeneidade de calor bem como um controlo de temperatura mais refinado para cada zona da feira, o que não se verifica no outro sistema.

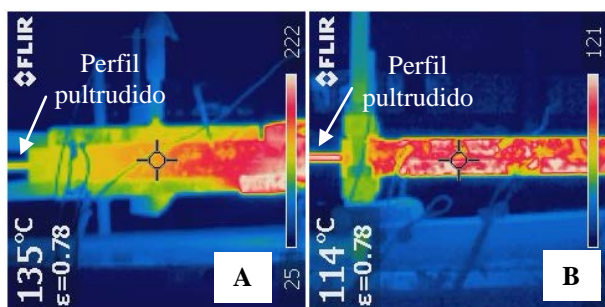


Figura 15: Imagens termográficas demonstrando diferenças de homogeneidade de temperatura. A - resistências planares. B - resistências cilíndricas.

4. Conclusões

O principal objectivo deste estudo é a melhoria do consumo energético, reduzindo-o, estudando o sistema de aquecimento mais eficiente no processo de pultrusão. Utilizando tecnologias como termografia para análises de temperaturas e a análise por elementos finitos para determinar o escoamento de calor de cada sistema, foi possível verificar que:

As imagens termográficas associadas ao seu software de análise permitiram determinar o perfil de temperatura ao longo da feira; A análise por elementos finitos permitiu determinar quanto tempo estão os sistemas de aquecimentos ligados, e consequentemente obter o consumo do mesmo.

Assim, as seguintes conclusões podem ser expostas: é possível manter o perfil de temperatura inicial com o novo sistema de aquecimento; O consumo de energia diminuiu 57% utilizando o sistema de resistências cilíndricas embebidas em vez do sistema inicial; O tempo de aquecimento da máquina foi reduzido 50%, reduzindo assim o tempo de set-up e incrementando o tempo produtivo; O controlo de temperatura é mais refinado devido ao aumento de sondas de temperatura e respectivos sistemas de aquecimento independentes.

Para além disto, este novo sistema foi testado em produção, exibindo grandes padrões de qualidade sem qualquer problema produtivo. Assim, este sistema é fortemente sugerido com o propósito de aumentar a produtividade, mantendo a elevada qualidade dos produtos pultrudidos e reduzindo o tempo de set-up bem como o consumo de energia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao QREN- Quadro de Referência Estratégico Nacional pelo suporte financeiro, ao ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto por todas as facilidades cedidas no uso de equipamento e por fim, mas não o último, à ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda. por todo o trabalho experimental realizado na sua máquina de pultrusão. Sem todas estas identidades esta investigação não seria possível.

Referências

- [1] Sunil C. Joshi, Y.C. Lam, Kyaw Zaw, “Optimization for quality thermosetting composites pultruded through die heater layout and power control”, ICCM 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto-Japan, 08-13 July 2007
- [2] Y. C. Lam, Jianhua LI, and Sunil C. Joshi, “Simultaneous Optimization of Die-Heating and Pull-Speed in Pultrusion of Thermosetting Composites”, Polymer Composites, Vol. 24, Nr. 1, February 2003.
- [3] M. Sarrionandia, I. Mondrago, S. M. Moschiar, M. M. Reboredo and A. Vazquez, Heat Transfer for Pultrusion of a Modified Acrylic/Glass Reinforced Composite, Polymer composites, Vol. 23, No. 1, February 2002.
- [4] S. M. Moschiar, M. M. Reboredo, H. Larrondo, and A. Vazquez, Pultrusion of Epoxy Matrix Composites: Pulling Force Model and Thermal Stress Analysis, Polymer Composites, Vol. 17, No. 6, December 1996.
- [5] A. A. Safonov and Yu. V. Suvorova, “Optimization of the Pultrusion Process for a Rod with a Large Diameter”, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, Vol. 38, Nr. 6, 572–578, 2009.
- [6] J. Zhu, K. Chandrashekhara, V. Flanigan and S. Kapila, Manufacturing and mechanical properties of soy-based composites using pultrusion, Composites: Part A 35: 95–101, 2004.
- [7] Goldsworthy, B., Pultrusion - International Encyclopedia of Composites, Vol. 6, Lee, S.M. (Eds), Wiley-VCH, 1991
- [8] S. M. Moschiar, M. M. Reboredo, J. M. Kenny, and A. Vazquez, “Analysis of Pultrusion Processing of Composites of Unsaturated Polyester Resin With Glass Fibers”, Polymer Composites, Vol. 17, Nr. 3, June 1996.
- [9] Hodgkin, J., “Thermosets: Epoxies and Polyesters”, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 9215-9221, Last update: January 2011.
- [10] Sunil C. Joshi, Y. C. Lam, “Integrated approach for modeling cure and crystallization kinetics of different polymers in 3D pultrusion simulation”, Journal of Materials Processing Technology 174, January 2006.
- [11] G. Viola, T. Portwood, P. Ubrich, and H. R. DeGroot, “Numerical optimization of pultrusion line operating parameters”, 35th International SAMPE

Symposium, Anaheim, CA, USA, 1968- 1975, 2 April 1990.

[12] J.E Sumerak, "Pultrusion Die Design Optimization Opportunities Using Thermal Finite Element Analysis Techniques", 49th Annual Conference, The Society of the Plastics Industry, February 1994

[13] X.-L. Liu, "Numerical modeling on pultrusion of composite I beam", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 32, Issue 5: 663-681, 1 May 2001.

[14] D. Santiago, G. Lombera, S. Urquiza, S. M. Moschiar, "Modelado Numérico del Proceso de Pultrusión en Materiales Compuestos", Materials Research, Vol. 6, No. 4, 583-589, 2003

[15] J. Mackerle, "Finite elements analyses and simulation of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985-2003)", Computational Materials Science, Volume 31, 187-219, November 2004.

[16] Bathe K.J. Finite Element Procedures, Prentice-Hall Internacional Editions, 2007



Comparative study about heating systems for pultrusion process

F.J.G. Silva^{a,*}, F. Ferreira^a, C. Costa^a, M.C.S. Ribeiro^b, A.C. Meira Castro^{a,c}

^a ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto do Instituto Politécnico do Porto, Rua Dr. António Bernardino, de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal

^b FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal

^c CIGAR, Centro de Investigação em Geo – Ambiente e Recursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 July 2011

Received in revised form 1 December 2011

Accepted 13 January 2012

Available online 25 January 2012

Keywords:

A. Glass fibres

C. Finite element analysis

E. Pultrusion

Conserving energy

ABSTRACT

Different heating systems have been used in pultrusion, where the most widely used heaters are planar resistances. The primary objective of this study was to develop an improved heating system and compare its performance with that of a system with planar resistances. In this study, thermography was used to better understand the temperature profile along the die. Finite element analysis was performed to determine the amount of energy consumed by the heating systems. Improvements were made to the die to test the new heating system, and it was found that the new system reduced the setup time and energy consumption by approximately 57%.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Pultrusion is a continuous process employed worldwide to manufacture polymer composites into shapes with constant cross sections, such as tubes, bars and others profiles [1–4]. Polymer composites, which are made from a thermoplastic or thermosetting resin matrix and glass fibre reinforcements, are generally referred to as glass fibre-reinforced plastic (GFRP) composites [5] and are used in structural applications, where a high specific mechanical strength and good chemical resistance are required [6].

Because GFRP composites are light-weight, they have a strong competitive advantage: their structures are easy to transport, which is extremely important in specific situations. Their assembly requires rivets, adhesives, and screws, among other common parts. Being light-weight and requiring simple mechanical fasteners is advantageous in structures, such as wastewater treatment plants, structures near salt water environments, and chemical storage tanks. The tool die, which is used to create the final product shape, is usually divided in two parts, the upper and lower part. When the cross sections of the pultruded shapes have openings, such as tubes, mandrels are required [5]. The main advantages of this process are related to its low labour requirements and tooling simplicity.

To better conform the product to its final application, appropriate materials and parameters must be selected. Composites can be reinforced with fibres that are unidirectional, matted or woven.

The usage of surfacing veils must be considered if good surface quality is required [7].

Epoxy, polyester and vinyl esters are the most commonly used resins. Epoxies are better adhesives, generally adhering to the die better than polyester and vinyl esters; however, this leads to more manufacturing problems due to the composite breaking while in the die. Moreover, this type of resin shrinks less, which worsens the problem [8]. However, composites made from epoxies are extremely advantageous when special mechanical properties, elevated thermal resistance and high corrosion are required.

After the fibres are impregnated into the thermosetting resin and while still in the uncured state, they are guided through tools that organise and pre-form the fibres into the right position; also, any excess resin is squeezed out, which is known as “debulking”. To enhance the structural properties and surface finish, a strand mat and surface veils are often added at this stage. The curing process begins when the composite passes through a heated die.

The die length is one of the most important aspects in pultrusion because it determines how long the composite will be heated. The die length will also affect the pulling force and production line speed due to the variation of the inside surface area. A programmed power controller controls the temperature profile along the die, recording real-time measurements using temperature probes and providing the appropriate temperature profile for the thermosetting resin cure process. The temperature profile along the die is important because if the temperature is too low, the resin will not completely cure, and if the temperature is too high, the resin degrades, which creates manufacturing problems; the most critical problem is when the moulded profile breaks while inside

* Corresponding author.

E-mail addresses: fgs@isep.ipp.pt, francisco.silva@eu.ipp.pt (F.J.G. Silva).

the die [7,9]. Depending on the product being manufactured, variables such as the type of matrix resin and its exothermic reaction, line speed, temperature along the die, ply schedule and die length must be appropriately adjusted to optimise production [7]. The pultrusion process is often decided by tests during manufacturing, which allow producers to observe the relations between the variables and therefore increase the parameter accuracy related with each product. When the product exits the die, its profile is cured and only needs to be cut to the desired length.

In this process, a dual traction system is used, which continuously pulls the GFRP composite through the die [1,5]. The pulling speed depends on several conditions, such as the bar thickness, die length, die temperature and resin formulation. To incorporate all these conditions, experience is fundamental to achieve the optimal speed with high quality standards. At the end of the process, the pultruded composite is cut to the required length dimensions [1–3].

Generally, the heating system efficiency is not an important issue in the pultrusion process. This fact is supported by the widespread use of external heating systems [10,11] that are associated with significant heat losses. However, due to global warming, it is imperative to develop a more efficient heating system, which would lower the product cost and reduce environmental impacts. The typical die temperature profile is shown in Fig. 1. The exothermic reaction causes the maximum temperature to be reached, approximately midway through the length of the die; the temperature then drops, reaching an exit value at the end of the die, in this case [1].

As mentioned before, the most common heating systems used in the pultrusion process are the large universal heating platens and the multi-planar heaters. These systems have low setup times but have large heating losses. Thus, other systems have already been suggested to reduce the heating losses, such as fluid circulation and electrical cartridges heaters. The fluid circulation solution will increase the setup time and requires a pump and will consequently consume electricity, which will result in more maintenance compared with other solutions [11]. Therefore, the electrical cartridge heating system was chosen for this study due to its higher energy savings and lower setup time and because it allows temperature refinement in different zones along the die.

This work was greatly supported by finite element analysis, which has also been used by other researchers [10–14] due to the expensive costs associated with experimental tests. In this study, thermographic images of the die with planar heaters were obtained and analysed. Then, the heating system was simulated, and the results were matched with the thermographic images. Afterwards, it was possible to verify that the simulations, along with several assumptions, can provide results that are acceptable.

2. Experimental

Fig. 2 shows the pultrusion system layout, and Fig. 3 shows the heating system used for the die at the beginning of the study.

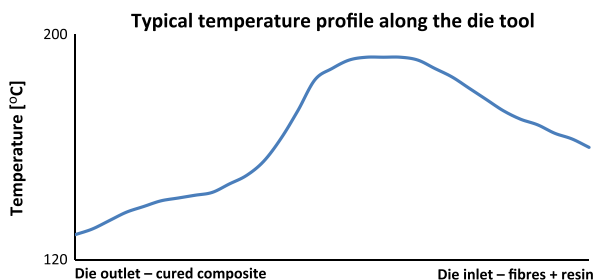


Fig. 1. Typical temperature profile along the die tool for the resin formulation used.

The heating system consists of four aluminium heaters, which were formed by Cr–Ni spiralled wire embedded in a cast aluminium block, and divided in two groups, “a” and “b”, where each group consisted of two heaters. In each group, one heater was placed on the die and the other heater was placed under the die. The length, width and height of the group “a” heaters were 350 mm, 70 mm and 30 mm, respectively, and the length, width and height of the group “b” heaters were 380 mm, 140 mm and 30 mm, respectively. Two temperature sensors, one for each group of heaters (group “a” and group “b”), sent real-time information to a PLC (programmable logic controller), which monitored whether the temperature stayed within the limits. If the value was lower than a minimum value, then the heaters turned on, and if the value was greater than a maximum value, a turn-off command was sent. The heating system had four aluminium rectangular resistances, each 800 W. Because all the heaters had the same power, the size difference and the consequent variation in volume only influenced the ratio, W/m^3 . Clamps were used to connect the heaters to the die.

The pultrusion process consists of many parameters that must be controlled. The following are the most common parameters used by the manufacturer for the “U” profile:

- Line speed: 50 cm/min
- Fibre type: glass fibre type E
- Number of fibre wires: 34 with 4800 TEX
- Resin/fibre ratio: 30/70
- Resin type: unsaturated polyester resin with low viscosity
- Resin gel time to exothermic peak: 2 min
- Exothermic peak: 230 °C
- Composite tensile strength (mean): 370 MPa
- Barcol hardness: 45
- Normal production per hour: 30 m

The length, width and height of the die tool used were 900 mm, 103 mm and 56 mm, respectively. The width, height and thickness of the internal “U” shape were 51 mm, 12 mm and 4 mm, respectively. The fillet had a radius of 1 mm. All the internal surfaces had an electroplated hard chromium surface treatment that were polished until a roughness of 0.08 μm was achieved.

Thermographic images were captured to compare the experimental results with the simulation results. These images were taken during a stable manufacturing state, which allowed the temperature profile along the die to be obtained.

The thermographic images were taken using Flir®i40 imaging camera that had the following characteristics:

- Spectral band: large wave (7.5–13 μm);
- Detector type: focal plane array (FPA) microbolometer 120 × 120 pixels;
- Frame rate: 9 Hz;
- Accuracy: ± 2 °C or $\pm 2\%$ of the reading;
- Thermal sensitivity: < 0.20 °C to $+25$ °C;
- Range of object temperatures: -10 to $+350$ °C;
- Display: 89 mm colour LCD, 18 bit colour;
- Interpolation: imaging detector interpolated to 240 × 240 pixels.

The measurement procedures followed the equipment supplier specifications: a 1 m distance was maintained between the camera and the die and their alignment was kept. The emissivity of the die material was inputted into the thermographic equipment, which resulted in more accurate results. The thermographic images were analysed using the program provided by the equipment supplier (Flir® Quick Report). Each image was divided into 100 different areas corresponding to a matrix with four rows and 25 columns, which represented the lateral surface of the die, as shown in Fig. 4.

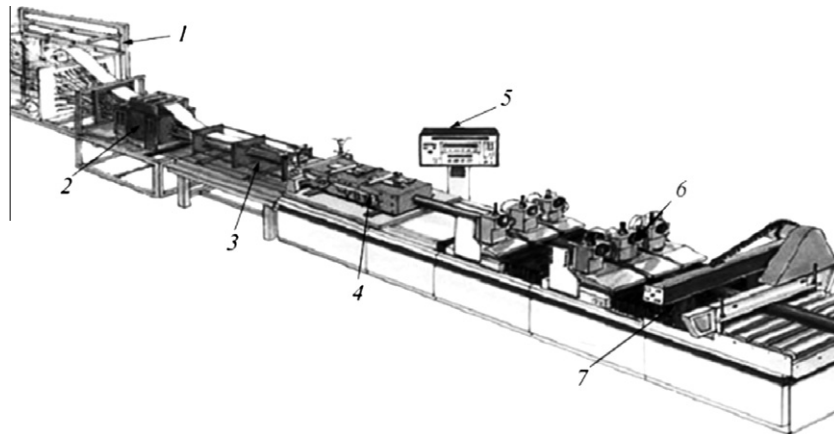


Fig. 2. Pultrusion layout (adapted from [7]), where the following can be observed: (1) fibres and roving rack, (2) impregnator, (3) folder, (4) die, (5) control board, (6) withdrawal roll facility and (7) cutting device.

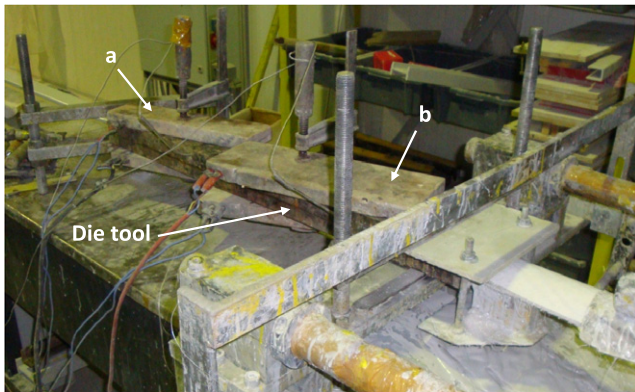


Fig. 3. Initial set-up die with 800-W plane heaters: (a) small and (b) large electrical resistance.

Following each session, the images were analysed using the aforementioned software, which determined the temperature at each point corresponding to the intersection of the horizontal dashed lines with the vertical lines in Fig. 4. To increase the image definition, measurements were taken from two die sections, referred to as a single session. Three sessions were performed over the die lateral wall to increase the accuracy of the results. After all the images were analysed, statistical tools were applied to the images, which allowed the measured temperature profile along the die to be used as a reference for further developments.

To perform the Finite Element Analyses (FEA), the SolidWorks® software was used to model the die tool/heaters system. The die tool was modelled as upper and lower parts, and the heaters were mod-

elled as independent bodies. The thermal state was assumed to be transient, and the following were assumed: all contacts were considered perfect; all bodies were initially at room temperature (22 °C) and remained constant; the convection coefficient was 2 W/m² °C; the emissivity was 0.8. To increase the software response, a tetrahedral (four nodes) mesh was used, which, after convergence, resulted in 256,975 elements. Specialised support literature was used as a reference to gain a deeper understanding regarding the procedures and methods used for this type of analysis [15].

This method was used to evaluate the temperature fluctuation in the die, which allowed the determination of the time the resistances needed to be connected to the power supply. System “a” and “b” (see Fig. 3) were independently controlled. The points chosen for the temperature control in the simulation corresponded to the locations where the temperature probes were located on the real die. These control points were located 180 mm and 684 mm from the exit side of the die. Then, the temperatures at these points were checked with the drawn temperature profile and used as a reference to perform the FEA. A temperature difference of $\Delta T = \pm 5$ °C is typically used by the manufacturer for the “U” profile, which means that the power supply switches on or off when the temperature is 5 °C below or above the reference temperature, respectively. The simulation ran for 4500 seconds. While the simulation was developing and the results were being analysed, it was observed that the die required approximately 3600 seconds to warm up (the goal was a stable temperature behaviour). However, beyond this warm-up period, a period of 900 seconds was simulated, a time that was considered as a representative period that would be repeated in a typical work day for a die.

At the end of the simulation, a temperature profile was obtained and compared with the profile obtained by thermography. More-

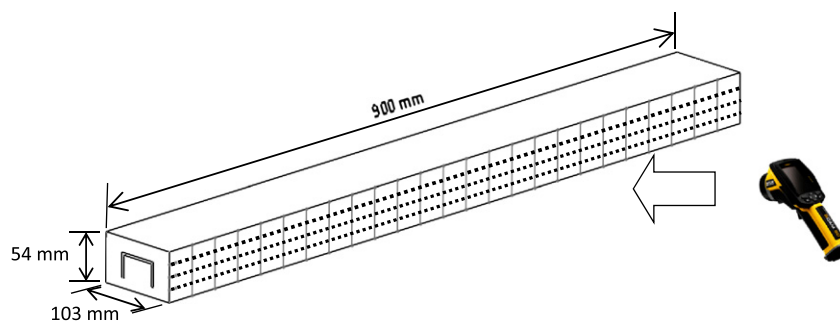


Fig. 4. Schematic representation of all the points considered on the lateral wall of the die that were analysed by thermography.

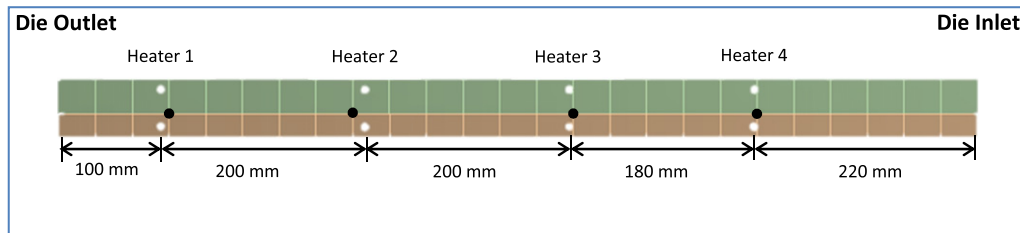


Fig. 5. Location scheme of the resistance pairs (white spots) and temperature probes (black spots) along the die tool (lateral view).

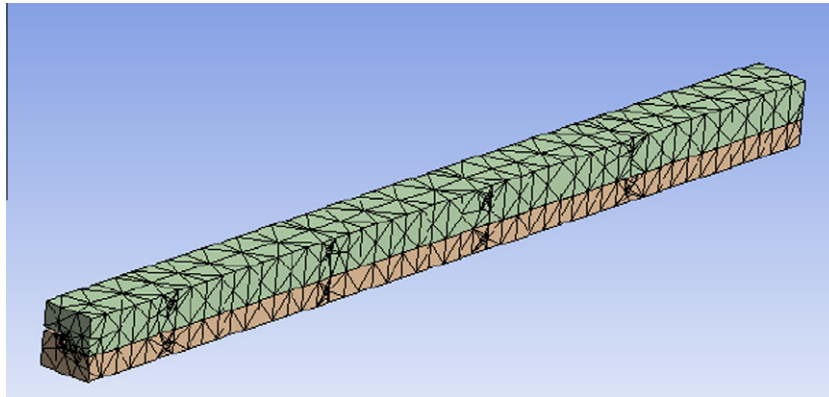


Fig. 6. Half of the die tool with its mesh, which was done to reduce the computational time.

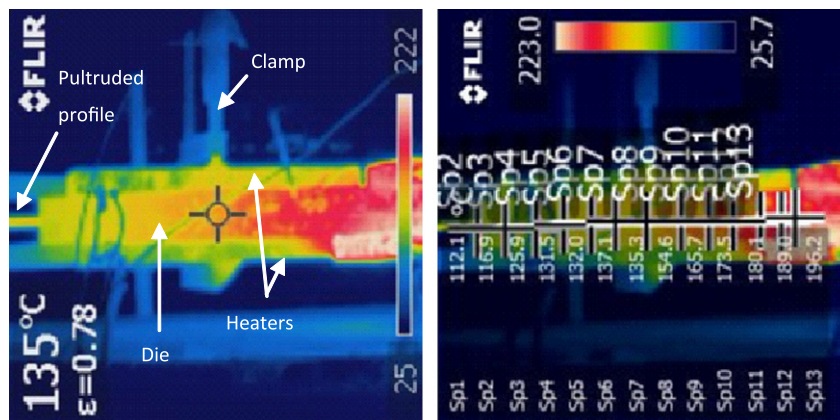


Fig. 7. Thermographic images with and without the analysis of the previous heating system.

over, this simulation allowed the heaters' working time to be studied.

Several weaknesses were observed in the heating system, which can be easily solved by inexpensive solutions. The set-up and the assembly method can be improved. It is difficult for an employee to single-handedly attach each heater group to the die using a clamp. Moreover, using only one clamp at the heater centre, as shown in Fig. 3, causes the heaters to bend, which decreases the conduction heat transfer due to the lack of contact. Moreover, only one of the six surfaces of the heater is in contact with the die, and thus, much of the heat does not go to the die. To overcome this problem, the existing holes in the die were used to modify the system, where cylindrical heaters were embedded into the die, which has been performed by Sumerak [11]. The PLC of the pultrusion machine is capable of controlling up to four channels and thus, the previous heating systems ("a" and "b") were replaced by

four independent heating systems, which included a temperature probe, allowing a more refined control of the temperature. The power used to heat the die tool is the same as before; each cylindrical heater had a rated power of 400 W. The objective of studying this system was to reduce the set-up time and improve the thermal efficiency. Fig. 5 shows the layout of the resistances along the die that were inserted into the existing holes, which were where the previously used temperature probes were inserted when the planar heaters were used. These holes were enlarged by drilling so the cylindrical resistances could be inserted. The new system was simulated with the same assumptions used previously. The temperature was controlled at the black spots near each pair of heaters (see Fig. 5), using the limits, $\Delta T = \pm 5^\circ\text{C}$, which were also used in the previous system. The reference temperature for each one of the four points was obtained by the thermographic temperature profile, which was also used for the first system.

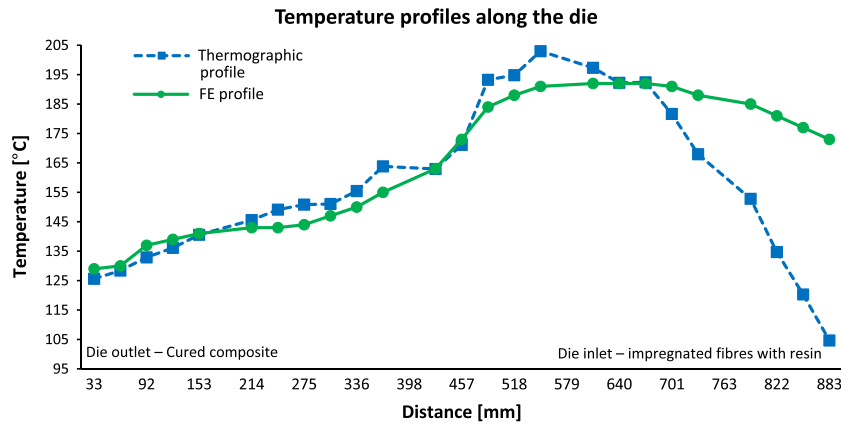


Fig. 8. Thermographic and FEA temperature profiles.

The tetrahedral (four nodes) mesh was used, which after convergence, resulted in 11,089 elements. Only half of the die tool was simulated due to symmetry along the die length, as shown in Fig. 6, which reduced the computation time.

3. Results and discussion

The model was based on the thermographic analysis, as shown in Fig. 7, which depicts the obtained temperature profile study along the die. As previously mentioned, the thermographic measurements on the die were performed in two parts: one image for each half of the die. Each session consisted of these two images. This method resulted in more accurate results during the image analysis. Three sessions were performed on three different days under similar environmental conditions; all sessions were conducted during manufacturing time to ensure the warm-up periods were always avoided. The temperature could be seen for each selected point. These points were obtained by intersecting the horizontal dashed lines with the vertical dashed lines, as shown in Fig. 4. Statistical tools were applied to all the obtained images. For each image, an average temperature was collected at the points on the same vertical line. Then, the results from all the images were averaged to obtain the temperature profile along the die, as shown in Fig. 8.

The FEA was performed using the following method: first, all the heaters were turned on for a period of time and then, the temperature at each point was checked. It was observed that the points located 180 mm and 684 mm from the exit side of the die reached the desired temperature more rapidly. Controlling these two points is required to avoid overheating, which can degrade the composite. Thus, these points were selected to be temperature controllers for each heating system, “a” and “b”, respectively. According to the temperature profile obtained by thermography (Fig. 8), the reference temperatures of groups “a” and “b” were $141\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ and

$196\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, respectively. A temperature range of $\pm 5\text{ °C}$ was selected based on knowledge from the manufacturer.

At the end of the simulation, two different approaches were then used. First, the agreement between the temperature profile drawn by thermography and the one obtained by the FEA was verified, as shown in Fig. 8. The maximum deviation obtained was 7%, which was considered acceptable for this analysis. On the right side of Fig. 8, a large disagreement between the curves can be observed; however, this was due to operational reasons. Following the correct procedures for thermographic measurements, this part of the die tool is located behind the fastening elements that are used to fix the die to the pultrusion equipment, which blocks the camera's infra-red beam. The right side of the curve (Fig. 8) corresponds to the die entrance (resin plus the fibres), whereas the left side corresponds to the exit side (cured pultruded product). The current temperature profile could be drawn because 3600 s had passed; at this time, the temperature is stabilised along the die, subject only to small variations. Then, a study on the power used by the heaters during an entire working day was performed, as shown in Table 1. This table was developed with information on the heaters' “turn on” time. With the total working hours for each group of heaters and their power known, the amount of kW h used could be determined. Fig. 9 shows graphically the information used. The continuous line denotes the small heaters, and the dashed line denotes the large heaters. It is important to note that the simulation of the new heating system, based on eight cylindrical heaters embedded in the die tool, will follow the same temperature profile obtained by the thermography. The study will focus on the working time of the heaters and compare the time with that of the previous heating system.

After the FEA was performed, Table 2 was created to show detailed information regarding each group of heaters. To better compare the results between the old and new system, Table 3 was created. The subtotal working time (SWT) was calculated using the following equation: $\text{SWT} = \text{Warm-up time} \times \text{kW h} + \text{Manufacturing time} \times \text{kW h}$. In this table, the working times of heating systems 1 and 2 from Fig. 5 are presented together to compare them with that of heating system “a” from Fig. 3, and the results of heating systems 3 and 4 from Fig. 5 are shown together to compare with that of heating system “b” from Fig. 3. In Figs. 10–13, the temperature performances for each heater are shown. Comparing the data from Table 1 and Table 3, the difference between both heating systems can be analysed, as shown in Table 4.

The reduction in the energy consumed with the new system was approximately 57%, which is significant. As more thermography sessions were performed and while testing the cylindrical heating system during manufacturing, it is possible to compare

Table 1
Detailed power consumption of the planar heaters.

Planar heaters			
	Warm-up (1 h) (kW h)	Manufacturing (7 h) (kW h)	Subtotal working time (8 h) (kW h)
Small heaters	6.6E^{-1}	19.2E^{-2}	2.0
Large heaters	141.2E^{-2}	94.8E^{-2}	8.0
Total power consumption per manufacturing day (kW h)			10.0
Total power consumption per manufacturing month (22 days) (kW h)			221.1

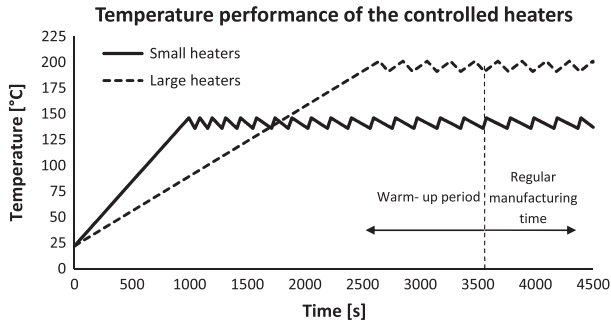


Fig. 9. Temperature performance over time of the controlled heaters.

Table 2
Detailed results of the power consumption for the cylindrical heating system.

Heater 1		Heater 2	
Warm-up (h)	0.5	Warm-up (h)	0.5
Total time of work in 30 min. (min)	9.650	Total time of work in 30 min. (min)	11.700
Total time of work during 1 h (h)	0.322	Total time of work during 1 h (h)	0.390
Heat power (W)	800	Heat power (W)	800
Power usage (kW h)	0.258	Power usage (kW h)	0.312
Manufacturing time (h)	7.5	Manufacturing time (h)	7.5
Total time of work in 30 min. (min)	1.400	Total time of work in 30 min. (min)	2.050
Total time of work during 1 h (h)	0.047	Total time of work during 1 h (h)	0.068
Heat power (W)	800	Heat power (W)	800
Power usage (kW h)	0.038	Power usage (kW h)	0.054
Heater 3		Heater 4	
Warm-up (h)	0.5	Warm-up (h)	0.5
Total time of work in 30 min. (min)	16.620	Total time of work in 30 min. (min)	20.180
Total time of work during 1 h (h)	0.554	Total time of work during 1 h (h)	0.673
Heat power (W)	800	Heat power (W)	800
Power usage (kW h)	0.443	Power usage (kW h)	0.538
Manufacturing time (h)	7.5	Manufacturing time (h)	7.5
Total time of work in 30 min. (min)	6.720	Total time of work in 30 min. (min)	7.720
Total time of work during 1 h (h)	0.224	Total time of work during 1 h (h)	0.257
Heat power (W)	800	Heat power (W)	800
Power usage (kW h)	0.179	Power usage (kW h)	0.206

Table 3
Results of power consumption for the cylindrical heating system.

Cylindrical heaters	Warm-up (0,5 h) (kW h)	Manufacturing (7,5 h) (kW h)	Subtotal working time (8 h) (kW h)
Heating systems 1 and 2	56.9E ⁻²	9.2E ⁻²	97.5E ⁻²
Heating systems 3 and 4	98.1E ⁻²	38.5E ⁻²	337.7E ⁻²
Total power consumption per manufacturing day (kW h)	435.2E ⁻²		
Total power consumption per manufacturing month (22 days) (kW h)	9574.4E ⁻²		

the thermographic images with the thermographic images from the previous system. Fig. 14 shows the same zone of the die tool heated by the two different systems, where “A” corresponds to the planar heater and “B” corresponds to the cylindrical heaters.

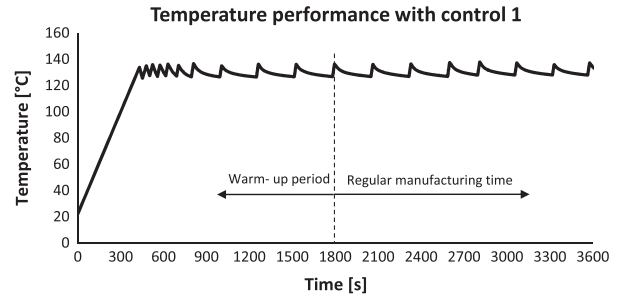


Fig. 10. Temperature performance over time with control 1.

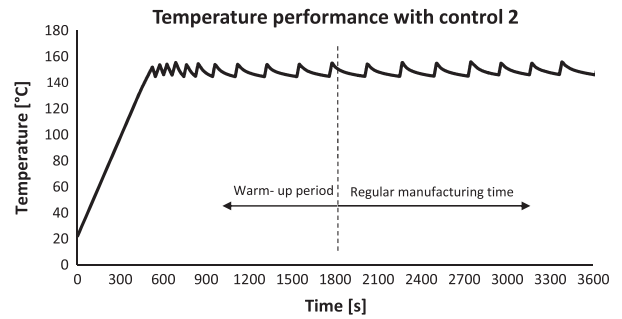


Fig. 11. Temperature performance over time with control 2.

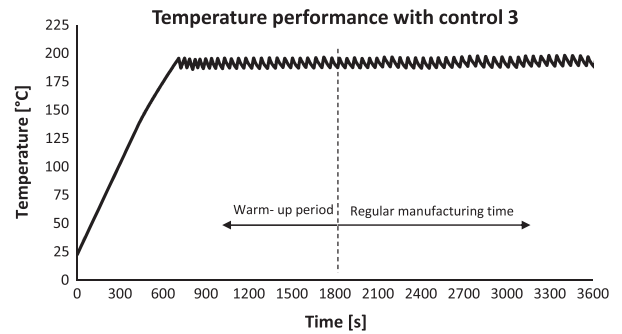


Fig. 12. Temperature performance over time with control 3.

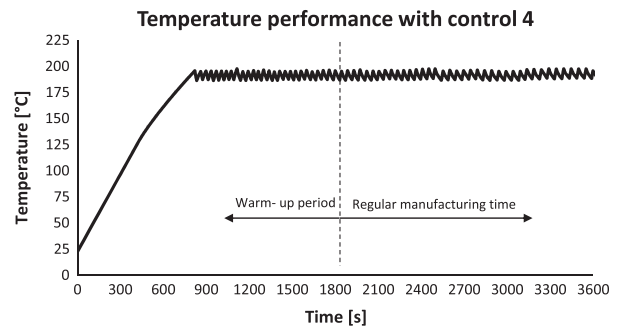


Fig. 13. Temperature performance over time with control 4.

Table 4
Comparison between the planar heaters and cylindrical heaters.

Planar heaters – power consumption per manufacturing day (kW h)	10.0
Cylindrical heaters – power consumption per manufacturing day (kW h)	4.4
Reduction (%)	–56.7

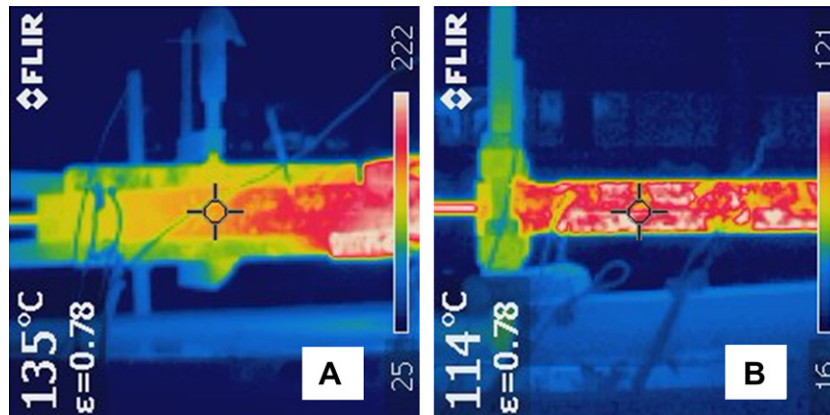


Fig. 14. Thermographic images showing the differences in the homogeneity of the temperature. A – planar heaters. B – cylindrical heaters.

Besides being more efficient, the system with the cylindrical heaters resulted in a more homogeneous heat flow and better control of the temperature for each die zone compared with that with the planar heaters.

4. Conclusions

The primary objective of this work was to reduce the energy consumption of the pultrusion process by creating a more efficient heating system. Using technologies such as thermography in the temperature analysis and the finite element method to determine how the heat flows in each heating system, experimental work was performed, which verified the following:

- Thermographic images and use of the corresponding software analysis allowed the temperature profile along the die to be determined;
- The temperature along the initial die followed the usual profile exhibited by other similar dies;
- The finite element method was used to compute how much time the resistances were connected to the power supply, which allowed the energy consumption of the system to be determined.

Thus, the following conclusions can be drawn:

- The temperature profile with the new heating system remained identical to that of the older heating system;
- The power consumption decreased 57% using the embedded cylindrical heaters compared with that of the initial system, where the resistances were located in existing holes in the die;
- The warm-up time was reduced up to 50%, improving the set-up time and increasing the production time;
- Temperature control was more refined due to the increased number of temperature probes, which allowed better refinements if necessary.

Moreover, this new heating system was tested during manufacturing and maintained high-quality standards without manufacturing problems. Thus, this system is highly suggested to increase productivity, maintain a high quality of the pultruded products and to reduce the set-up and warm-up times as well as reduce the energy consumption. However, further work must be conducted to optimise the resistance position.

Acknowledgements

The authors would like thank QREN – Quadro de Referência Estratégico Nacional for their financial support and ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto for allowing us to use their facilities and equipment. Last, but not least, the authors would like to thank ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda. for all the experimental work performed on their pultrusion machine. Without their help, this research could not have been finished.

References

- [1] Sarrionandia M, Mondrago I, Moschiar SM, Reboredo MM, Vazquez A. Heat transfer for pultrusion of a modified acrylic/glass reinforced composite. *Polym Compos* February 2002;23(1):21–7.
- [2] Moschiar SM, Reboredo MM, Larrondo H, Vazquez A. Pultrusion of epoxy matrix composites: pulling force model and thermal stress analysis. *Polym Compos* December 1996;17(6):850–7.
- [3] Joshi Sunil C, Lam YC, Kyaw Zaw. Optimization for quality thermosetting composites pultrusion through die heater layout and power control. In: ICCM 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto-Japan; 08–13 July 2007. p. 1–7.
- [4] Lam YC, Jianhua LI, Joshi Sunil C. Simultaneous optimization of die-heating and pull-speed in pultrusion of thermosetting composites. *Polym Compos* 2003;24(1):199–209. February.
- [5] Safonov AA, Suvorova YuV. Optimization of the pultrusion process for a rod with a large diameter. *J Mach Manuf Reliab* 2009;38(6):572–8.
- [6] Zhu J, Chandrashekhara K, Flanigan V, Kapila S. Manufacturing and mechanical properties of soy-based composites using pultrusion. *Composites: Part A* 2004;35:95–101.
- [7] Moschiar SM, Reboredo MM, Kenny JM, Vazquez A. Analysis of pultrusion processing of composites of unsaturated polyester resin with glass fibres. *Polym Compos* June 1996;17(3):478–85.
- [8] Hodgkin J. Thermosets: Epoxies and Polyesters. *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*. Last update: January 2011. p. 9215–21.
- [9] Joshi Sunil C, Lam YC. Integrated approach for modelling cure and crystallization kinetics of different polymers in 3D pultrusion simulation. *J Mater Process Technol* January 2006;174:178–82.
- [10] Viola G, Portwood T, Ubrich P, DeGroot HR. Numerical optimization of pultrusion line operating parameters. In: 35th International SAMPE Symposium. Anaheim, CA, USA; 2 April 1990. p. 1968–75.
- [11] Sumerak JE. Pultrusion Die Design Optimization Opportunities Using Thermal Finite Element Analysis Techniques. In: 49th Annual conference composite institute. The Society of the Plastics Industry; February 1994. Session 9-C. p. 1–7.
- [12] Liu X-L. Numerical modelling on pultrusion of composite I beam. *Compos Part A: Appl Sci Manuf* 2001;32(5):663–81. 1 May.
- [13] Santiago D, Lombera G, Urquiza S, Moschiar SM. Modelado numérico del proceso de pultrusión en materiales compuestos. *Mater Res* 2003;6(4):583–9.
- [14] Mackerle J. Finite elements analyses and simulation of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985–2003). *Comput Mater Sci* November 2004;31:187–219.
- [15] Bathe KJ. *Finite Element Procedures*, vol. 148–335. Prentice-Hall International; 2007. p. 642–659.