

Novos fios híbridos para compósitos

João Filipe Pires Mata

Dissertação de Mestrado

Supervisor na FEUP: Prof. António Torres Marques

Orientador no INEGI: Eng.^a Carla Gomes



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Agosto, 2021

Resumo

A conceção de compósitos termoplásticos incorre em problemas de impregnação e adesão das fibras, resultantes da elevada viscosidade apresentada pelos termoplásticos. A solução mais relevante empregue na indústria baseia-se na homogeneização dos elementos dos fios híbridos. Assim sendo, o processo denominado “commingling” surge como um método de excelência para a obtenção de uma distribuição uniforme das fibras e filamentos. No entanto, o princípio de funcionamento deste método (aplicação de um jato de ar pressurizado) promove dano nas fibras e até mesmo sua rotura, pelo que necessita de ser corrigido ou mitigado.

Atendendo aos obstáculos relativos ao uso da técnica de “commingling”, a presente dissertação aborda os conceitos essenciais acerca dos materiais de reforço e termoplástico, os processos de conceção de fios existentes e suas estruturas, bem como o pós-processamento dos fios híbridos. Após a descrição dos fios híbridos, o trabalho foca-se no processo de “commingling” e análise dos parâmetros mais influentes na qualidade e homogeneidade dos fios “commingled” e compósitos, sendo seguida da análise das zonas de possível intervenção no processo. Como a estrutura do equipamento de “commingling”, presente no INEGI, revelou ser a zona menos desenvolvida e a necessitar de intervenção, o projeto passou pela elaboração de novas estações de alimentação, dispersão e pré-mistura das fibras e filamentos. Esta deveu-se ao facto da realização de um espalhamento inicial e mistura dos materiais possibilitar a diminuição das pressões aplicadas no jato, e, por conseguinte, originar um fio híbrido com propriedades e homogeneidade superior.

Em suma, no decurso do presente trabalho foi verificado que os principais parâmetros processuais da técnica de “commingling” correspondiam à pressão, velocidade de produção e sobrealimentação, cujo aumento da pressão é acompanhado por um maior grau de entrelaçamento, mas leva a uma subida do dano filamentar e em que velocidades de fabrico reduzidas promovem a homogeneidade do fio. Não menos relevante, o uso de uma sobrealimentação do reforço e termoplástico permite que os fios não estejam tensionados e uma mistura superior seja obtida. Por outro lado, as características de maior relevo dos materiais resumem-se à forma e dimensão das fibras e filamentos que deverão ter uma secção oval e diâmetros reduzidos, respetivamente. Além disso, os diâmetros dos elementos dos fios de reforço e termoplástico deverão ser semelhantes. Também foi constatado que o melhor bocal de ar atualmente em uso consiste num elemento pequeno onde o canal de entrada dos fios apresenta uma secção circular por onde o jato de ar, introduzido por 2 canais de ar, permite a abertura e mistura dos mesmos. No caso da estrutura, as secções de alimentação, guiamento, espalhamento e pré-mistura desenvolvidas proporcionam menor dano nos materiais e uma distribuição uniforme das fibras e filamentos.

New hybrid yarns for composites

Abstract

The conception of thermoplastic composites runs into problems of impregnation and adhesion, due to the high viscosity that thermoplastic presents. The most relevant solution employed in the industry is based on the homogenization of the elements of hybrid yarns. Therefore, the process known as commingling comes as an excellent method of obtaining a uniform distribution of the fibers and filaments. However, the functioning principal of this method (application of a pressurized jet air) results in the damage of the fibers and even their rupture, which necessitates to be corrected or mitigated.

According to the obstacles relative to the use of the commingling technique, the present dissertation addresses the essential concepts that involves the reinforcement and thermoplastic materials, the existing manufacturing processes of yarns and respective structures, as well as the post processing of hybrid yarns. After the description of the hybrid yarns, the present work focuses on the commingling process and analysis of the most influent parameters of the quality and homogenization of the commingled yarns and composites, followed by the analysis of zones of possible intervention in the process. Since the structure of equipment of commingling, by reference the one present at INEGI, reveled to be the zone least developed and requiring more intervention, the project addresses the elaboration of new stations of feed, dispersion and pre-mixture of the fibers and filaments. This is due to the fact that the implementation of an early spread and mixture of the materials enables the reduction of the pressures used in the jet, and consequently originates a hybrid yarn with superior properties and homogeneity.

In sum, during the present work it was verified that the main process parameters of the commingling technique consist of the pressure, production speed and overfeed, in which an increase of pressure is followed by a higher degree of intermingling, but has a higher filament damage and, in which a lower value of production speed promotes a higher homogenization of the hybrid yarn. Not less relevant, the use of overfeed of the reinforcement and thermoplastic allows the lowering of tension of the yarns and an increase of mixture. On the other hand, the characteristics of larger impact of the materials are mainly the shape and dimension of the fibers and filaments that should be oval and present a reduce diameter, respectively. Also, the diameters of the elements of the reinforcement and thermoplastic yarns should be similar. It was also verified that the best air nozzle currently in use, consists of a small element where the channel of entry of yarns should have a circular shaped where the air jet, introduced by two perpendicular air channels, enables the opening and mixture of the origin yarns. Relative to the structure, the developed sections of feed, guidance, spread and pre-mixture provide less filament damage and uniform distribution of fibers and filaments.

Agradecimentos

No decurso da dissertação “Novos fios híbridos para compósitos” foram diversos aqueles que contribuíram de múltiplas formas para o desenvolvimento e conclusão da mesma, pelo que merecem o meu maior reconhecimento e gratidão.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Carbo4Power - New generation of offshore turbine blades with intelligent architectures of hybrid, nano-enabled multi-materials via advanced manufacturing - financiado pelo Fundo Europeu através do programa HORIZON2020-EU.2.1.3. - INDUSTRIAL LEADERSHIP – Leadership in enabling and industrial technologies - Advanced materials, Framework Programme Grant Agreement no. 953192, pelo qual eu estou muito grato.

À Engenheira Carla Gomes, orientadora do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, agradeço a disponibilidade e compreensão tanto a nível das sessões de esclarecimento e acesso ao repositório de artigos técnicos já coletado, como também, pelas limitações existentes devido ao panorama pandémico português. Um bem-haja também, à presença e auxílio prestado pelo Engenheiro Carlos Carneiro, através dos seus conhecimentos técnicos e experiência profissional.

A maior gratidão ao Professor António Torres Marques, supervisor da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, novamente pelos estudos científicos e palestras técnicas disponibilizadas e consciência das dificuldades que a pandemia teve, sobretudo no que diz respeito à não realização da etapa experimental.

Por fim gostava de agradecer os meus familiares, com especial destaque à minha irmã e aos meus pais pelo apoio anímico que me deram ao longo do projeto em causa.

Índice

1	Introdução	2
1.1	Contextualização	2
1.2	Projeto e objetivos.....	3
1.3	Metodologia do projeto.....	4
1.4	Estrutura da dissertação	4
2	Estado de arte.....	6
2.1	Fios híbridos.....	8
2.2	Materiais.....	9
2.2.1	Reforços	9
2.2.2	Matrizes Termoplásticas	14
2.2.3	Combinações existentes	16
2.3	Processos e estrutura	20
2.3.1	“Ring spinning”	21
2.3.2	“Rotor spinning”	22
2.3.3	“DREF spinning”	23
2.3.4	“Wrap spinning”	23
2.3.5	“Air-jet texturing”	24
2.3.6	“Commingling”	25
2.3.7	“Parallel winding”	26
2.3.8	“Stretch breaking”	26
2.3.9	“KEMAFIL technology”	26
2.3.10	“Schappe technology”	27
2.4	“Commingling”	29
2.4.1	Princípio de funcionamento	29
2.4.2	Parâmetros de “commingling”	33
2.4.3	Avaliação da qualidade do fio híbrido	44
2.5	Pós-Processamento.....	47
2.5.1	Moldação por compressão.....	47
2.5.2	Moldação em autoclave.....	48
2.5.3	Enrolamento filamentar.....	49
2.5.4	Pultrusão.....	50
2.5.5	“Bladder inflation moulding”	50
2.5.6	Processamento integrado.....	51
2.5.7	Colocação automática de fibra com matriz termoplástica	52
3	Desenvolvimento do processo produtivo.....	54
3.1	Análise do equipamento “commingling”	54
3.2	Otimização do processo produtivo.....	56
3.2.1	Estação de alimentação	56
3.2.2	Estação de guiamento.....	56
3.2.3	Estação de espalhamento e pré-mistura	57
3.3	Evolução do projeto	60
3.4	Projeto de detalhe.....	69
4	Plano de experiências.....	82
5	Conclusão.....	86
6	Trabalhos Futuros	88

Referências	90
Anexo A – Rolamento W 6201	96
Anexo B – Rolo de carga em aço	98
Anexo C – Porca de extensão M12-36	100
Anexo D – Desenhos técnicos e de montagem.....	102

Índice de Figuras

Figura 1 - Volume do mercado europeu de compósitos em 2016 (Effing 2018).....	7
Figura 2 - Distribuição do destino final dos compósitos (David Rig 2001).....	7
Figura 3 - Disposição e agrupamento de fibras curtas e contínuas em redes de fibras curtas (a) e rede fibras longas (b) (Rok et al. 2017).....	10
Figura 4 - Representação esquemática de tecidos de reforço (Rok et al. 2017).....	10
Figura 5 - Comportamento viscoelástico de termoplásticos em relação ao termoendurecível EP (Cherif 2016).....	15
Figura 6 - Diferentes tipos de estruturas que os fios híbridos podem apresentar em função do método de conceção (Gong 2011).....	21
Figura 7 - Representação esquemática do processo de "ring spinning" (a) e das peças responsáveis pela torção (b) (Jalal Uddin 2010)	22
Figura 8 - Sistema de "rotor spinning" (Gong 2011)	23
Figura 9 - Representação esquemática do método de "DREF spinning" (Gong 2011).....	23
Figura 10 - Ilustração de "Wrap spinning" (Gong 2011)	24
Figura 11 - Representação esquemática do funcionamento de "air-jet texturing" (Gong 2011).....	25
Figura 12 - Representação esquemática do método de "commingling" (Gong 2011)	25
Figura 13 - Ilustração da técnica de "stretch breaking" (Gong 2011)	26
Figura 14 - Processo de "KEMAFIL technology" (Gong 2011).....	27
Figura 15 - Ilustração do método de Twintex® (Gong 2011).....	29
Figura 16 - Sistema convencional de “commingling” e respetivos elementos constituintes (Cherif 2016)	30
Figura 17 - Variação da resistência relativa (a) e contagem de fibras de carbono (b) de acordo com a pressão e bocal selecionado (Choi, Diestel, and Offermann 1999)	31
Figura 18 - Qualidade da consolidação de fios desentrelaçados e “commingled” quando sujeitos a 380 °C e 400°C (Ye et al. 1995)	32
Figura 19 - Representação esquemática (esquerda) e equipamento (direita) de "online commingling" de vidro e PP. A ampliação demonstra o mistura das fibras de vidro com as de PP (filamentos que se deslocam da direita para a esquerda) (Mäder, Rausch, and Schmidt 2008)	32
Figura 20 - Representação esquemática da estrutura interna e externa do fio (Cherif 2016)	33
Figura 21 - Diferentes géneros de nós formados durante o processo de "commingling" (Alagirusamy and Ogale 2005).....	38
Figura 22 - Secções de corte dos diferentes tipos de nós de fios "commingled" de vidro (fibras negras) e PP (filamentos brancos) (Alagirusamy and Ogale 2005)	39
Figura 23 - Exemplos de possíveis geometrias de bocais de ar, em particular: circular (a), quadrada (b) e triangular (c)	41
Figura 24 - Geometria de diferentes bocais de ar de "commingling" estudados (H.R. Mankodi 2016)	41

Figura 25 - Ilustração do processo de termoconformação	48
Figura 26 - Representação esquemática da prensagem por cones duplos (V and Kandasubramanian 2020)	48
Figura 27 - Sistema de moldação por autoclave (V and Kandasubramanian 2020)	49
Figura 28 - Esquema do processo de enrolamento filamentar (V and Kandasubramanian 2020)	50
Figura 29 - Ilustração da técnica de pultrusão da direita para a esquerda (Angelov et al. 2007)	50
Figura 30 - Representação esquemática de "Bladder inflation moulding" através de "braids" tubulares de fios commingled (Bernet et al. 2001)	51
Figura 31 - Ilustração da técnica de processamento integrado com colocação robótica do fio e injeção do polímero (Bernet et al. 2001)	52
Figura 32 - Representação esquemática da técnica de "Thermoplastic Automated Fiber Placement"(Denkena, Schmidt, and Kaczemirzk 2021)	52
Figura 33 - Representação esquemática da estrutura de “commingling” original, que engloba os suportes do rolo do fio (1), conjuntos de cilindros (2 e 5), guias de suporte (3), câmara de mistura (4) e enrolador (6)	55
Figura 34 - Máquina de “commingling” existente, onde 1 corresponde aos suportes do rolo do fio, 2 e 5 ao conjunto de cilindros, 3 ao suporte de guiamientos, 4 à câmara de mistura e 6 ao enrolador	55
Figura 35 - Representação esquemática do guiamento (a) e do pré-espalhamento realizado por este elemento (b) (Naeem, Yu, and Zheng 2015)	57
Figura 36 - Exemplificação de diferentes métodos de espalhamento, como o uso de barras de espalhamento (a), aplicação de um jato de ar (b) e uso de ultrassons (c) (Ginger Gardiner 2018)	57
Figura 37 - Representação esquemática do cilindro de espalhamento com micro ranhuras (a) e espalhamento do fio multifilamentar (b) (Naeem, Yu, and Zheng 2015)	58
Figura 38 - Ilustração do rolo elíptico de espalhamento com micro ranhuras (a) e espalhamento do fio multifilamentar (b) (Naeem et al. 2018)	58
Figura 39 - Representação esquemática do posicionamento dos rolos de espalhamento no processo de "ring spinning" (Iftay Khairul Alam 2020)	59
Figura 40 - Ilustração de um “godet” tradicional (a), “godet” aquecido (b), “godet” duplo (c) e “godet” aquecido com rolo de transferência (d) (Castiglioni 2008)	60
Figura 41 - Câmara de temperatura controlada com “godet” duplo (Castiglioni 2008) ...	60
Figura 42 - 1ª versão desenvolvida na perspectiva isométrica	62
Figura 43 - Conjunto de fixação do rolo do fio da 1ª versão	63
Figura 44 - Vista de corte do conjunto de alimentação da 1ª versão, formado por: fixação do conjunto do rolo do fio (1), elemento de fixação e acoplamento do rolamento (2), elemento de fixação e apoio do rolo do fio (3), apoios do rolo (4 e 6), rolo do fio (5), rolamento (7) e anilha customizada (8)	63
Figura 45 - Perspectiva isométrica da secção de guiamento da 1ª versão (a) e do guiamento (b), onde a peça 1 corresponde ao guiamento e a 2 à fixação dos guiamientos	64

Figura 46 - Vista isométrica da 2ª versão	65
Figura 47 - Conjunto do rolo do fio da 2ª versão	66
Figura 48 - Vista de corte do conjunto de alimentação da 2ª versão constituído por: fixação do conjunto do rolo do fio (1), elemento de fixação e acoplamento do rolamento (2), elemento de fixação e apoio do rolo do fio (3), rolo do fio (4), elemento de fixação e apoio do rolo do fio oposto (5), porca ISO - 4032 - M12 - W - C (6), varão M12 x 340 (7), parafusos ISO 4017 - M6 x 20-C (8), rolamento W 6201 (9), anilha customizada (10), parafuso ISO 4014 - M6 x 30 x 18-C (11) e peça soldada (12).....	66
Figura 49 - Rolo de espalhamento elíptico da 2ª versão	67
Figura 50 - Rolo de espalhamento elíptico correspondente à 2ª versão	67
Figura 51 – Conjunto do rolo de mistura da 2ª versão	68
Figura 52 - Solução desenvolvida na perspetiva isométrica	69
Figura 53 – Montagem do esquadro (1), fêmeas de inserção rápida (2) e parafusos ISO 4762 M6 x 12 - 12N (3) da solução adotada	70
Figura 54 - Conjunto do suporte do rolo do fio da versão final	71
Figura 55 – Vista de corte do conjunto do rolo do fio da 3ª versão composto por: fixação do conjunto do rolo do fio (1), elemento de fixação e acoplamento do rolamento (2), elemento de fixação e apoio do rolo do fio (3), porcas ISO - 4032 - M12 - W - C (4, 5 e 8), rolo do fio (6), elemento de fixação e apoio do rolo do fio oposto (7), varão M12 x 340 (9), parafusos ISO 4017 - M6 x 20-C (10), parafuso ISO 4014 - M6 x 30 x 18-C (11), rolamento W 6201 (12), anilha customizada (13) e parafuso ISO 4014 - M8 x 40 x 22-C (14)	71
Figura 56 - Conjunto de guiamento da solução desenvolvida, onde 1 indica os parafusos ISO 4017 - M6 x 12-C, 2 a fixação dos guiamentos e 3 os guiamentos.....	72
Figura 57 - Conjunto de espalhamento e mistura da 3ª versão	73
Figura 58 - Vista de corte do conjunto de espalhamento e mistura da solução adotada, sendo os parafusos ISO 4017 - M6 x 20-C indicados pelo número 1, fixação do rolo de carga pelo número 2, porca de extensão M12-36 pelo número 3 e o rolo de carga em aço da “Kaiser+Kraft” pelo número 4	73
Figura 59 - Tensões no conjunto do rolo do fio	77
Figura 60 – Deslocamentos no conjunto do rolo do fio	77
Figura 61 – Tensões na fixação do conjunto do rolo do fio	78
Figura 62 - Tensões nas componentes de guiamento	79
Figura 63 - Deslocamentos nos elementos de guiamento	79
Figura 64 - Tensões na unidade de espalhamento e mistura	80
Figura 65 - Deslocamentos na unidade de espalhamento e mistura.....	80

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais áreas industriais e respetivos exemplos de aplicações onde existe o uso prevalente de fios híbridos (Gong 2011)	8
Tabela 2 - Processos de conceção e estrutura global de fibras de reforço de desempenho elevado (Cherif 2016).....	11
Tabela 3 - Resistência à tração axial específica e módulo de Young específico das fibras de vidro, aramida, carbono e aço (Cherif 2016)	11
Tabela 4 - Caraterísticas específicas das fibras de vidro (Cherif 2016; Alfredo Balacó de Morais, António Gonçalves de Magalhães, and Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de Moura 2009).....	12
Tabela 5 - Caraterísticas específicas das fibras de aramida (Cherif 2016)	12
Tabela 6 - Propriedades específicas das fibras de carbono (Cherif 2016)	13
Tabela 7 - Propriedades gerais dos filamentos termoplásticos (Cherif 2016).....	15
Tabela 8 - Principais caraterísticas dos compósitos de fios híbridos de fibra de vidro e PET quando fornecidos sob a forma de tecido (1ª amostra) ou malha (2ª amostra) (Wakeman et al. 1995).....	17
Tabela 9 - Propriedades gerais de compósitos de fibra de carbono reciclado e PP para uma fração mássica de 30:70 (1ª espécie) e 50:50 (2ª espécie) (Akonda, Lawrence, and Weager 2012).....	18
Tabela 10 - Resumo dos principais dados de compósitos obtidos a partir de fios híbridos (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).....	19
Tabela 11 - Propriedades principais de compósitos de fibra de banana com PP para diferentes tratamentos químicos (Anil et al. 2016).....	20
Tabela 12 - Diferentes métodos de fabrico de fios híbridos, seu tipo e estrutura (Gong 2011)	21
Tabela 13 - Resumo das principais vantagens e desvantagens dos diferentes processos de conceção de fios híbridos e estruturas correspondentes	27
Tabela 14 - Propriedades inerentes à estrutura interna do fio e seu relevo (Cherif 2016)	33
Tabela 15 - Propriedades inerentes à estrutura externa do fio e seu relevo (Cherif 2016)	34
Tabela 16 - Síntese dos parâmetros relativos às propriedades dos materiais, parâmetros processuais e geometria do bocal, e sua influência	42
Tabela 17 - Vantagens e desvantagens de diferentes métodos de pós-processamento	53
Tabela 18 - Listagem de componentes	73
Tabela 19 - Propriedades gerais dos materiais aplicados no estudo integral dos diferentes conjuntos.....	76
Tabela 20 - Tensões e deformações máximas nos diferentes elementos do conjunto de alimentação	78
Tabela 21 - Tensões e deformações máximas nos diferentes elementos do conjunto de guiamento	79
Tabela 22 - Tensões e deformações máximas nos diferentes elementos do conjunto de espalhamento e pré-mistura	80

Tabela 23 - Plano de testes proposto na máquina antes e após otimização do processo de “commingling”	83
Tabela 24 - Plano de testes reduzido proposto na máquina antes e após otimização.....	84

Lista de Símbolos

- T_g - Temperatura de transição vítrea - °C
 R_d - Índice de distribuição radial
 R_c - Distância média dos filamentos de reforço do centro da secção de corte
 R_p - Distância média dos filamentos de termoplástico do centro da secção de corte
 R_a - Distância de todos os filamentos do centro
 $X_c(i)$ - Coordenadas centrais (i) das fibras
 $Y_c(i)$ - Coordenadas centrais (i) da matriz
 C_x - Coordenadas centrais de todos os filamentos na direção x
 C_y - Coordenadas centrais de todos os filamentos na direção y
 N_c - Número de fibras de reforço
 N_p - Número de filamentos de termoplástico
 L_t - Índice de distribuição lateral
 C_{xc} - Coordenadas centrais de todas as fibras do reforço na direção x
 C_{yc} - Coordenadas centrais de todas as fibras do reforço na direção y
 E_c - Valor do módulo de Young do laminado - GPa
 E_f - Módulo da fibra - GPa
 E_m - Módulo da matriz - GPa
 V_f - Fração volúmica do reforço - %
 V_m - Fração volúmica do termoplástico - %
 $\rho_{\text{reforço}}$ - Massa específica do fio do reforço - g/cm³
 $\rho_{\text{termoplástico}}$ - Massa específica do fio do termoplástico - g/cm³
 $\rho_{\text{híbrido}}$ - Massa específica do fio do híbrido - g/cm³
 T_f - Temperatura de fusão - °C

Lista de Abreviaturas

- CF - Fibra de carbono
- CFRP (TS/TP) - Compósitos termoplásticos constituídos por fibras de carbono
- D_{com} – Percentagem de “commingling”
- DOE - “Design of experiments”
- EP - Epóxico
- GF - Fibra de vidro
- GFRP (TP) - Compósitos termoplásticos reforçados por fibras de vidro curtas
- GFRP (TP/LFT) - Compósitos termoplásticos reforçados por fibras de vidro contínuas
- GFRP (TS) - Compósitos termoendurecíveis reforçados por fibras de vidro
- GFRP (TS/NCF) - Compósitos de resinas termoendurecíveis reforçados por tecidos “non-crimped”
- HST - Fibras de carbono com resistência e módulo elevados
- HT - Fibras de carbono com resistência à tração elevada
- ILSS - Resistência ao corte interlaminar
- IM - Fibras de carbono de módulo intermédio
- KMnO₄ - Permanganato de potássio
- MAPP - Metilacetileno-propadieno propano
- NaOH - Hidróxido de sódio
- PA - Poliamida ou “NYLON”
- PAN - Poliacrilonitrila
- PEEK - Poliéter-étercetona
- PEI - Polietilenoimina
- PES - Polietersulfona
- PET - Politereftalato de etileno
- PP - Polipropileno
- PPS - Polisulfureto de fenileno
- PSU - Polisulfona
- TAFP - Colocação automática de fibra com matriz termoplástica
- VTMO - “Vinyltrimethoxysilane”

1 Introdução

As vantagens introduzidas pelos compósitos termoplásticos no que se refere ao uso de tecnologia de processamento eficiente e rápido, bem como elevadas propriedades mecânicas inerentes, têm levado à expansão do seu uso nos mais diversos setores industriais. A sua massa reduzida, longo tempo de serviço, rigidez específica elevada, estabilidade térmica, capacidade de adotar geometrias complexas e alto limite à fadiga são algumas das características notórias responsáveis pela sua adoção.

As qualidades apresentadas por estes compósitos devem-se não só ao género de fibra aplicada, como também à matriz polimérica selecionada. Tipicamente, a matriz pode ser subdividida em termoendurecível e termoplástica. Esta última oferece maior tenacidade e alongamento na rotura e menores requisitos de temperatura e pressão para a ocorrência da fusão termoplástica e impregnação das fibras pela matriz, que, por sua vez, implica uma diminuição do custo de energia e operação. Em acréscimo, a redução do ciclo de processamento com a inexistência de reação química e a possibilidade de reciclagem, são características atrativas dos termoplásticos. No entanto, o uso de termoplásticos introduz um enorme problema face aos termoendurecíveis: a elevada viscosidade dos termoplásticos, provocada pela grande extensão das moléculas que os compõem, dificulta o processo de impregnação das fibras. Esta impregnação incompleta leva a um aumento do conteúdo de vazios que afetam de forma negativa as propriedades mecânicas dos compósitos.

Como o aumento das pressões utilizadas durante o processamento ou uso de moldes mais pesados retiravam várias vantagens inerentes dos termoplásticos, deve-se optar por um aumento da homogeneidade das fibras de reforço e filamentos termoplásticos. A distribuição uniforme do reforço e matriz é obtida de várias formas, das quais se destaca a formação de fios híbridos através do processo inovador, designado por “commingling”. Deste modo, o presente trabalho tem como foco a análise e desenvolvimento do processo de “commingling”, bem como a otimização e criação de novas etapas na estrutura inicial do processo, sendo assim intitulado de “Novos fios híbridos para compósitos”.

De seguida será realizada a contextualização da tese em causa, problemas e metas visadas durante a sua realização. É de salientar, que a metodologia de desenvolvimento do projeto e estrutura da dissertação serão também abordadas.

1.1 Contextualização

Um grande obstáculo para a conceção de compósitos termoplásticos deriva da elevada viscosidade que os termoplásticos apresentam (entre 100 a 5000 Pa.s) em relação aos termoendurecíveis (normalmente <1 Pa.s). Esta dificulta o movimento da matriz, fundida durante o pós-processamento, que promove um mau molhamento das fibras, criando zonas secas e zonas com excesso de matriz. Assim, sucede-se uma impregnação incompleta com uma

grande quantidade de vazios, e, por conseguinte, gera-se um compósito com propriedades mecânicas reduzidas.

A solução mais adequada para a mitigação e possível eliminação deste entrave corresponde à homogeneização dos elementos constituintes dos fios híbridos. De todos os métodos existentes destaca-se o processo de “commingling”, que permite a criação de fios híbridos flexíveis e com uma distribuição uniforme das fibras de reforço e filamentos termoplásticos.

A técnica de “commingling” baseia-se na abertura e entrelaçamento de fios com recurso a um jato de ar pressurizado em regime turbulento. A aplicação do jato possibilita a dispersão das fibras e filamentos termoplásticos e sucessiva agregação e combinação do reforço e termoplástico num fio misturado e coeso, sendo apenas realizadas modificações na posição das fibras e filamentos sem qualquer alteração química ou física. No entanto, o uso deste sistema possui um conjunto de desvantagens significativas que devem ser analisadas e resolvidas, pelo que serão discutidas com detalhe no presente trabalho, razão pela qual a “UNIDADE DE MATERIAIS E ESTRUTURAS COMPÓSITAS” da empresa INEGI propôs a realização da dissertação “Novos fios híbridos para compósitos”.

1.2 Projeto e objetivos

Apesar do processo de “commingling” aparentar ser uma solução que assegura a homogeneidade dos fios híbridos e melhores propriedades mecânicas, denota-se um conjunto de desvantagens inerentes ao seu funcionamento. Assim sendo, o “commingling” apresenta 2 problemas de enorme relevo, nomeadamente:

- Os fios quando sujeitos a cargas mecânicas excessivas podem sofrer quebra de fibras ou movimento relativo entre as fibras (“fiber migration”) que resulta numa distribuição não homogênea e degradação das propriedades
- A pressão gerada pelo jato de ar danifica as fibras de reforço e pode mesmo culminar na rotura das mesmas, provocando uma diminuição das características mecânicas do fio híbrido gerado e por extensão do compósito termoplástico produzido a partir delas. Além disso, a disparidade dos valores de estiramento dos fios termoplásticos e fios de reforço, bem como a fragilidade das fibras ao corte e a tensões transversais acentuam o problema de possível dano das fibras.

Um estudo cuidadoso dos principais parâmetros influentes no processo em causa revelou que estes podem ser agregados em 4 grupos distintos, em concreto: as características dos fios dos materiais misturados, parâmetros processuais, geometria do bocal utilizado e estrutura do método de “commingling”. No que se refere às propriedades dos fios, o diâmetro, comprimento e forma da secção de corte das fibras e filamentos são alguns exemplos de fatores impactantes, bem como as próprias características mecânicas dos fios. O desempenho dos fios “commingled” depende dos vários parâmetros selecionados no equipamento de conceção do fio, que engloba a pressão do ar comprimido, velocidade de produção, temperatura e sobrealimentação. Por outro lado, a geometria do bocal resume-se à quantidade e dimensões dos canais de jato de ar, bem como a forma da secção e dimensão do canal por onde os fios são conduzidos. Por último, a estrutura do equipamento de “commingling” geralmente incorpora 3 secções principais, em particular: uma unidade de alimentação dos fios, uma secção onde o bocal de ar permite o entrelaçamento das fibras e filamentos e uma zona de enrolamento do fio final. As secções de alimentação e enrolamento possuem rolos que definem a velocidade e tensionamento dos fios.

De todos os parâmetros referidos, a estrutura da máquina destaca-se como sendo o fator que mais carece de investigação quanto ao desenvolvimento das etapas existentes e adoção de novas fases no processo de “commingling”. De modo a atenuar e resolver os problemas

inerentes à utilização do processo em causa, dano filamentar excessivo e fragilidade das fibras a tensões transversais, o presente projeto consistiu na criação da zona de colocação dos rolos de alimentação, estação de guiamento e no desenvolvimento de uma nova unidade responsável pela dispersão e pré-mistura das fibras e filamentos. Isto inclui o projeto dos sistemas de fixação dos rolos de alimentação e da pré-mistura, modelação dos sistemas de guiamento e construção da estrutura envolvente, entre outros elementos.

Posto isto, prevê-se assim uma redução da pressão empregue necessária para o entrelaçamento, diminuição da danificação dos fios e aumento da homogeneidade dos mesmos. Desta forma, garante-se a eficácia do sistema de “commingling”, melhoria da qualidade dos fios híbridos e da qualidade dos compósitos termoplásticos.

1.3 Metodologia do projeto

A dissertação teve início com a revisão bibliográfica acerca das características dos fios híbridos, que envolveu a investigação das características dos materiais que constituem os fios híbridos, estrutura, fatores impactantes e zonas apontadas de possível intervenção.

A conclusão de que a zona crítica correspondia à estrutura da máquina de “commingling”, levou à criação das secções de alimentação, guiamento e de uma nova unidade capaz de realizar uma dispersão e pré-mistura dos fios antes de serem conduzidas ao bocal de ar. Partiu-se de seguida para a modelação das diversas componentes que constituem o sistema e sua montagem com recurso ao programa denominado por “Solidworks®”. Este programa também foi utilizado na análise da integridade estrutural das secções desenvolvidas, bem como desenhos técnicos dos componentes a produzir e de montagem. No caso particular dos desenhos de construção, foi realizado o toleranciamento com recurso à sebenta “DESENHO DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA” da autoria de José António Almacinha e José Simões Morais, e ao livro “DESENHO TÉCNICO BÁSICO” também redigido por José Simões Morais (José Manuel de Simões Morais 2016; José António Almacinha and José Simões Morais 2017).

Por fim, retirando as devidas conclusões dos fatores impactantes, realizou-se através do programa “Design-expert 13®” um plano de testes a ser efetuado na continuação deste tema.

1.4 Estrutura da dissertação

Tendo em conta, os objetivos da dissertação “Novos fios híbridos para compósitos”, o trabalho desenvolvido foi agregado em vários capítulos.

Primeiramente é feita uma análise do “Estado de arte” onde são abordados os principais aspetos relevantes ao enquadramento e estudo dos fios híbridos, concretamente dos fios “commingled”. Assim sendo, este capítulo inicia-se com a descrição do interesse na conceção de compósitos termoplásticos e características dos diversos reforços e termoplásticos que dão origem aos fios “commingled”, assim como, combinações atualmente existentes no mercado e suas vantagens. Posteriormente, procedeu-se à descrição do funcionamento, estrutura obtida, vantagens e desvantagens dos inúmeros processos de conceção de fios híbridos. Depois abordou-se com maior detalhe o funcionamento do processo de “commingling” e seus parâmetros de maior impacto na qualidade e propriedades dos fios gerados, assim como, métodos e parâmetros de avaliação da qualidade do fio híbrido. O capítulo encerra com a exposição das técnicas e sistemas de pós-processamento responsáveis pela transformação dos fios “commingled” em compósitos termoplásticos, sendo referidos os seus princípios de operação, componentes, bem como benefícios e inconvenientes da sua aplicação.

Tendo em conta que a zona que requer maior intervenção corresponde ao equipamento de “commingling”, sucede-se o capítulo “Desenvolvimento do processo produtivo”, no qual se apresenta um estudo do equipamento disponível no INEGI, sendo apontado o funcionamento da máquina de “commingling”, secções que requerem modificação e que necessitam de ser projetadas. Segue-se uma averiguação das diferentes soluções cuja incorporação terá um impacto positivo no desempenho do processo, sendo justificada a adoção ou não das mesmas. Depois passou-se a uma descrição pormenorizada da evolução do projeto e modelação das componentes empregues, referindo-se o seu efeito, importância e requisitos do sistema. Mais tarde, no projeto de detalhe aborda-se a versão final das estações desenvolvidas e realiza-se um estudo da integridade da estrutura de modo a assegurar o seu bom funcionamento. Além disso, no projeto de detalhe são contabilizadas todas as peças necessárias para a construção da máquina, assim como apresentados os desenhos técnicos dos componentes não standardizadas que necessitam de ser produzidos e desenhos de montagem dos conjuntos.

Numa última fase, delineia-se um plano de testes a realizar, de modo a verificar o funcionamento da solução adotada, bem como otimização do sistema. Por fim, retiram-se as devidas conclusões do projeto desenvolvido no decurso da dissertação e possíveis trabalhos futuros caso haja continuidade do tema em causa.

2 Estado de arte

O desenvolvimento de componentes em tecido compósito tem vindo a acompanhar a crescente necessidade de soluções leves e flexíveis aplicáveis em diversas indústrias (como transporte, fabrico aditivo, desporto e outros). O processo de conceção dos compósitos de base termoplástica resulta da combinação e colocação de camadas de reforço e matriz de acordo com um rearranjo adequado, seguido da consolidação e solidificação da matriz no reforço, que, por sua vez, assegura a ligação dos diferentes componentes. Esta combinação permite, desta forma, obter produtos com elevada resistência à tração e módulo face aos materiais tradicionalmente usados. Além disso, os compósitos termoplásticos oferecem inúmeras vantagens que contribuem para o seu crescente interesse e utilização, nomeadamente (Chari et al. 2018; Cherif 2016; Gong 2011):

- Redução de custos devido a tempos de ciclos mais curtos
- Preço de aquisição dos termoplásticos reduzido
- Potencial para automatização do processo
- Melhor relação massa vs resistência quando comparado com produtos metálicos
- Capacidade de moldar em insertos
- Ótima resistência à corrosão, à fadiga e à fratura.

Contudo, para além das vantagens descritas, o uso de termoplásticos também apresenta algumas desvantagens (Jalal Uddin 2010), por exemplo:

- Problemas de adesão entre a fibra e a matriz
- Difícil impregnação e um aumento do número de vazios devido à elevada viscosidade da matriz, que se traduz numa redução das propriedades mecânicas do compósito
- Apresentam uma estabilidade dimensional e resistência à abrasão inferiores aos termoendurecíveis, gerando assim piores propriedades ao impacto e à flexão.

De acordo com dados referentes a 2016, o consumo global dos compósitos foi aproximadamente de 12 milhões de toneladas. Do volume total de material, somente 1% do mercado correspondia a compósitos obtidos com recurso a fibras de carbono, enquanto os 99% restantes correspondiam aos compósitos reforçados por fibras de vidro. No entanto, o crescimento em 2016 de compósitos com fibra de carbono foi cerca de duas vezes superior aos de fibra de vidro, crescendo a uma taxa anual de 10% e de 5 a 6%, respetivamente. No caso particular do mercado europeu (Figura 1), em 2016, constatou-se um consumo na ordem das 3 milhões de toneladas, dos quais 48% são compósitos termoplásticos reforçados por fibras de vidro curtas, 33% compósitos termoendurecíveis reforçados por fibras de vidro e 12% compósitos de resinas termoendurecíveis reforçadas por tecidos “non crimped”. Além disso, compósitos termoplásticos reforçados por fibras de vidro contínuas corresponderam a 6% do mercado e compósitos termoplásticos constituídos por fibras de carbono apenas 1%. Os compósitos termoplásticos representaram cerca de 55% do mercado europeu e apresentaram

um maior crescimento face aos restantes (Effing 2018). Posto isto, constata-se o aumento da importância dos compósitos termoplásticos no mercado dos reforços e termoplásticos. Não menos relevante, a predominância das fibras de vidro pode ser explicada pelas ótimas características que possui face ao seu custo (Chari et al. 2018).

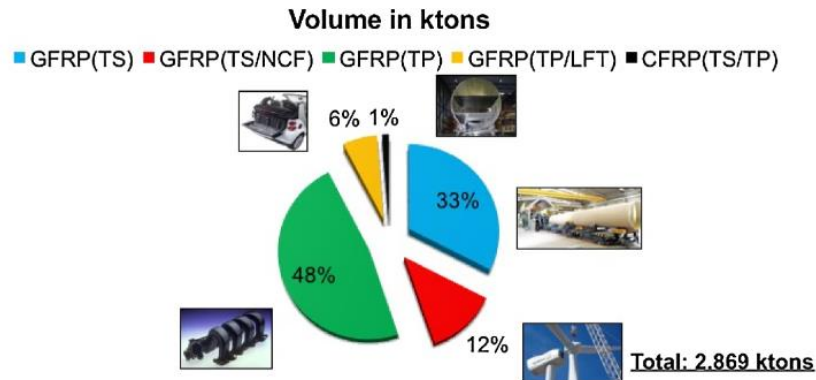


Figura 1 - Volume do mercado europeu de compósitos em 2016 (Effing 2018)

Apesar das fibras de vidro e carbono contabilizarem grande parte das fibras produzidas, é de salientar a existência das fibras de aramida ou KEVLAR® dada as suas excelentes propriedades mecânicas, como se verá adiante. Em acréscimo, também existe um crescente interesse em fibras naturais (juta, banana, entre outros) dada a consciencialização das alterações climáticas.

Por outro lado, a matriz termoplástica tipicamente aplicada pode incluir PP, PA, PEI, PEEK e PPS (Chari et al. 2018). Inicialmente, o uso de compósitos com os materiais mencionados, apenas ocorria no setor aeroespacial e militar, contudo os novos requisitos da indústria automóvel, transporte, desporto, construção e marítima têm impulsionado a sua utilização, como demonstrado pela Figura 2 (David Rig 2001).

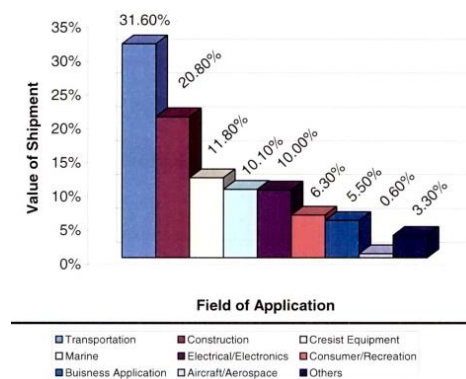


Figura 2 - Distribuição do destino final dos compósitos (David Rig 2001)

O baixo custo de aquisição, os ciclos de produção curtos e o potencial para produção limpa, rápida e automatizada dos termoplásticos, explicam a transição dos termoendurecíveis para as matrizes termoplásticas. Não menos relevante, os materiais termoplásticos apresentam uma maior tenacidade em relação aos termoendurecíveis. No entanto, dada a viscosidade elevada das matrizes termoplásticas (entre 100 a 5000 Pa.s) em relação aos termoendurecíveis (normalmente inferior a 1 Pa.s), na fase de processamento, a matriz fundida não consegue impregnar de forma adequada as fibras de reforço, pelo que gera uma fraca adesão das fibras. Assim sendo, requer-se uma mistura homogênea ao nível das fibras e filamentos termoplásticos, de modo a melhorar a qualidade da impregnação e consequentes propriedades. Posto isto, diferentes estudos surgiram para a obtenção de compósitos a partir de pré-

impregnados (fibra impregnada com a matriz termoplástica sob a forma de camada ou pó), pré-formas (tecidos e malhas) e fios híbridos (Chari et al. 2018; Cherif 2016; Gong 2011).

O uso de fios híbridos feitos a partir da mistura de fibras e filamentos de desempenho elevado tem vindo a ganhar relevo nos compósitos. Distribuição homogénea dos materiais, boa tolerância ao dano, controlo da disposição das fibras e custos de produção reduzidos são características inerentes à sua aplicação. Tendo em conta a importância que os fios híbridos têm vindo a revelar, estes serão de seguida aprofundados no presente trabalho, sendo abordado os tipos de reforços e termoplásticos existentes e aplicados, assim como, suas combinações, formas de conceção (com particular destaque para os fios obtidos por “commingling”) e pós-processamento. Tal deve-se ao facto da técnica de “commingling” possibilitar uma mistura homogénea das partes que constituem o fio híbrido e ser um dos principais focos da dissertação.

2.1 Fios híbridos

Os componentes em compósito produzidos com recurso a fios híbridos têm vindo a expandir o seu leque de aplicações englobando setores como a construção civil, industrial, transporte, têxtil, entre outros (Tabela 1). Esta expansão deve-se ao facto destes materiais terem sofrido um forte desenvolvimento com impacto positivo nas suas características, no que diz respeito à durabilidade, estabilidade dimensional, resistência à corrosão e propriedades mecânicas combinado com a redução de massa e custo (Gong 2011).

Tabela 1 - Principais áreas industriais e respetivos exemplos de aplicações onde existe o uso prevalente de fios híbridos (Gong 2011)

Setor	Aplicações
Aeronáutico	Painéis de acesso, portas, spoilers, superfícies móveis das asas e capotas do motor
Ferroviário	Plataformas, painéis de janelas, estruturas frontais, paredes, tetos e assentos
Automóvel	Painéis de interior, forros de tetos, chassis, portas e pisos de camiões.
Industrial e Infraestrutura	Elementos onde são colocados os caminhos de ferro, suportes de passadiços e chão industrial
Acabamentos Interiores e Exteriores	Perfis decorativos, persianas, mobília de escritório e painéis interiores
Construção Civil	Reforços de estruturas, armação de portas, de vidros e suas componentes, bem como revestimentos
Jardim	Vedações e postes de vedações, bancos de parques e equipamento de recreio
Vestuário	Vestuário desportivo, sensores têxteis e tecidos inteligentes
Não vestuário	Retardantes de chama, luvas protetoras e coberturas de assentos

O interesse em implementar os fios híbridos em aplicações estruturais de engenharia deve-se às propriedades inerentes da combinação dos filamentos de reforço e termoplástico, em particular: a sua resistência mecânica elevada, resistência a altas temperaturas, flexibilidade e massa reduzida (Gong 2011).

Os fios híbridos correspondem a um produto semi-acabado através do qual compósitos termoplásticos reforçados por fibras de reforço contínuas são produzidos. As fibras e filamentos são misturados e ligados com recurso a tecnologia têxtil adaptada para os materiais em causa (“ring spinning”, “commingling”, entre outros) formando fios híbridos. Posteriormente, estes fios podem ser processados a partir de técnicas, como enrolamento filamentar, pultrusão e moldação por compressão ou podem ser fabricados tecidos secos. Os compósitos criados têm a particularidade de poderem ser novamente processados, reparados e reciclados caso a rotura ocorra na cadeia polimérica. Além disso, a redução de massa deve-se à possibilidade de adaptação da orientação e fração volúmica das fibras de acordo com a direção do esforço/solicitação em causa (Gong 2011; Chari et al. 2018; Cherif 2016; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

As propriedades dos fios híbridos e compósitos derivados encontra-se intrinsecamente dependente das características dos materiais aplicados, método de produção, parâmetros processuais e pós-processamento, pelo que o conhecimento do impacto destes no comportamento do fio é essencial para assegurar o controlo da sua qualidade. (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

2.2 Materiais

Como foi anteriormente referido, neste estudo os fios híbridos são constituídos pela mistura de fibras de reforço e filamentos termoplásticos, cujas características têm impacto na sua qualidade, homogeneidade e desempenho. De seguida apresenta-se uma análise detalhada dos diferentes elementos que lhe dão origem e suas possíveis combinações. Adicionalmente também se apresentará o impacto do “sizing” na qualidade de adesão do reforço e termoplástico.

2.2.1 Reforços

Os requisitos de produtos semi-acabados têxteis de excelente qualidade, eficientes, leves e pouco dispendiosos têm levado ao desenvolvimento de reforços de igual valor. Além disso, a otimização dos diferentes métodos de produção de reforços e expansão da tecnologia verde tem vindo a sofrer uma gradual atenção de modo a diminuir custos, perdas de material e de energia.

As fibras contínuas consistem num conjunto de fios contínuos que quando combinados com fios termoplásticos também contínuos, dão origem a fios híbridos cujas propriedades são um compromisso entre as propriedades do reforço e da matriz. Os reforços são identificados pelo número de fibras presente no fio, por exemplo 3k, 6k e 12k, em que k corresponde a 1000 filamentos. Tal como ocorre nas fibras curtas, as fibras contínuas podem ser agregadas de modo a dar origem a redes de fibras (Figura 3). Em acréscimo, a interligação das fibras contínuas cria tecidos (Figura 4), que apresentam massa reduzida, baixa percentagem de vazios e capacidade de manter o alinhamento das fibras (Rok et al. 2017).

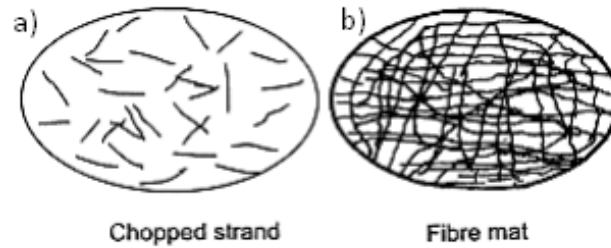


Figura 3 - Disposição e agrupamento de fibras curtas e contínuas em redes de fibras curtas (a) e rede fibras longas (b) (Rok et al. 2017)

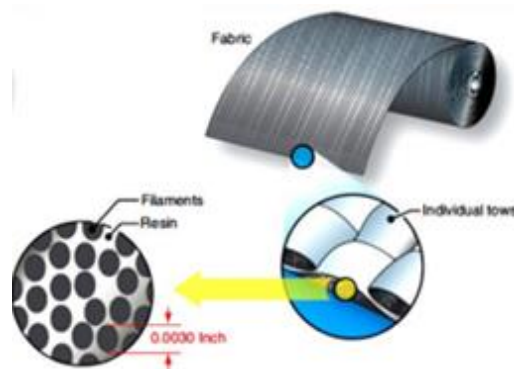


Figura 4 - Representação esquemática de tecidos de reforço (Rok et al. 2017)

As fibras de reforço conferem aos fios híbridos as principais propriedades estruturais, como resistência à tração, ao mesmo tempo que minimizam a massa dos mesmos (Cherif 2016). Deste modo, é essencial o conhecimento das propriedades dos reforços de forma a melhorar o seu desempenho e potenciar uma boa mistura com o termoplástico escolhido.

A estrutura molecular das fibras e consequentes parâmetros estruturais (orientação dos elementos de construção da fibra e ligação química), definidos durante a conceção do reforço, são responsáveis pela qualidade das fibras de reforço, sobretudo a excelente resistência à tração e módulo de Young. No caso específico do reforço de fibra de vidro, as ligações covalentes tridimensionais resultam numa resistência à tração das fibras independente da direção. Por outro lado, a cristalinidade (cerca de 100%) e as uniões 2D do carbono, bem como a orientação das macromoléculas que o constituem possibilitam um módulo de Young alto e resistência à tração elevada, mas propriedades à flexão reduzidas. No que diz respeito às fibras de aramida, estas são caracterizadas por ligações covalentes unidimensionais, o que explica a sua enorme capacidade de resistir a cargas segundo a direção das fibras e elevada tenacidade. As fibras naturais são caracterizadas por uma estrutura 1D com orientação e nível de cristalinidade reduzido. Na Tabela 2 podem-se observar as características estruturais e principais métodos implementados na conceção das fibras de reforço de elevado desempenho (Cherif 2016).

Tabela 2 - Processos de concepção e estrutura global de fibras de reforço de desempenho elevado (Cherif 2016)

Parameter	Glass	Carbon	Aramid
Raw materials	Quartz sand, additives	Precursor: PAN or pitch	Monomers: PPD and TDC, solvents
Process	Melt from mixture or pellets, melt spinning including sizing application GF filament	Stabilization Carbonization Graphitization Surface treatment CF filament	Polymerization Solving Extrusion Solvent spinning Stretching Avivage AR filament
Structure	Three-dimensional, isotropic Amorphous	Two-dimensional, layer-shaped, anisotropic Crystalline	One-dimensional, fiber-shaped/fibrillar, highly anisotropic Crystalline
Bonding	3d-covalent	2d-covalent van der Waals bond	1d-covalent van der Waals bond Hydrogen bonds
Crystallinity	None	~100 % (para-crystalline)	~100 % (para-crystalline)
Orientation	None	High	Very high

O potencial das fibras de vidro, aramida e carbono torna-se ainda mais evidente quando se analisam os parâmetros mecânicos face à densidade, como resistência à tração axial específica e módulo de Young específico em relação às fibras de aço, expressos na Tabela 3 (Cherif 2016). Atendendo ao valor intermédio dos intervalos, quanto à resistência à tração axial específica, as fibras de vidro possuem um ganho de 1248%, as fibras de aramida de 1674% e as fibras de carbono de 2248%. Relativamente ao módulo de Young específico, observa-se que as fibras de vidro, aramida e carbono apresentam um aumento de 21%, 88% e 1035%, respetivamente.

Tabela 3 - Resistência à tração axial específica e módulo de Young específico das fibras de vidro, aramida, carbono e aço (Cherif 2016)

Tipo de fibra	Resistência à tração axial específica (GPa cm ³ /g)	Módulo de Young específico (GPa cm ³ /g)
Vidro	1,1...2,0	27...36
Aramida	1,92...2,16	40...58
Carbono	1,5...3,9	110...480
Aço	0,03...0,2	26

Em jeito de conclusão, as principais fibras de reforço possuem uma resistência à tração axial específica e módulo de Young específico significativamente superior às fibras de aço, pelo que são cada vez mais empregues, destacando-se as fibras de carbono. No entanto, isto não invalida a superioridade do aço caso a massa não seja o requisito principal.

Fibra de vidro

A resistência química elevada, inexistência de condução elétrica e o custo reduzido comparativamente a outras fibras de reforço são características das fibras de vidro, que justificam a sua forte utilização em diversos sectores, nomeadamente em componentes estruturais secundárias da indústria de aeronáutica (CompositesWorld 2016; Rok et al. 2017).

As fibras de vidro podem ser repartidas em inúmeras classes de acordo com a matéria-prima e proporções utilizadas na sua concepção, das quais se destacam os tipos E, S e C (CompositesWorld 2016; Rok et al. 2017). Para componentes que exijam valores de resistência

elevados desenvolveu-se a fibra de vidro S, apresentando um com um módulo de Young de 96,5 GPa (14 Msi) e resistência à tração de 4826,3 MPa (700 Ksi). Desta forma, as fibras de vidro S são 40 a 70% mais fortes que as da classe E (fibra de vidro comum de baixo custo) (CompositesWorld 2016). Quanto às fibras de vidro C, estas consistem em fibras resistentes à corrosão e soluções ácidas comparativamente às restantes fibras de vidro (CompositesWorld 2016). Além das fibras de vidro mencionadas, também existem as fibras de vidro AR empregues como reforço de betão e as fibras de vidro R para aplicações que requerem elevadas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas (Cherif 2016). Algumas características das fibras de vidro do tipo E, S, R, AR e R/S encontram-se expressas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características específicas das fibras de vidro (Cherif 2016; Alfredo Balacó de Moraes, António Gonçalves de Magalhães, and Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de Moura 2009)

Parâmetro	Tipo E	Tipo S	Tipo R	AR	R/S
Diâmetro do filamento (μm)	3...25	-	-	3...25	3..15
Densidade (g/cm^3)	2,52...2,6	2,49	2,55	2,70	2,45...2,55
Tensão de rotura à tração (MPa)	3400...3700	4580	4400	3000	4300...4900
Módulo de Young axial (GPa)	72...77	85,5	86	73	75...88
Deformação na rotura (%)	3,3...4,8	5,3	5,2	4,3	4,2...5,4
Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5,0	2,9	4,0	-	-

Fibra de Aramida

As fibras de aramida ou KEVLAR®, segundo a DuPont, destacam-se pela sua massa reduzida em relação à sua tenacidade, resistência à tração e resistência ao impacto. A aramida, normalmente, possui uma resistência à tração de cerca de 3447,4 MPa (500 Ksi), alongamento de 3% (superior ao carbono, mas inferior ao vidro) e módulo na ordem dos 137,8 GPa (20 Msi). Contudo, este reforço apresenta sérias dificuldades no corte e furação, dificultando processos de acabamento nas peças produzidas. Além disso, o material possui uma resistência à compressão baixa, assim como, uma capacidade de absorção de água na ordem dos 8% do seu peso (higroscopia), constituindo um grande entrave na sua combinação com termoplásticos hidrofóbicos, como é o caso da PA (CompositesWorld 2016; Rok et al. 2017; Cherif 2016). Na Tabela 5 visualizam-se as características das fibras de aramida da classe N (Cherif 2016).

Tabela 5 - Características específicas das fibras de aramida (Cherif 2016)

Parameter	Para-aramid N-type
Filament diameter (μm)	12
Density (g/cm^3)	1.39 ... 1.44
Tensile strength, axial (MPa)	2,760 ... 3,000
Spec. tensile strength, axial ($\text{MPa cm}^3/\text{g}$)	1,920 ... 2,160
Young's modulus, axial (GPa)	58 ... 80
Spec. Young's modulus ($\text{GPa cm}^3/\text{g}$)	40 ... 58
Young's modulus, radial (GPa)	Not available
Elongation at break (%)	3.3 ... 4.4
Thermal expansion coefficient	
Axial ($10^{-6}/\text{K}$)	-2.0 ... -6.6
Radial ($10^{-6}/\text{K}$)	40
Melting temperature ($^{\circ}\text{C}$)	>500
Decomposition temperature ($^{\circ}\text{C}$)	~550
Permanent temperature range ($^{\circ}\text{C}$)	180
Moisture absorption under standard atmosphere (%)	~7.0

Fibra de Carbono

As fibras de carbono possuem uma rigidez 3 a 10 vezes superior às fibras de vidro e resistência à tração elevada (superior à aramida e vidro), pelo que são empregues em elementos estruturais, como é o caso da fuselagem, asas dos aviões e estabilizadores de aeronaves. Porém, manifestam condutividade inferior ao alumínio, sendo necessário aplicar uma camada protetora (normalmente fibra de vidro/epóxico) para peças propícias a relâmpagos. Além disso, possuem uma resistência ao impacto inferior ao reforço de aramida e vidro, bem como um custo superior às fibras de vidro (CompositesWorld 2016; Rok et al. 2017; Cherif 2016).

A conceção do reforço em questão, pode ser efetuada a partir de uma grande variedade de precursores, que englobam o “rayon”, “pitch” e PAN, assim como também, o precursor “lignin”. Em relação às fibras de origem “rayon”, estas possuem uma alta resistência a elevadas temperaturas, sendo aplicados como escudos de calor. Por outro lado, fibras de carbono baseadas em “pitch” apresentam um coeficiente de expansão axial térmica praticamente nulo e rigidez elevada, pelo que são utilizados em eletrodomésticos e vaivéns. Já no caso das fibras de carbono PAN, estas fornecem novamente uma rigidez alta e resistência elevada, que pode atingir os 6895 MPa ou 1000 Ksi (CompositesWorld 2016; Rok et al. 2017; Cherif 2016). Por último, novos precursores (como é caso do “lignin”) potenciam a redução do custo do reforço, podendo o uso destas fibras tornar-se ainda mais atrativo (Cherif 2016). Na Tabela 6 encontram-se expressas as características das fibras de carbono do tipo HT, HST, IM, HM, HMS e MPP-HM.

Tabela 6 - Propriedades específicas das fibras de carbono (Cherif 2016)

Parameter	HT ^a	HST ^a	IM ^a
Filament diameter (µm)	7 ... 8	5 ... 7	5 ... 7
Density (g/cm ³)	1.74 ... 1.80	1.78 ... 1.83	1.73 ... 1.80
Tensile strength, axial (MPa)	2,700 ... 3,750	3,900 ... 7,000	3,400 ... 5,900
Spec. tensile strength, axial (MPa cm ³ /g)	1,500 ... 2,160	2,140 ... 3,930	1,970 ... 3,410
Young's modulus, axial (GPa)	200 ... 250	230 ... 270	250 ... 400
Spec. Young's modulus (GPa cm ³ /g)	111.1 ... 144.0	126.0 ... 152.0	138.9 ... 231.2
Young's modulus, radial (GPa)	15	Not available	Not available
Elongation at break (%)	1.2 ... 1.6	1.7 ... 2.4	1.1 ... 1.93
Thermal expansion coefficient			
Axial (10 ⁻⁶ /K)	-0.1 ... -0.7	-1.0	-1.2
Radial (10 ⁻⁶ /K)	10	10	12
Melting temperature (°C)			
Decomposition temperature (°C)	3,650 ^a	3,650 ^a	3,650 ^a
Permanent temperature range (°C)	400 ... 500		500
Moisture absorption under standard atmosphere (%)	≤0.1	≤0.1	≤0.1
Parameter	HM ^a	HMS ^a	MPP-HM ^a
Filament diameter (µm)	4 ... 8	5 ... 7	Not available
Density (g/cm ³)	1.76 ... 1.96	1.85	2.15
Tensile strength, axial (MPa)	1,750 ... 3,200	3,600	3,500
Spec. tensile strength, axial (MPa cm ³ /g)	890 ... 1,820	1,950	1,630
Young's modulus, axial (GPa)	300 ... 500	550	900
Spec. Young's modulus (GPa cm ³ /g)	153 ... 284	297.30	481.60
Young's modulus, radial (GPa)	5.7	Not available	Not available
Elongation at break (%)	0.35 ... 1.0	0.65	0.4
Thermal expansion coefficient			
Axial (10 ⁻⁶ /K)	-0.1	-1.3	Not available
Radial (10 ⁻⁶ /K)	Up to 30	Up to 30	Not available
Melting temperature (°C)			
Decomposition temperature (°C)	3,650 ^a	3,650 ^a	3,650 ^a
Permanent temperature range (°C)	500 ... 600	500	600
Moisture absorption under standard atmosphere (%)	≤0.1	≤0.1	≤0.1

^aPAN-based

^aMPP-based

^aGeneral specification for CF

“Sizing” das fibras

De modo a assegurar a ligação entre as fibras de reforço e filamentos dos termoplásticos na interface, e, por conseguinte, melhorar as propriedades dos compósitos criados, as fibras requerem preparação da sua superfície com recurso a um agente de ligação ou de revestimento da superfície, designado por “sizing”. A aplicação de “sizing”, para além de oferecer uma melhor adesão do reforço e matriz, funciona como um lubrificante seco que o protege da rotura e abrasão durante o processo de criação do fio híbrido e do compósito termoplástico. É ainda de salientar, que o aumento da compatibilidade dos reforços com as matrizes termoplásticas pelo “sizing”, implica um aumento da homogeneidade da mistura (CompositesWorld 2016; Cherif 2016). Um exemplo é o “sizing” de base epóxidica tipicamente implementado nas fibras de carbono, permitindo melhorar o processo de conceção do fio híbrido e sua transformação em peças empregues na indústria automóvel e aeronáutica no pós-processamento (Cherif 2016). Apesar do “sizing” apenas corresponder entre 0,25 e 6% da massa total da fibra, este acabamento oferece melhorias nas suas características, podendo ser físicas, químicas e mecânicas, aplicado tanto nos fios híbridos como em compósitos, tendo em conta o método utilizado. Por vezes a diferença das propriedades da mesma fibra entre fornecedores deve-se à aplicação de um “sizing” distinto (CompositesWorld 2016; Cherif 2016).

2.2.2 Matrizes Termoplásticas

As matrizes resumem-se a polímeros cujas propriedades físicas, composição química e adesão entre a matriz e reforço, têm uma enorme influência na produção, no pós-processamento, e consequentemente nas propriedades finais que os fios híbridos compósitos podem apresentar (Rok et al. 2017).

Características como os custos reduzidos, baixo tempo de processamento e inexistência de cura química, explicam o uso de termoplásticos, sendo a sua viscosidade controlada pela temperatura. No entanto, a elevada viscosidade dos mesmos dificulta a sua mistura e homogeneidade, e, por conseguinte, reduz as propriedades dos produtos semi-acabados (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). As características dos filamentos termoplásticos encontram-se dependentes da percentagem de secções cristalinas e amorfas, pelo que o aumento de estruturas cristalinas resulta no aumento da resistência à tração, rigidez, módulo de Young, tenacidade e ponto de fusão, mas é acompanhado pela diminuição da resistência ao impacto (Cherif 2016). Os valores gerais das principais características inerentes aos termoplásticos mais aplicados encontram-se expressos na Tabela 7.

Relativamente à resistência à tração do PEEK, os filamentos de PEI, PPS, PP, PA 6,6 e PES apresentam um ganho de 246%, 381%, 411%, 535% e 594%, respetivamente. Quanto ao módulo, comparativamente ao PEEK os termoplásticos PA 6,6 e PP têm um decréscimo na ordem dos -46% e -28%, respetivamente, enquanto o PPS e PES revelam um aumento de 14% e 137%, respetivamente. Por outro lado, a análise do alongamento à rotura dos termoplásticos aponta que o PPS e PES possuem uma perda de -48% e -23%, respetivamente, ao passo que o PA 6,6, PP e PEI apresentam um ganho de 5%, 9% e 23% face ao valor do PPS, respetivamente.

Deste modo, conclui-se:

- Os filamentos de PES possuem a maior resistência à tração e módulo, enquanto o PEI apresenta o maior alongamento à rotura
- Os dados demonstram ainda a resistência à tração e alongamento excelentes da PA 6,6
- Não menos relevante, o PP apresenta características adequadas em relação ao seu preço (Cherif 2016), enquanto o PEEK demonstra um grande potencial para aplicações onde as componentes estejam sujeitas a temperaturas elevadas.

Tabela 7 - Propriedades gerais dos filamentos termoplásticos (Cherif 2016)

Parameter	PP	PA 6.6	PES	PPS
Density (g/cm ³)	0.91	1.14	1.39	1.24
Young's modulus (GPa)	0.5 ... 5.0	1.1 ... 3.0	3 ... 15	2.48 ... 6.2
Tensile strength (MPa)	210 ... 660	360 ... 720	350 ... 830	322 ... 496
Elongation at break (%)	15 ... 90	26 ... 75	30 ... 44	20 ... 30
Melting temperature (°C)	175	255 ... 260	250 ... 260	285
Softening range (°C)	150 ... 155	220 ... 235	230 ... 250	Not available
Permanent temperature range (°C)	Not available	75 ... 85	140 ... 160	190
Freezing temperature (°C)	-12 ... -20	45 ... 65	70 ... 80	Not available
Decomposition temperature (°C)	328 ... 410	310 ... 380	283 ... 306	Not available
Surface energy (10 ⁻³ J/m ²)	26	37	Not available	

Parameter	PEI	PEEK	PTFE
Density (g/cm ³)	1.28	1.3	2.1 ... 2.3
Young's modulus (GPa)	Not available	3.8	Not available
Tensile strength (MPa)	243 ... 346	80 ... 90	176 ... 308
Elongation at break (%)	38 ... 80	16 ... 80	19
Melting temperature (°C)	225	355	Not available
Softening range (°C)	Not available	Not available	327
Permanent temperature range (°C)	170	220 ... 260	280
Freezing temperature (°C)	Not available	144	Not available
Decomposition temperature (°C)	Not available	Not available	Not available
Surface energy (10 ⁻³ J/m ²)	Not available	Not available	22

Tendo em conta a necessidade de uma boa adesão durante o processamento dos fios híbridos, uma característica fundamental dos termoplásticos consiste na gama de variação da viscosidade em função do aquecimento aplicado (Figura 5), que revela a capacidade de preenchimento dos espaços vazios entre fibras pela matriz. No que diz respeito a este parâmetro, dentro dos termoplásticos presentes na Figura 5 a matriz PP surge como o termoplástico cuja viscosidade mais se aproxima dos valores do EP, termoendurecível comum, apesar desta ainda apresentar valores relativamente elevados (Cherif 2016).

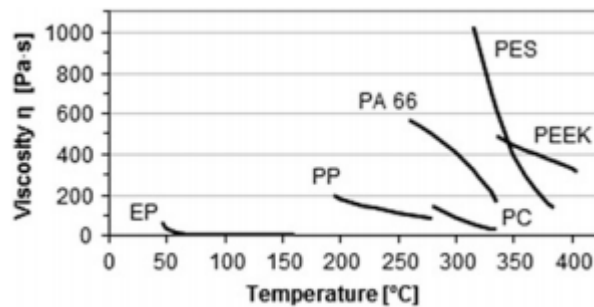


Figura 5 - Comportamento viscoelástico de termoplásticos em relação ao termoendurecível EP (Cherif 2016)

Assim sendo, é fundamental a análise da energia superficial e das propriedades inerentes a cada material, assim como do intervalo de viscosidade de modo a escolher o termoplástico mais adequado para cada reforço e sua aplicação.

Polipropileno

O PP apresenta uma excelente vantagem em relação às propriedades mecânicas face ao custo, sendo a totalidade do seu fabrico responsável por cerca de 25% da produção de filamentos sintéticos na Europa. Além disso, corresponde ao termoplástico com os menores valores de viscosidade durante a fusão, pelo que permite, em teoria, uma qualidade de impregnação superior (Cherif 2016).

Poliamida

As PA consistem em termoplásticos tradicionalmente empregues em motores quentes, placas de circuito e estrutura de aviões, destacando-se pela sua resistência a temperaturas elevadas e coeficiente de expansão térmica baixo, sendo por isso excelentes em ambientes sujeitos a temperaturas altas. Porém, as PA são hidrofóbicas, pelo que as suas propriedades degradam com a presença de água ou uma percentagem significativa de humidade (Rok et al. 2017; Cherif 2016).

A PA distingue-se pela sua tenacidade, resistência à tração e abrasão, estabilidade e rigidez superior ao PP, mas possui uma viscosidade significativamente superior. A modificação da estrutura molecular permite estender o uso e propriedades dos filamentos de PA de acordo com os requisitos anotados, sendo PA 6, PA 6,6, PA 11 e PA 12 algumas poliamidas normalmente aplicadas (Cherif 2016).

Poliéter-étercetona

O PEEK apresenta um bom potencial para mistura com fibras de carbono e vidro, sendo caracterizado por uma baixa emissão de gases, resistência a uma enorme gama de solventes e resistência a temperaturas elevadas contínuas, atuando como um retardante de chama. É ainda de salientar, a excelente resistência dos filamentos de PEEK à abrasão e atrito, assim como, ótimas propriedades elétricas e mecânicas (Rok et al. 2017; Cherif 2016).

Polietersulfona

Comumente empregue na construção de componentes no setor automóvel, o PES destaca-se pela sua resistência a temperaturas elevadas de funcionamento contínuo em relação às restantes matrizes termoplásticas (Cherif 2016).

Outros Termoplásticos

Tendo em conta as novas exigências industriais, novos termoplásticos têm vindo a ser desenvolvidos como resposta às necessidades do mercado, dos quais se realçam a PSU, o PPS e a PEI (Cherif 2016).

Caraterizado pela sua resistência química, resistência a temperaturas elevadas e baixas emissões comparativamente ao PES e à PA, os filamentos PEI surgem como materiais promissores. Por outro lado, os filamentos PPS e PSU destacam-se pela sua enorme estabilidade de forma sob calor e pelo facto de atuarem também como um excelente retardante de chama (Cherif 2016). Em adição, o PPS oferece uma excelente rigidez, dureza e resistência química contra soluções ácidas e alcalinas, bem como capacidade de operar a elevadas temperaturas (até 240°C) (V and Kandasubramanian 2020).

2.2.3 Combinações existentes

A seleção de materiais é crucial na obtenção do fio híbrido com o melhor compromisso entre as suas propriedades e o cumprimento dos requisitos industriais impostos para uma dada aplicação.

Relativamente às fibras de vidro, alguns exemplos de mistura são os filamentos de PP e de PET. Os fios híbridos de fibra de vidro e PP, apresentam uma boa relação entre custo e propriedades (como baixa densidade, ótima processabilidade e resistência ao ambiente) (Gong 2011; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). No entanto, de acordo com Wakeman *et al.*, os compósitos constituídos por essa mistura exibem uma distribuição não uniforme das fibras e filamentos devido à disparidade de valores de rigidez existente entre o reforço e a matriz. Além disso, foi apontado que a baixa impregnação do compósito poderá resultar do avanço desigual

da matriz fundida sobre fibras, num fenómeno designado por “fingering” (Wakeman et al. 1995).

Wakeman *et al.* realizaram também um estudo acerca das propriedades à tração, flexão e ao corte de compósitos fabricados a partir de fios híbridos com fibra de vidro e PET. Como se pode constatar pela Tabela 8, os tecidos (“woven fabrics”) e malhas (“wrap-knitted fabrics”) resultantes dessa mistura apresentaram ótimas propriedades à tração. Os dados demonstraram também a superioridade das propriedades à tração (exceto o módulo de 0°) e ao corte dos tecidos face às malhas, enquanto que as malhas possuíram as melhores características à flexão (rigidez e resistência) (Wakeman et al. 1995).

Tabela 8 - Principais características dos compósitos de fios híbridos de fibra de vidro e PET quando fornecidos sob a forma de tecido (1ª amostra) ou malha (2ª amostra) (Wakeman et al. 1995)

Strength	Woven fabric	Wrap-knitted fabric
Tensile strength at 0°	510 MPa	487 MPa
Tensile strength, 90°	131 MPa	6.6 MPa
flexural strength, 0°	494 MPa	747 MPa
Tensile modulus, 0°	22.9 GPa	28.2 GPa
Tensile modulus, 90°	6.9 GPa	3.5 GPa
Flexural strength, 0°	29.0 GPa	35 GPa
Flexural strength, 90°	10.7 GPa	4.6 GPa
Shear modulus, G	0.80 N/mX 0°	0.54 N/mX 0°
Shear strength in plane	99 MPa	88 MPa
Compression energy (WC)	0.28 10^2 Nm/m ^{2}	0.47 10^2 Nm/m ^{2}
Compression thickness (TM)	1.00 mm	0.70 mm

No que diz respeito às combinações que envolvem fibras de carbono com fios PA, estas resultam numa distribuição uniforme dos filamentos e uma impregnação melhorada que, por sua vez, resulta numa capacidade melhorada de amortecimento. As fibras de carbono podem também ser misturadas com PEEK, gerando-se fios híbridos de alto desempenho derivados das altas propriedades do PEEK (resistência a temperaturas elevadas, estabilidade dimensional, entre outros), sendo relevantes em ambientes onde se requiere baixa expansão térmica e resistência ao desgaste e corrosão. A possível seleção de PP com fibras de carbono, apesar de possuir propriedades mecânicas inferiores às restantes devido à matriz e qualidade da mistura, apresenta um bom compromisso entre o seu desempenho e custo correspondente. Além disso, a mistura de PPS com carbono em componentes automóveis e aeronáuticas deve-se à resistência química e à tração e módulo de Young das fibras de carbono, bem como ao baixo custo de processamento do PPS, estabilidade dimensional e sua elevada fluência (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

Akonda *et al.* analisaram compósitos de fios híbridos de fibra de carbono reciclado e PP, onde concluíram que o processo de enrolamento mecânico seguido de compressão permitiu uma dispersão uniforme dos elementos constituintes do fio, resultando num maior grau de homogeneidade e redução de vazios no compósito. Além disso, o excelente alinhamento das fibras de carbono contribuiu para a melhoria das características mecânicas do compósito. Porém, a presença de ligações químicas não polares na superfície da matriz e a diferença de diâmetros dos filamentos gerou uma fraca interface entre a matriz e o reforço, pelo que surgiram

propriedades mecânicas razoáveis, sendo superiores na 2ª amostra, como demonstrado pela Tabela 9 (Akonda, Lawrence, and Weager 2012).

Outros gêneros de processamento, em particular moldação por injeção e moldação por espuma expandida, foram avaliados para a mesma mistura (fibra de carbono e PP) verificando-se no primeiro caso, que a viscosidade do termoplástico gerava dificuldades na injeção do material no molde. Por outro lado, o uso de moldação por espuma expandida revelou uma melhoria da qualidade do processamento com a diminuição da viscosidade do termoplástico, melhoria da dispersão das fibras e redução dos danos das fibras (V and Kandasubramanian 2020).

Tabela 9 - Propriedades gerais de compósitos de fibra de carbono reciclado e PP para uma fração mássica de 30:70 (1ª espécie) e 50:50 (2ª espécie) (Akonda, Lawrence, and Weager 2012)

Strength	Composite specimen C ₁	Composite specimen C ₂
Tensile strength	105 MPa	160 MPa
Flexural strength	100 MPa	154 MPa
Tensile modulus	21 GPa	33 GPa
Flexural modulus	19 GPa	25 GPa

Em relação às fibras de carbono com matriz de PPS, novos estudos têm vindo a ser realizados devido ao baixo tempo de processamento e preço do PPS, bem como excelente resistência, módulo à tração e resistência química. A estrutura dos fios híbridos possui uma boa uniformidade da mistura, sucedendo-se uma redução do número de vazios durante a consolidação e melhoria das características mecânicas dos compósitos. Khan *et al.* analisou compósitos de carbono e PPS gerados por “commingling” e posterior moldação por compressão, observando uma resistência e módulo à flexão de 159,8 MPa e 21,0 GPa, respetivamente (Khan et al. 2016). A mesma mistura foi ainda testada por Xu *et al.* numa investigação acerca da influência do uso do tratamento de plasma na resistência ao corte das fibras e filamentos termoplásticos, tendo constatado uma redução na ordem dos 13,7% nas fibras de carbono e uma subida de aproximadamente 17,1% no PPS (Xu et al. 2016).

De modo a investigar o impacto de diferentes tipos de fios na conceção de compósitos, N. Svensson *et al.* investigaram e compilaram as principais características mecânicas à flexão, à tração e ao corte de compósitos distintos (Tabela 10). Em termos de resistência à flexão, comparativamente aos compósitos de GF/PA6, observa-se um ganho nos compósitos constituídos por fios “commingled” de fibra de aramida e PA6, GF/ PEI, GF/ PET e CF/PEI de cerca de 3%, 23%, 45% e 134%. No que diz respeito à resistência à tração face à GF/PA6 “commingled”, constata-se uma de subida de 19% nos compósitos “commingled” de GF/PEI, de 28% para GF/PET, de 93% para fibra de aramida e PA6 e de 99% para CF/PEI. Não menos relevante, apesar dos compósitos de “co-wrapping” de CF/PEI revelarem uma excelente resistência à flexão e à tração, face à mesma mistura obtida por “commingling”, os “co-wrapping” apresentam uma diminuição de -25% da resistência à flexão e de -21% da resistência à tração. É ainda de salientar, que os compósitos constituídos por fios “commingled” de GF/PET, fios impregnados com pó e “commingled” de CF/PA6 apresentam, por ordem crescente, os três maiores valores de ILSS (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

Conclui-se assim, que os compósitos formados por fios “commingled” de CF/PEI possuem os melhores valores de resistência à flexão e à tração, enquanto os compósitos “commingled” constituídos por CF/PA6 têm o maior ILSS. Constata-se também a superioridade dos compósitos gerados por fios “commingled” em relação aos restantes processos de conceção de fios híbridos.

Tabela 10 - Resumo dos principais dados de compósitos obtidos a partir de fios híbridos (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998)

Material	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	ILSS (MPa)
Commingled, flax/PP, UD, embroidery, 45%	140	11.0	129	—	—
Commingled, Aramid/PA6, UD	727	43	1316	67	—
Commingled, GF/PA6, UD	705	36	682	36	—
Commingled, GF/PEI, UD	670	36	814	36	—
Commingled, CF/PEI, UD	1655	103	1359	103	—
Wrapped, CF/PEI, UD	1242	105	1069	106	—
Commingled, CF/PA6, plain weave	203	—	232	—	—
Commingled, CF/PA6, satin weave	152	—	313	—	—
Commingled, CF/PA6, twill	297	—	343	—	—
Commingled, GF/PA6, plain weave	348	—	189	—	—
Commingled, GF/PEI, plain weave	432	—	250	—	—
Commingled, GF/PEI, twill weave	440	—	358	—	—
Co-woven, GF/PBT, UD, plastic size, 56.0%	810	40.5	—	—	30.1
Co-woven, GF/PBT, UD, textile size, 55.8%	250	30.2	—	—	12.6
Commingled, GF/PA6, knitted, rib base, 50%	131.6	6.9	131.4/107.1	8.8/8.5	14.7
Commingled, GF/PA6, knitted, rib float bolt, 50%	187.3	8.4	144.6/132.5	10.8/10.1	23.6
Commingled, GF/PA6, knitted, rib weft, 50%	271.2	13.9	93.9/205.5	9.1/16.7	34.2
Commingled, GF/PA6, knitted, rib warp and weft, 50%	324.6	16.0	188.7/238.9	12.8/17.4	34.0
Commingled, GF/PP, twill 4/1, 35%	350	18	400/130	21/6	—
Commingled, GF/PP, weave, 23°C	291	12.5	240	13	—
Commingled, GF/PP, weave, 80°C	121	9.2	220	13	—
Commingled, GF/PP, weave, 100°C	94	8.5	210	10	—
Commingled, GF/PP, UD, warp knitted, 49.5%	501.8/32.7	30.9/4.4	863.7/13.7	33.4/3.8	29.5
Commingled, GF/PP, UD, warp knitted, vacuum cons., 47.8%	412.3/32.2	29.5/5.1	882.4/14.5	34.2/4.3	28.2
Commingled, GF/PP, biaxial, warp knitted, 52.0%	471.4/362.2	23.8/16.4	535.6/548.1	19.2/19.9	—
Commingled, CF/Nylon6, braided $\pm 45^\circ$, 60.2%	452.4	21.6	274.0	25.7	75.6
Powder coated, CF/Nylon 6, braided $\pm 45^\circ$, 62.2%	432.4	22.1	298.6	28.4	75.4
Commingled, GF/PP, UD, 45%	590	31	790	31	—
Commingled, GF/PET, UD, 50%	1025	38	870	38	—
Commingled, GF/PP, plain weave, 60% wt	300	12	240	13	—
GMT, GF/PP, 40% wt	150	9	95	6	—
Commingled, GF/PET, UD, 45%	842	33	—	—	74
Commingled, GF/PET, twill, vacuum consolidated, 45%	395	20	—	—	74
Commingled, GF/PET, warp knitted, 48.1%	747/24.7	35.0/4.6	487	28.2	—
Commingled, GF/PET, directional woven, 48.1%	494/214	29.0/10.7	510	22.9	—

Por fim, a combinação de fibras naturais com termoplásticos, como é o caso da juta e PP ou banana e PP ou linho e PP, tem sofrido crescente interesse devido à sua grande disponibilidade, rapidez de fabrico, baixo custo, densidade reduzida e boa rigidez. Em acréscimo, o seu tempo de armazenamento ilimitado, capacidade de reciclagem e biodegradabilidade são características de destaque nos compósitos produzidos através destes elementos, considerando o estado atual de preocupação quanto às emissões de gases de efeito de estufa e reciclagem (V and Kandasubramanian 2020). No entanto, os compósitos por elas gerados apresentam valores de resistência à tração e à flexão significativamente inferiores aos obtidos com recurso às fibras de vidro, carbono e aramida, tal como se observa na Tabela 10 para os compósitos de fibras de linho e PP.

No caso particular de fios híbridos de fibras de juta e PP, um aspeto notável dos compósitos gerados por estes fios corresponde à sua enorme maleabilidade que é essencial para o seu processamento, possuindo um enorme potencial para aplicação em componentes não estruturais. Esta mistura pode atingir um módulo elástico de 7,1 GPa e uma resistência à tração na ordem dos 44,62 MPa. Em acréscimo, a introdução de tratamentos químicos e otimização das condições processuais melhora a qualidade dos compósitos (Righetti et al. 2017)

Como se pode observar na Tabela 11, o uso de tratamentos químicos em fibras de banana com PP melhora a resistência à tração e dureza dos compósitos gerados sem afetar o módulo à tração. Relativamente à resistência à tração verifica-se um crescimento de cerca de 6% com a

aplicação do KMnO_4 , de 18% através do MAPP, de 27% com o uso de NaOH e de 37% com VTMO. No que diz respeito à dureza, observou-se uma subida nos compósitos tratados com KMnO_4 e VTMO de 4% e nos compósitos tratados com recurso a NaOH e MAPP de 8%. Por outro lado, verifica-se uma redução até 43% da energia ao impacto dos compósitos após tratamento (Anil et al. 2016).

Num estudo semelhante, Vardhini *et al.*, através do processo de moldação por compressão, produziram compósitos de fibra de banana e PP tratados quimicamente, onde foram igualmente observadas propriedades à tração superiores. No entanto, também verificaram, que, por vezes, ocorre uma degradação térmica das fibras, que porventura leva a uma redução das propriedades mecânicas (Vishnu Vardhini, Murugan, and Surjit 2018).

Tabela 11 - Propriedades principais de compósitos de fibra de banana com PP para diferentes tratamentos químicos (Anil et al. 2016)

Material	Tensile strength in MPa	Hardness Shore (D)	Impact energy in kJ/m ²
Untreated composite	32.8	48–50	19
KMnO_4 treated	34.7	50–52	17.8
NaOH treated	41.70	52–54	11
VTMO treated	45	50–52	10.9
MAPP treated	38.6	52–54	12

2.3 Processos e estrutura

Nos últimos anos, os fios híbridos têm vindo a ser analisados quanto à estrutura gerada pelos diferentes métodos de conceção, bem como o seu impacto na qualidade da mistura e características mecânicas.

As propriedades obtidas nos produtos compostos por fios híbridos, levou a um crescente interesse na aplicação dos mesmos. O seu desempenho e qualidade resulta não só das propriedades mecânicas apresentadas pelos reforços, mas também da substituição dos termoendurecíveis por termoplásticos (Jalal Uddin 2010). Contudo, os compósitos termoplásticos podem sofrer uma falta de adesão entre a matriz e reforço, devido à elevada viscosidade da matriz (Jalal Uddin 2010; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

Uma forma de resolução do problema provocado pela viscosidade, consiste na conceção de um fio híbrido de modo a permitir uma impregnação mais completa e assegurar a homogeneidade e propriedades mecânicas do compósito criado (Jalal Uddin 2010). Assim sendo, o processo de “commingling” surgiu como um método preferencial na produção de fio híbridos de distribuição uniforme. Contudo, para além do “commingling”, a conceção de fios híbridos pode ser realizada com recurso a diversas técnicas convencionais adaptadas da indústria têxtil ou métodos particulares recentemente desenvolvidos que permitem a modificação da morfologia do fio, uma distribuição uniforme dos elementos e minimização do dano das fibras de reforço (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). Na Tabela 12 e Figura 6 é possível visualizar diferentes métodos de conceção e as estruturas dos fios híbridos correspondentes (Gong 2011).

Tabela 12 - Diferentes métodos de fabrico de fios híbridos, seu tipo e estrutura (Gong 2011)

Production method		Type of yarn		Structure
New method	Modified conventional method	Conventional yarns	Hybrid yarns	
1	Ring spinning	S	SS _h , SF _h , SC, SE	Twisted, core-spun
2	Rotor spinning	S	SS _h , SF _h , SC, SE	Wrapped, core-spun
3	D REF spinning	S	SS _h , SF _h , SC, SE	Wrapped, core-spun
4	Wrap spinning	SF, FF	SF _h , FF _h , SC, SE	Core-sheath
5	Air-jet texturing	F, FF	FF _h , FC, FE	Interlaced loop, core-sheath
6	Commingling	F, FF	FF _h , FE	Nip, pleated
7	Parallel winding	F _h	FF _h	Side by side
8	Stretch break		SF _h	Stretch-break fiber plus filament core
9	KEMAFIL technology		FF _h	Knitted sheath plus filament core
10	Schappe technology		S _h F	Stretch break fiber plus wrapped filament

Notes: S = spun yarn, F = filament yarn, SS = spun-spun, FF = filament-filament, C = conductive material, E = elastomeric material, S_h = high-performance fiber, F_h = high-performance filament.

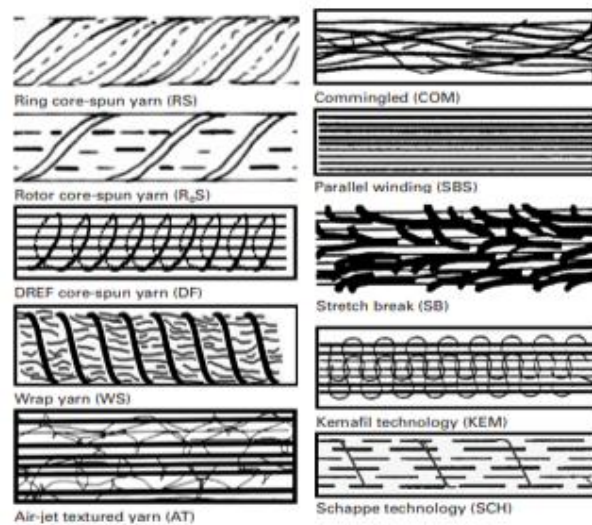


Figura 6 - Diferentes tipos de estruturas que os fios híbridos podem apresentar em função do método de concepção (Gong 2011)

De seguida alguns métodos de concepção de fios híbridos serão descritos para um melhor entendimento do seu conceito e influência.

2.3.1 “Ring spinning”

A formação de fios híbridos através de “ring spinning” recorre tradicionalmente a pares de rolos para assegurar o espalhamento dos fios, e a outras peças relevantes, em particular, o fuso, anel e “traveler”, responsáveis pela torção e enrolamento dos materiais (Figura 7). Este método inicia-se com o puxo das fibras e filamentos da estrutura que os fixa e sua introdução nos cilindros de espalhamento. Posteriormente, com a saída dos fios de reforço e matriz dispersos nos rolos de espalhamento dianteiro, estes sofrem uma torção em conjunto através

do fuso, anel e elemento viajante (“traveler”) e mais tarde sucede-se o enrolamento do fio híbrido resultante (Jalal Uddin 2010).

“Ring spinning” é caracterizado como um processo económico e simples, mas a disposição das fibras de reforço no centro e sua envoltória pelos filamentos da matriz (Figura 6) apresenta uma fraca homogeneização, que implica propriedades mecânicas reduzidas no fio e compósitos gerados. Durante o processamento dos fios pode ocorrer também a danificação das fibras do núcleo com a torção das mesmas (Gong 2011). Outro problema recorrente, corresponde ao deslizamento das fibras relativamente aos filamentos da matriz. A existência de movimento relativo provoca baixa cobertura do núcleo, e pode, conseqüentemente, levar à rotura das fibras no pós-processamento (Jalal Uddin 2010).

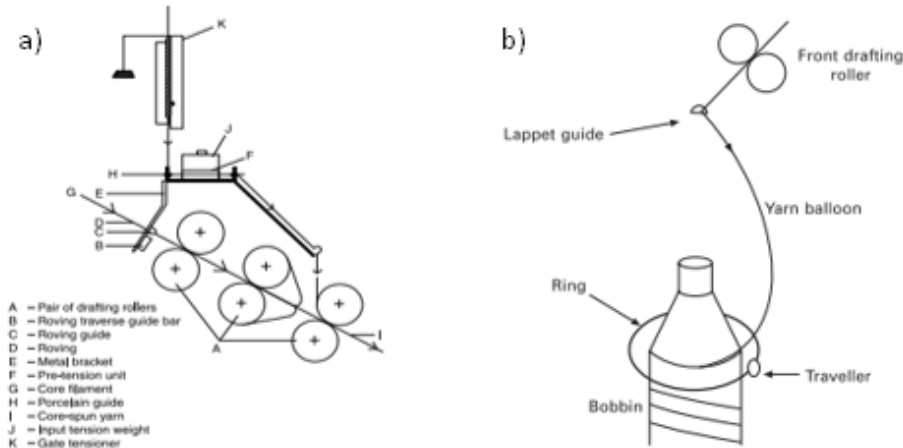


Figura 7 - Representação esquemática do processo de "ring spinning" (a) e das peças responsáveis pela torção (b) (Jalal Uddin 2010)

2.3.2 “Rotor spinning”

O processo de “rotor spinning”, expresso na Figura 8, consiste na introdução de uma torção falsa nos filamentos termoplásticos, que são enrolados em torno das fibras de reforço do núcleo, devido à rotação de um rotor. Um elemento denominado por “doffing tube” é responsável pela aplicação da torção nos filamentos da matriz, assim como, pelo aumento da área de contacto do fio. O componente encontra-se montado num rolamento, sendo rodado por um motor distinto no sentido contrário ao rotor com uma relação de velocidade de 1:9 (Gong 2011).

Deste modo, o sistema de “rotor spinning” produz um fio híbrido onde os filamentos da matriz se enrolam em torno das fibras situadas no núcleo, sem que ocorra torção das fibras do núcleo (Figura 6). O resultado é um fio grosso e mais económico que o “ring-spinning”. No entanto, não apresenta melhoria da uniformidade de distribuição dos filamentos e a técnica tem tendência em desalinhar as fibras e filamentos (Jalal Uddin 2010; Gong 2011).

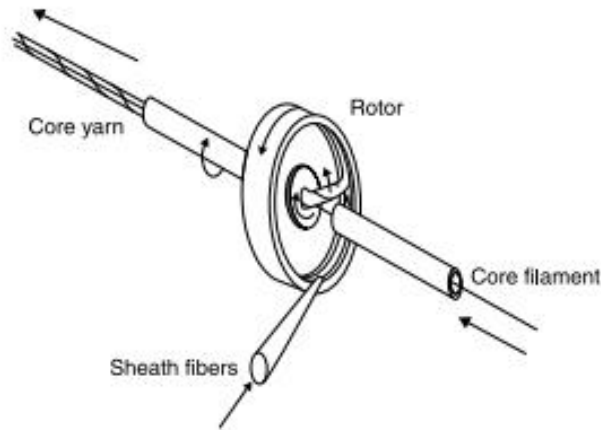


Figura 8 - Sistema de "rotor spinning" (Gong 2011)

2.3.3 "DREF spinning"

Fios híbridos podem ser produzidos através da metodologia do processo de "DREF spinning" ou "friction spinning". Este (Figura 9) baseia-se no contacto existente entre a fibra totalmente aberta e um tambor rotativo, sendo o fio enrolado pelo atrito com os restantes dois tambores. Este sistema não possui limitações quanto ao reforço a usar e oferece uma grande variedade de fios, que se destacam pela sua excelente resistência ao desgaste, à tração e à abrasão. Em acréscimo, os fios produzidos possuem uma flexibilidade adequada, sendo as fibras de reforço dispostas paralelamente no núcleo e rodeadas pelos filamentos do termoplástico (Figura 6) (Jalal Uddin 2010; Gong 2011).

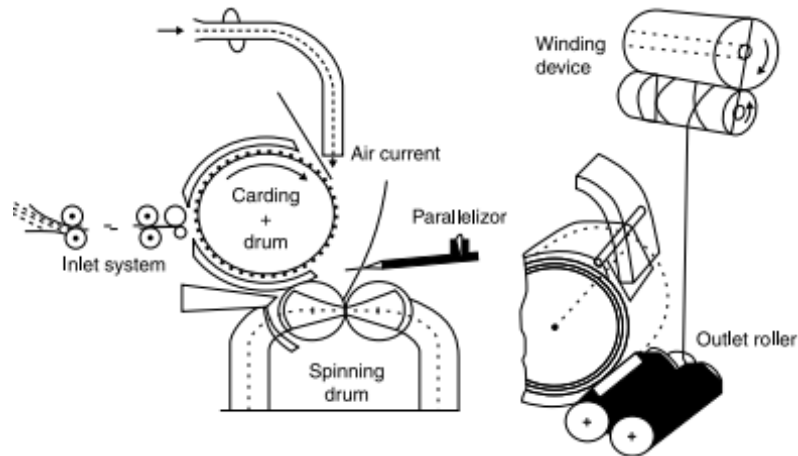


Figura 9 - Representação esquemática do método de "DREF spinning" (Gong 2011)

2.3.4 "Wrap spinning"

Outra técnica de relevância, "wrap spinning", resume-se à formação de fios híbridos a partir do enrolamento dos filamentos termoplásticos em torno das fibras de reforço do núcleo alinhadas paralelamente (Figura 6), protegendo-as de danos que poderão sofrer durante a sua formação e pós-processamento (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). No entanto, este método origina uma homogeneização reduzida, e, por conseguinte, baixa impregnação. Além disso, esta técnica requer temperaturas e pressões de processamento superiores aos anteriores (Jalal Uddin 2010; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). Assim sendo, estes fios são

geralmente usados na concepção de têxteis não estruturais no setor automóvel e em habitações (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998; Gong 2011).

“Wrap spinning” (Figura 10) tem início com a alimentação do rolo do fio, que é esticado com recurso entre 3 a 5 cilindros e de seguida as fibras de reforço são conduzidas por uma fieira oca sem sofrer torção verdadeira. Posteriormente, filamentos de matriz são enrolados em torno das fibras por uma bobina rotativa a alta velocidade apoiada na fieira, de forma a assegurar a integridade estrutural do fio híbrido. O processo termina com a passagem do fio produzido por cilindros de extração e por um enrolador (Gong 2011).

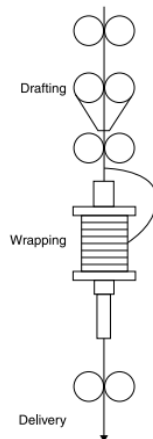


Figura 10 - Ilustração de "Wrap spinning" (Gong 2011)

2.3.5 “Air-jet texturing”

Um dos principais métodos convencionais adaptados para a produção de fios híbridos corresponde ao “air-jet texturing”, onde ocorre a combinação do reforço e matriz através de um processo puramente mecânico. O seu interesse é fundamentado pela diversidade de reforços e termoplásticos que podem ser misturados e características dos fios híbridos por este método criadas. Além disso, o desenvolvimento de novos jatos de ar tem permitido melhorar a economia do processo e reduzir o consumo de ar (Kothari and Timble 1991).

O princípio de funcionamento deste processo (Figura 11) envolve a introdução de fios de reforço e termoplástico em sobrealimentação numa zona turbulenta, onde a aplicação de um fluxo de ar frio pressurizado resulta na abertura dos fios e formação de laços entre as fibras e filamentos (Figura 6). O fluxo de ar é fornecido por um canal inclinado em relação aos fios, de modo a garantir a abertura e deslocamento das fibras e filamentos, e consequente mistura. Assim sendo, o bocal de ar (componente onde ocorre a aplicação do ar pressurizado) corresponde à principal peça responsável pelo funcionamento da técnica de “air-jet texturing”, pois permite a criação de um fluxo turbulento, não uniforme e supersónico necessário para a mistura dos materiais (Jalal Uddin 2010; Gong 2011).

O processo permite ainda obter uma maior homogeneização dos materiais combinados e aumentar o volume do fio. Porém, o fluxo de ar aplicado e o design desadequado do bocal de ar podem provocar uma degradação significativa das propriedades do fio devido a danos e possível rotura das fibras de reforço (Cherif 2016; Gong 2011). Além disso, a abertura e criação dos laços encontra-se intrinsecamente dependente da sobrealimentação dos fios, isto é, da diferença de velocidades à entrada e à saída do bocal de “air-jet texturing” (Jalal Uddin 2010).



Figura 11 - Representação esquemática do funcionamento de "air-jet texturing" (Gong 2011)

2.3.6 “Commingling”

A criação de estruturas flexíveis requiere a ligação entre as fibras e filamentos por ação de forças coesivas (Gong 2011). O novo método, designado por “commingling”, resume-se à passagem dos fios de reforço e de termoplástico por um bocal, onde são submetidos a um jato de ar pressurizado a mover-se perpendicularmente a elevadas velocidades, que origina a abertura e entrelaçamento das fibras e filamentos, como demonstrado pela Figura 12 (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). Na Figura 6, encontra-se a representação esquemática da estrutura do fio “commingled”.

O fio híbrido produzido não possui nenhuma alteração física ou química, mas uma estrutura distinta resultante da mudança da posição das fibras e filamentos. Posto isto, garante-se um elevado nível de homogeneização dos fios híbridos, mas a pressão gerada pelo jato de ar pode danificar as fibras de reforço (Jalal Uddin 2010; Cherif 2016; Gong 2011). Além disso, os fios híbridos gerados são flexíveis, suaves, coesos e de fácil processamento (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

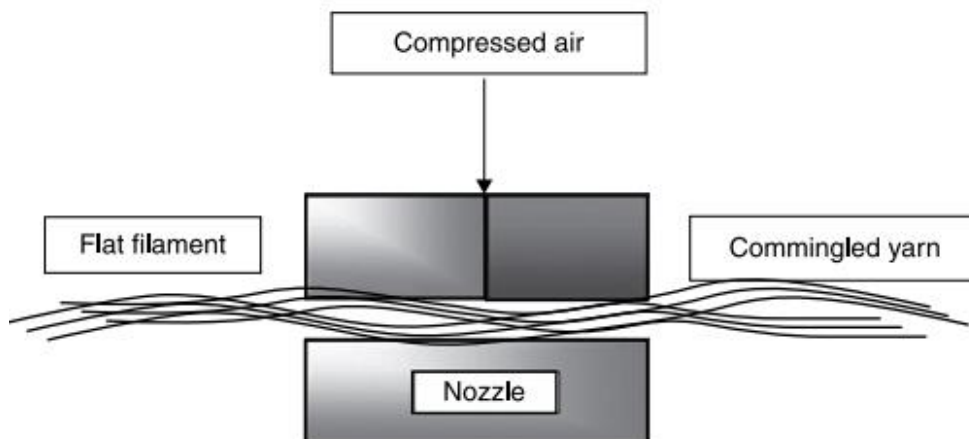


Figura 12 - Representação esquemática do método de "commingling" (Gong 2011)

2.3.7 “Parallel winding”

A técnica de “parallel winding” envolve a transformação de fios de reforço e matriz termoplástica em filmes, onde as fibras e filamentos se encontram dispostos em paralelo (Figura 6). Assim sendo, camadas de fios de reforço e matriz são conduzidos para uma câmara de aquecimento a uma temperatura acima da temperatura de amolecimento do termoplástico, de modo a gerar filmes, que são enrolados num mandril. Ainda dentro da câmara, sucede-se a aplicação de pressão por um cilindro na superfície do mandril. Por fim, um jato de ar quente à temperatura de fusão do termoplástico funde a matriz e dá início à consolidação (Gong 2011). Deste modo, a disposição em camadas, fusão e consolidação ocorrem numa única etapa.

2.3.8 “Stretch breaking”

Ao contrário dos outros processos, durante o processo de “stretch breaking” (Figura 13) as fibras contínuas de reforço são fragmentadas, seguindo-se a torção e mistura destes elementos com filamentos de termoplástico contínuo, envolvendo-os e dando origem ao fio híbrido (Figura 6). Desta forma, resultam fios híbridos consistentes com baixo dano das fibras. É de salientar, que a torção das fibras e filamentos contribui para um aumento da flexibilidade, contudo, o desalinhamento das fibras pode gerar uma redução da rigidez longitudinal e resistência do produto final (Jalal Uddin 2010; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998; Gong 2011).

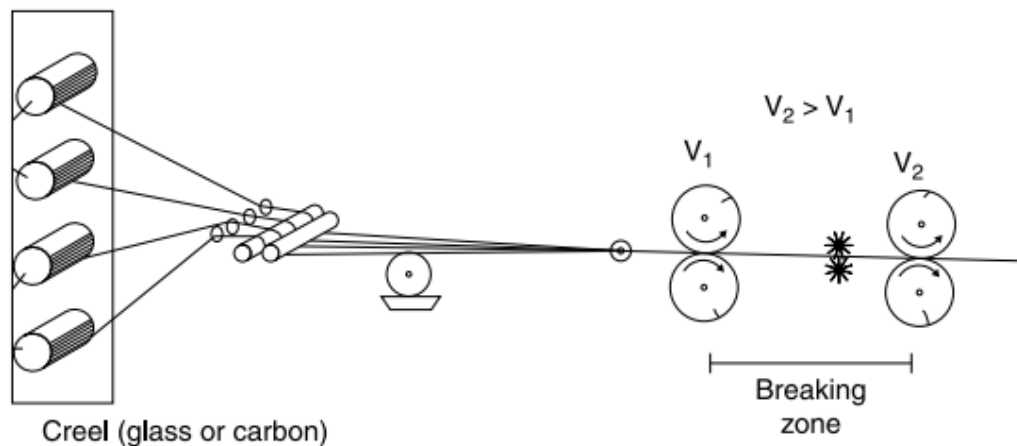


Figura 13 - Ilustração da técnica de "stretch breaking" (Gong 2011)

2.3.9 “KEMAFIL technology”

O método conhecido por “KEMAFIL technology” envolve máquinas de tricotar circulares capazes de construir estruturas tubulares em malha que cobrem o núcleo, como se pode observar na Figura 14. Estas operam através do uso de ganchos (“loppers”) apoiados no elemento de guia. Ao contrário do que se verifica nos métodos tradicionais, como “ring spinning” e “rotor spinning”), no processo de “KEMAFIL” os filamentos de termoplástico são cobertos por fibras de reforço, sendo o conjunto depois revestido por filamentos termoplásticos (Figura 6). Geralmente, esta técnica é utilizada na conceção de lacres de embalagem e cabos técnicos (Jalal Uddin 2010; Gong 2011).

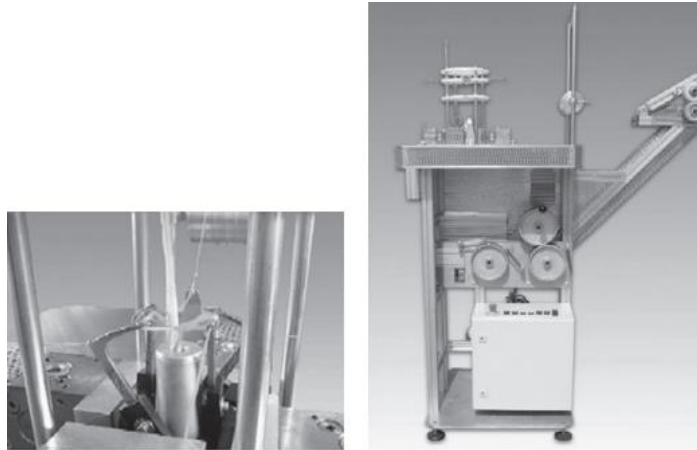


Figura 14 - Processo de "KEMAFIL technology" (Gong 2011)

2.3.10 "Schappe technology"

"Schappe technology" destaca-se como sendo um processo que possibilita a eliminação dos pontos fracos das fibras e consequente melhoria da tenacidade e capacidade de fiação. Os fios híbridos por este método criados são normalmente utilizados em aplicações que necessitam de resistência a elevadas temperaturas, resistência ao corte e proteção térmica (Gong 2011).

Esta técnica baseia-se na transformação de filamentos contínuos no topo de fibras longas permitindo a criação de fios híbridos de maior tenacidade e volume, sendo os fios híbridos compostos por uma mistura de fibras de reforço e filamentos termoplásticos descontínuos envolvida por filamentos de matriz contínuos (Figura 6) (Jalal Uddin 2010).

Na Tabela 13 encontra-se um resumo das vantagens, desvantagens e estrutura dos fios híbridos dos diferentes processos de criação de fios híbridos anteriormente mencionados.

Tabela 13 - Resumo das principais vantagens e desvantagens dos diferentes processos de concepção de fios híbridos e estruturas correspondentes

Processo	Vantagens	Desvantagens	Estrutura do fio híbrido
"Ring spinning"	Processo simples e económico	Mistura pouco homogénea Dano nas fibras devido à torção Existência de movimento relativo das fibras, que pode levar à rotura das mesmas no pós-processamento	Fibras são cobertas pelos filamentos termoplásticos torcidos
"Rotor spinning"	Processo menos dispendioso que "ring-spinning" As fibras não sofrem torção	Inexistência de uma mistura homogénea Desalinhamento das fibras e filamentos	Filamentos da matriz enrolam em torno das fibras de reforço

“DREF spinning”	Resistência à tração, à abrasão e ao desgaste elevada Flexibilidade razoável	Distribuição uniforme dos fios híbridos	não	Filamentos do termoplástico rodeiam fibras de reforço alinhadas no núcleo
“Wrap spinning”	Aplicação de uma torção falsa	Fraca homogeneidade da mistura Maiores requisitos no pós-processamento		Fibras alinhadas no núcleo paralelamente, são envolvidas por filamentos
“Air-jet texturing”	Permite uma melhor abertura e distribuição dos elementos dos fios Aumento do volume do fio	Dano das fibras gerado pelo uso de um jato de ar pressurizado inclinado		Fibras e filamentos termoplásticos formam laços
“Commingling”	Permite a criação de um fio híbrido com distribuição uniforme (mais homogêneo que os restantes) dada a direção perpendicular do jato de ar pressurizado Formação de fios de fácil processamento, coesos e flexíveis	A perpendicularidade do jato de ar resulta num aumento do dano das fibras, sendo este superior ao “air-jet texturing”		Fibras de reforço e filamentos da matriz entrelaçados
“Parallel winding”	Disposição, fusão e consolidação dos fios numa única etapa	Inexistência de uma distribuição uniforme das fibras e filamentos		Fibras e filamentos colocados em paralelo
“Stretch breaking”	Baixo dano nas fibras Boa flexibilidade	As fibras tendem a desalinhar		Filamentos de matriz são envolvidos por fibras fragmentadas
“KEMAFIL technology”	Capazes de construir estruturas tubulares em malha que cobrem o núcleo	Distribuição uniforme dos elementos dos fios	não	Fibras paralelas cobrem os filamentos termoplásticos, sendo o conjunto revestido por uma malha de filamentos contínuos
“Schappe technology”	Cria fios híbridos mais flexíveis e com uma tenacidade melhorada	Boa homogeneidade		Fibras e filamentos curtos são cobertos por filamentos termoplásticos

2.4 “Commingling”

O processo de “commingling” apresenta o maior potencial para a formação de fios híbridos homogêneos, mitigando os problemas derivados da viscosidade elevada dos termoplásticos e originando fios híbridos e compósitos termoplásticos com propriedades mecânicas melhoradas.

“Saint-Gobain Vetrotex” desenvolveu o primeiro processo de “commingling” (patenteado como “Twintex®”), em que fibras de vidro e filamentos de PP são misturadas de modo a criar fios híbridos para compósitos (Figura 15). Como a combinação dos materiais ocorre logo após a fiação dos materiais fundidos em fibras de vidro e filamentos de PP (“melt spinning”), os fios híbridos produzidos apresentam boas propriedades mecânicas (resistência ao impacto, um excelente rácio entre a massa e rigidez e outros). Estes fios híbridos são também recicláveis, apresentam um custo reduzido, boa absorção de som e flexibilidade de forma, pelo que são empregues na indústria automóvel (Gong 2011).

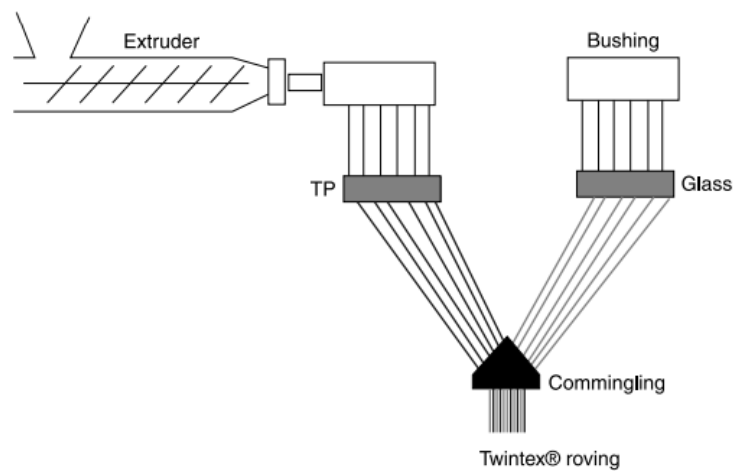


Figura 15 - Ilustração do método de Twintex® (Gong 2011)

Devido à limitação do uso do “Twintex®” a fibras de vidro e sua processabilidade, novas metodologias de “commingling” foram desenvolvidas. Assim, de modo a melhorar as combinações dos fios híbridos e a uniformidade das fibras e filamentos dispersos, o conceito de entrelaçamento a partir de um jato de ar foi implementado no processo de “commingling” sem a ocorrência de torção real dos fios, sendo este o método normalmente intitulado de “commingling” (Gong 2011). Outra possibilidade do processo corresponde à sua realização num meio aquoso com recurso a cargas electroestáticas após a dispersão dos filamentos. Contudo, a velocidade de fabrico a partir desta metodologia é cerca de duas vezes inferior às da mistura por jato de ar (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

2.4.1 Princípio de funcionamento

A estrutura de “commingling” incorpora, além do bocal de ar e enrolador do fio, cilindros responsáveis pelo puxo, espalhamento e alongamento dos fios de reforço e de matriz termoplástica, sendo estes introduzidos separadamente a diferentes taxas de sobrealimentação (Figura 16). Os fios de termoplástico possuem uma maior taxa de sobrealimentação de forma a manter as fibras de reforço esticadas e misturadas com filamentos termoplásticos (Cherif 2016).

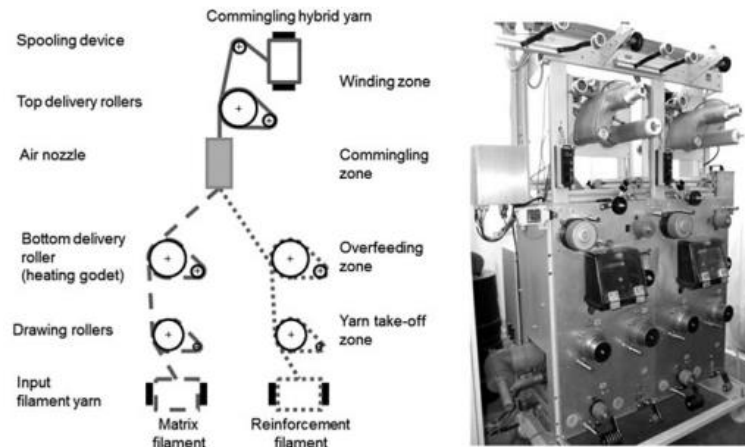


Figura 16 - Sistema convencional de “commingling” e respectivos elementos constituintes (Cherif 2016)

Como foi anteriormente mencionado, durante o processo de “commingling” (Figura 12), os fios de reforço e de matriz termoplástica são sujeitos a um jato de ar turbulento aplicado perpendicularmente à direção dos fios, que provoca uma abertura das fibras e filamentos. Em simultâneo, nas extremidades do fluxo as fibras e filamentos individuais entram em rotação e sucede-se o entrelaçamento dos mesmos com uma acumulação de torção falsa, que resulta na formação de nós. Posteriormente, com o avanço do fio no bocal, o nó entra em contacto direto com o fluxo de ar cessando o entrelaçamento do reforço e termoplástico, dando origem ao fio híbrido.

A técnica de “commingling” tem a capacidade de produzir elementos com um elevado grau de homogeneidade. Porém, durante o pós-processamento dos fios híbridos, estes podem sofrer um desentrelaçamento. Nessa fase, é possível a ocorrência de um alongamento não uniforme dos fios, que gera a separação das fibras de reforço e filamentos termoplásticos e consequente redução das propriedades mecânicas dos compósitos. Um caso semelhante foi observado por Long *et al.*, onde forças à tração e compressão elevadas ao excederem um certo valor provocaram a migração das fibras de reforço, reduzindo a homogeneização do fio. Esta, por sua vez, implica uma impregnação incompleta dos compósitos, afetando negativamente a estrutura e características dos compósitos (Long, Wilks, and Rudd 2001).

O dano provocado nas fibras de reforço durante o processo de “commingling” é um dos principais obstáculos para a obtenção do fio híbrido de melhor qualidade face aos restantes processos. Posto isto, Choi *et al.* investigou o efeito de diferentes géneros de bocais de “air-jet texturing” (“DuPont Type XV 100/86D”) e bocais de “commingling” (“Temco LD 32.04, 32.05 e 32.06”) a diferentes pressões, no dano filamental de uma mistura de carbono (“Toray T300J”) e PEEK (“Hoechst”), como se pode observar pela Figura 17. Os autores observaram que a resistência do fio e contagem de fibras aumentava com a diminuição da pressão de ar aplicada, independentemente do bocal selecionado. Quanto aos bocais, foi anotado que os de “air-jet texturing” resultavam num menor dano filamental relativamente aos restantes. Apesar do “air-jet texturing” permitir uma boa abertura dos filamentos dos fios, o grau de homogeneização é reduzido, comparativamente ao processo de “commingling” (Choi, Diestel, and Offermann 1999). Esta disparidade de distribuição na secção de corte e entrelaçamento deve-se ao ângulo sob o qual o jato de ar entra em contacto com o fio, que no “commingling” ao ser perpendicular à trajetória do reforço e do termoplástico permite uma abertura e entrelaçamento melhorado (Cherif 2016). Contudo, essa mesma perpendicularidade do jato de “commingling” resulta num aumento do dano filamental devido à sensibilidade das fibras a forças atuantes nessa direção (Jalal Uddin 2010).

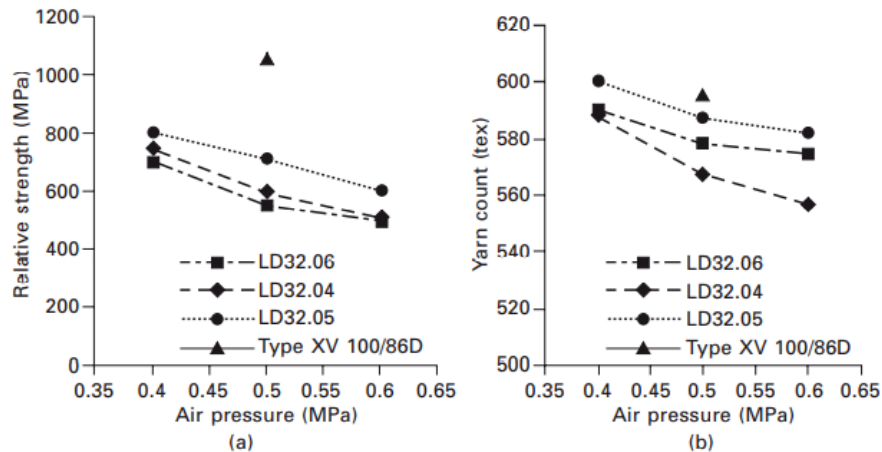


Figura 17 - Variação da resistência relativa (a) e contagem de fibras de carbono (b) de acordo com a pressão e bocal selecionado (Choi, Diestel, and Offermann 1999)

A distribuição uniforme dos fios híbridos é essencial para a obtenção do fio com maior desempenho, permitindo que no pós-processamento do fio, ocorra uma impregnação mais completa e rápida das fibras, e, por conseguinte, compósitos com características mecânicas superiores. Neste sentido, Lauke *et al.* avaliaram a distribuição de fibras de vidro e filamentos termoplásticos de acordo com diferentes técnicas de obtenção de fios híbridos através de observações microscópicas da secção de corte (SEM). Neste estudo observaram que a homogeneidade aumentava na seguinte ordem: fio “friction spun”, fio “side-by-side”, fio “Kemafil”, fio “commingled” e fio “Schappe” (Lauke, Bunzel, and Schneider 1998). Num estudo semelhante Krucinska *et al.* concluíram que fios produzidos a partir de “air-jet texturing” e “commingling” possuem um nível de mistura superior, enquanto a “ring spinning” e a “DREF spinning” um grau de combinação reduzido (Krucínska et al. 2001). Em ambos os casos, é de destacar o facto do processo de “commingling” ser denotado como sendo a técnica que permite a obtenção de uma distribuição uniforme das fibras e filamentos na secção de corte, pelo que é o alvo do presente trabalho.

A qualidade de consolidação do compósito, indicada pelo conteúdo de vazios em função da percentagem de “commingling” (D_{com}) e temperatura (T), foi avaliada por Ye *et al.*, como se encontra exposto na Figura 18. Relativamente à percentagem de “commingling”, foi observado que o seu aumento era acompanhado pela descida da percentagem de vazios no compósito que, por sua vez, implica uma melhoria na qualidade da consolidação, e, por conseguinte, subida das propriedades mecânicas do compósito criado. Estes resultados confirmam, novamente, a importância do “commingling” na qualidade do compósito termoplástico final. É de salientar que o mesmo comportamento foi anotado com o aumento da temperatura de 380°C para 400°C (Ye et al. 1995).

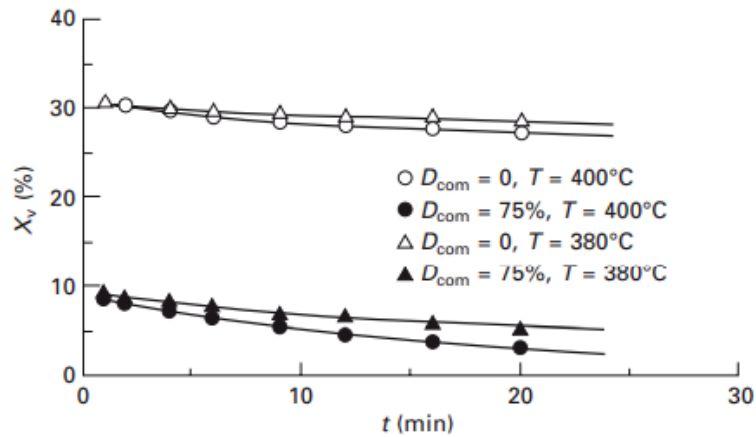


Figura 18 - Qualidade da consolidação de fios desentrelaçados e “commingled” quando sujeitos a 380°C e 400°C (Ye et al. 1995)

Uma variante deste sistema incorpora a formação das fibras de reforço e filamentos de termoplástico e posterior “commingling” dos mesmos num único processo, denominado por “online hybrid commingling” (Figura 19). Algumas vantagens de destaque desta técnica inovadora correspondem a uma distribuição homogênea melhorada, diminuição do dano filamental e eliminação da contração térmica. Deste modo, obtêm-se ciclos térmicos reduzidos e mitigação de distorções severas durante o pré-aquecimento no pós-processamento, bem como compósitos com propriedades mecânicas superiores. Contudo, este processo encontra-se severamente limitado quanto aos materiais capazes de usar, em particular no caso das fibras onde só podem ser utilizadas fibras de vidro (Jalal Uddin 2010). O mesmo foi reportado por E. Mäder *et al.* ao analisar a distribuição, características mecânicas e contração térmica de compósitos de fios híbridos de fibra de vidro com PP feitos a partir de “online commingling” e “air-jet texturing” (Mäder, Rausch, and Schmidt 2008).

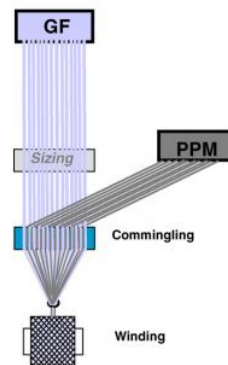


Figura 19 - Representação esquemática (esquerda) e equipamento (direita) de "online commingling" de vidro e PP. A ampliação demonstra o mistura das fibras de vidro com as de PP (filamentos que se deslocam da direita para a esquerda) (Mäder, Rausch, and Schmidt 2008)

2.4.2 Parâmetros de “commingling”

Os processos aplicados na concepção de fios híbridos possuem uma enorme influência na homogeneização dos filamentos e qualidade final do material. No entanto, a eficácia do processo de concepção, homogeneização e geometria do fio híbrido encontra-se dependente dos parâmetros do processo, estrutura do equipamento, características dos materiais e gênero de bocal selecionado (Cherif 2016).

O conhecimento da estrutura do fio possibilita uma previsão do comportamento e parâmetros dos fios após a sua formação, bem como na sua aplicação no compósito final. A estrutura do fio pode ser decomposta pela sua estrutura interior e exterior (Figura 20), sendo afetada pela natureza das fibras de reforço e filamentos termoplásticos selecionados, assim como, pelo processo aplicado na formação do fio híbrido. Assim sendo, o grau de homogeneidade das fibras ao longo do fio, sua forma, geometria das fibras (diâmetro, comprimento e forma da secção) e orientação em relação à direção do eixo são algumas das características que influenciam em grande parte a estrutura do fio. No caso particular da secção de corte do fio, esta comumente possui uma forma oval ou retangular, à exceção da existência de torção dos filamentos que resulta numa secção mais próxima da forma circular (Cherif 2016).

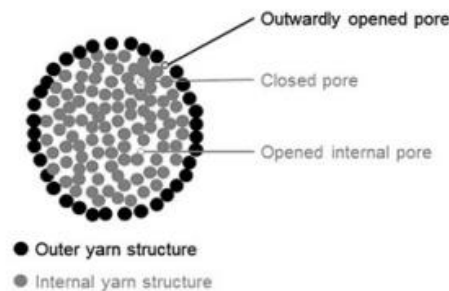


Figura 20 - Representação esquemática da estrutura interna e externa do fio (Cherif 2016)

A porosidade do fio define a sua estrutura interna, sendo esta proporção determinada pela densidade do conjunto de fibras no fio. De acordo com a inexistência ou presença de conexão entre poros, estes podem ser classificados em fechados ou abertos, respetivamente. Estes últimos podem encontrar-se conectados com a estrutura externa do fio, pelo que geram um aumento da área de contacto e, por conseguinte, uma maior permeabilidade. Além da porosidade, a rugosidade da superfície é um dos principais responsáveis pela determinação da área de contacto, que, por sua vez, define o atrito entre fibras. Tendo em conta o conceito de estrutura interna, a Tabela 14 denota diferentes propriedades características da estrutura interna e respetiva relevância (Cherif 2016).

Tabela 14 - Propriedades inerentes à estrutura interna do fio e seu relevo (Cherif 2016)

Parâmetros De Teste	Importância
Curva de ensaio de tração e respetiva tensão limite de elasticidade, resistência à tração e módulo de Young, máxima deformação à tensão, entre outros.	Capacidade de processamento e montagem do material (como tecelagem)
Módulo de elasticidade à flexão	Potencial para adotar uma geometria complexa
Quantidade de poros com ligação à estrutura externa do fio e resistência à compressão	Profundidade da impregnação e resistência do compósito

Relativamente à estrutura externa, esta é composta pelas fibras exteriores do fio que estabelecem a secção transversal e a rugosidade microporosa superficial do fio. Esta última em conjunto com o acabamento do fio influenciam o comportamento de impregnação das fibras de reforço pelos filamentos da matriz e sua adesão. Os principais parâmetros que caracterizam a estrutura externa e seu impacto encontram-se descritos na Tabela 15 (Cherif 2016).

Tabela 15 - Propriedades inerentes à estrutura externa do fio e seu relevo (Cherif 2016)

Parâmetros De Teste	Importância
Coeficiente de atrito	Capacidade de processamento (passagem suave pelos elementos de guia)
Ângulo de contacto para avaliação do comportamento de impregnação	Revela a interface mecânica e química, como também as suas propriedades

A estabilidade destes fios encontra-se dependente das forças compressivas existentes entre os vários elementos aplicados durante a sua conceção. Quando estes fios se encontram sujeitos a cargas mecânicas excessivas, podem sofrer migrações das fibras ou até mesmo sua rotura, que resultam numa perda da homogeneização e redução das propriedades. Este problema pode ser agravado pela existência de defeitos interiores (distribuição desigual de poros), bem como por propriedades diferentes (alongamentos distintos) e pela orientação desadequada das fibras.

A estrutura dos fios híbridos é um dos fatores mais influentes que afeta os compósitos termoplásticos, no que diz respeito à sua permeabilidade, flexibilidade e espessura, pelo que é crucial a sua análise (Jalal Uddin 2010). Recapitulando, os parâmetros mais influentes na estrutura e propriedades mecânicas dos fios “commingled” podem ser classificados em: características da matéria-prima, parâmetros processuais, geometria do bocal de ar e etapas e peças da máquina (Jalal Uddin 2010; V and Kandasubramanian 2020). Quanto às propriedades dos materiais, os fatores mais impactantes correspondem ao número de filamentos, fração volumica do reforço, forma da secção transversal, diâmetro, rigidez à flexão e outros. Por outro lado, os parâmetros do processo envolvem a humidade, temperatura de pré-aquecimento, velocidade de produção, sobrealimentação, tensão no fio e pressão. Quanto á geometria do bocal, esta engloba o perfil, diâmetros dos canais e ângulo entre o canal de jato de ar e o canal do fio, entre outros aspetos. No caso dos parâmetros do equipamento, a geometria e configuração das diversas componentes e etapas têm uma enorme influência na eficácia do “commingling” (V and Kandasubramanian 2020). Posto isto, a avaliação da sua influência advém do estudo de vários indicadores tais como, a frequência de nós, o grau de homogeneização e comprimento dos laços formados (Cherif 2016). Quanto ao grau de entrelaçamento, este é estimado através do fator de distribuição lateral, fator de distribuição radial e densidade da mistura (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

O grau de homogeneização encontra-se dependente do diâmetro filamantar, que deverá possuir valores iguais ou semelhantes de modo a obter uma impregnação mais uniforme. Os diâmetros dos filamentos termoplásticos devem ser inferiores ou iguais aos dos reforços de modo a melhorar a homogeneização (Cherif 2016). É de salientar ainda que um número reduzido de fibras ou filamentos dificulta o processo de “commingling”. Segundo N. Svensson, R. Shishoo e M. Gilchrist a semelhança das diferentes propriedades dos materiais (como atrito e flexão) permite uma distribuição uniforme. Os autores também afirmam que o uso de ar pressurizado a uma temperatura entre os 25 e 90% da temperatura de fusão dos filamentos da matriz termoplástica, permite uma redução da rotura dos elementos constituintes dos fios híbridos (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). Não menos relevante, foi apontado que o

somatório das diferentes sobrealimentações não deve exceder os 45% de modo a assegurar as suas excelentes propriedades mecânicas a elevadas velocidades de produção (Cherif 2016).

O funcionamento adequado dos compósitos termoplásticos derivados de fios híbridos, em particular de fios “commingled”, dependem dos atributos dos materiais processados. Além das propriedades convencionais dos fios como resistência e alongamento à tração, flexão e compressão, um fator relevante para o desempenho adequado dos fios híbridos corresponde ao coeficiente de atrito. Durante o processo de formação do fio, como também na criação do compósito, as fibras entram em contacto com uma superfície metálica ou contra outro conjunto de materiais a altas velocidades. O atrito gerado pelo contacto pode resultar na abrasão da superfície do fio, que, por sua vez, implica uma redução da qualidade das fibras ou até rotura. Este contacto também origina uma acumulação de tensão nas fibras que ao exceder a resistência máxima resulta na rotura das mesmas (Cherif 2016; Gong 2011; Jalal Uddin 2010).

Outras características de relevo no reforço e matriz correspondem à forma e ao diâmetro das suas fibras e filamentos. De acordo com Acar *et al.*, que avaliou o impacto da secção de corte dos filamentos na eficácia do processo de “commingling”, uma forma elíptica ou circular oca apresenta propriedades superiores comparativamente às formas meramente circulares. O aumento da superfície de contacto em relação às secções de corte circulares para a mesma densidade linear, implica uma subida das forças de arrasto, e consequente melhoria do processo de entrelaçamento. No mesmo estudo foi ainda observado que filamentos mais finos apresentam uma melhor qualidade de “commingling”, derivada da menor rigidez torsional que estes possuem. Assim sendo, filamentos com diâmetro reduzido necessitam de menores forças de arrasto para superar a resistência inercial, pelo que ocorre um processo de entrelaçamento mais adequado (Acar, Turton, and Wray 1986). Noutro trabalho, Chathura Nalendra Herath *et al.* avaliaram o grau de homogeneidade de diferentes combinações de reforço (carbono, vidro e aramida) e matrizes termoplásticas (PES, PP e PEEK). A fração volúmica de fibra aplicada foi de 50%, sendo usados dois reforços distintos misturados com um termoplástico por “commingling”. Além disso, os diâmetros do carbono, vidro, aramida, PP, PES e PEEK foram, respetivamente, 7, 14, 12, 17, 9 e 39 μm . Eles observaram que a pressão mais adequada para o processo de “commingling” seria de 0,5 MPA (5 bar), mas esta pressão mostrou ser elevada provocando dano filamentar restringindo a distribuição dos filamentos ao tornar a estrutura mais compacta. Não menos relevante, verificaram que a resistência à tração do PP e PES era superior à obtida pelo PEEK combinado com os reforços. Uma razão apontada para esta diferença, consiste na disparidade elevada do diâmetro do PEEK face aos diferentes reforços. Deste modo, os autores confirmaram o efeito do diâmetro das fibras e filamentos na distribuição e propriedades mecânicas, pelo que os diâmetros dos elementos básicos dos reforços e termoplásticos deverão ter valores semelhantes (Herath *et al.* 2008).

A influência da porosidade e comprimento das fibras nas características de compósito obtidos a partir de fios híbridos de fibra de vidro e PP foi investigada por B.M. Lekube *et al.*. Os autores descreveram um aumento da rigidez, módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos com o aumento do comprimento das fibras, pelo que se justifica o uso de fibras contínuas. Além disso, descreveram a redução da porosidade com o aumento da pressão aplicada durante o pós-processamento (Lekube, Hermann, and Burgstaller 2020). Outros estudos também foram realizados para descrever a influência da torção nos fios híbridos, tendo Jumaev *et al.*, observado que a crescente torção conduzia a um aumento da dureza, da processabilidade do fio híbrido e redução da superfície de corte, bem como a uniformidade da superfície (Torun *et al.* 2012).

Fios “commingled” oferecem uma distribuição praticamente homogénea dos fios de reforço e termoplástico levando a uma percentagem reduzida de vazios. O baixo conteúdo de

vazios provoca, por sua vez, um aumento das propriedades mecânicas, em relação aos restantes processos. O mesmo foi apontado por Alagirusamy e Ogale e por Choi em investigações sobre a influência da distribuição uniforme das fibras e da matriz na secção de corte do fio e nas propriedades mecânicas finais do mesmo (Choi B. D. 2005; Alagirusamy and Ogale 2005).

As suas características mecânicas e estrutura encontram-se dependentes dos parâmetros processuais implementados na técnica de “commingling”, dos quais se destacam: a pressão do ar, sobrealimentação do reforço e da matriz, velocidade de produção e temperatura. No caso particular da sobrealimentação, esta é gerada quando a unidade da alimentação da máquina de “commingling” apresenta uma velocidade superior à criada na secção de enrolamento, potenciando a criação de folgas e menor tensão dos fios, que promove a mistura quando submetidos ao jato de ar (Schäfer et al. 2016). Kravaev *et al.*, que investigaram o impacto de diferentes fatores do processo em fibras de vidro com PA e fibras de vidro com PP, constataram que o aumento da pressão implica uma melhoria da qualidade da distribuição. Também delineou que o aumento da sobrealimentação e redução da velocidade de produção têm um efeito positivo na homogeneidade da mistura (Kravaev et al. 2014). Numa investigação conduzida por Jens Schäfer *et al.*, oito amostras de fios híbridos de carbono “Toho Tenax HTA40 6 K” (com 2x400 tex) e de PPS (com 32x25 tex) foram produzidos por “commingling” com uma pressão de 0,5 e 0,6 MPa (5 e 6 bar), uma sobrealimentação definida de 4 e 6% e uma velocidade de produção que pode adotar 50 e 100 m/min. Tendo em conta os índices de distribuição lateral e radial, os autores avaliaram a qualidade da homogeneidade, observando que o aumento da pressão promove o deslocamento das fibras de carbono e dos filamentos de PPS e que velocidades elevadas têm um impacto negativo na distribuição dos materiais. Em suma, pressões elevadas e velocidades de produção reduzidas permitem uma melhor homogeneização. O mesmo foi observado com o aumento da sobrealimentação do PPS de 4 para 6% (Schäfer et al. 2016).

Hireni Mankodi e Pravin Patel também avaliaram a influência da pressão, sobrealimentação e velocidade de produção na formação de fios híbridos a partir de fios de vidro (2700 denier) e PP (840 denier). As amostras foram criadas com pressões de 0,15; 0,2 e 0,25 MPa (1,5; 2 e 2,5 bar), uma sobrealimentação de 0%, 1% e 2% e velocidade de produção de 50, 75 e 100 m/min. Estes foram posteriormente avaliados quanto às características do fio “commingled”, nomeadamente: densidade linear, tenacidade, frequência, regularidade e estabilidade dos nós. Em relação, à densidade linear observaram que o seu valor máximo era atingido para pressões altas e sobrealimentação elevada. Já na tenacidade, observaram que o seu aumento encontrava-se sobretudo dependente do aumento da sobrealimentação, sendo este efeito acentuado por uma pressão alta e velocidade de produção reduzida (H. Mankodi and Patel 2009). Relativamente à frequência dos nós, eles anotaram que esta aumentava para pressões elevadas e baixas velocidades de produção, não havendo registo de qualquer impacto significativo com a variação da sobrealimentação, pelo que a frequência dos nós é apenas influenciada pela velocidade de produção e pressão. Por outro lado, a regularidade dos nós diminui com o aumento da pressão, pelo que apresenta melhor entrelaçamento. O mesmo foi constatado para uma sobrealimentação de 1% e velocidades baixas. Quanto à estabilidade dos nós, pressões altas e velocidades baixas, bem como velocidades altas e pressões baixas permitiram a obtenção dos melhores valores de estabilidade. Enquanto baixos valores de sobrealimentação em associação com pressão reduzida ou velocidade baixa levam a uma diminuição da estabilidade dos nós. Deste modo, concluíram que a frequência, regularidade e estabilidade dos nós, encontra-se dependente da interação entre os diferentes parâmetros processuais (H. Mankodi and Patel 2009).

Os autores analisaram ainda a qualidade da distribuição na secção transversal após a aplicação de 4 métodos distintos para a conceção de fios híbridos, em particular:

“commingling”, “wrap spinning”, “friction spinning” e uma mistura da técnica de “mingling” com “wrap spinning”. Desta forma, demonstraram novamente, que o “commingling” apresenta a melhor mistura dos elementos face aos restantes. Tendo em conta todos os parâmetros em análise, os melhores resultados foram alcançados com uma pressão de 0,25 MPa (2,5 bar), velocidade de 50 m/min e sobrealimentação de 1% (H. Mankodi and Patel 2009).

Plamen Kravaev *et al.* também investigaram o impacto de parâmetros processuais (pressão, sobrealimentação e velocidade de produção) e características dos materiais (particularmente o número de filamentos nos fios) na qualidade e distribuição da mistura. Segundo o autor, a qualidade da mistura corresponde ao grau de mistura dos elementos do fio e a distribuição da fibra é definida pela homogeneidade da dispersão das fibras e filamentos. A medição da qualidade de mistura foi realizada com recurso a um índice de qualidade, enquanto a distribuição foi analisada através dos índices de distribuição lateral e radial. No estudo foram selecionados três rolos de fibra de vidro com uma densidade linear de 300 ou um rolo de 1200 tex e rolos de PP com 63 tex, com uma fração mássica da fibra de 60%. É de salientar, que a pressão foi variada entre 0,3 e 0,9 MPa (3 e 9 bar), sobrealimentação entre 1 e 3% e que mantendo uma pressão de 0,9 MPa (9 bar) e sobrealimentação de 8% a velocidade de produção assumiu valores de 50 a 100 m/min. Os índices revelaram, novamente, que o aumento da pressão resulta na subida da distribuição e qualidade, atingindo o seu máximo para uma sobrealimentação de 1% e pressão de 0,6 MPa (6 bar). Tal se deve à sobrealimentação gerar filamentos soltos facilmente espalhados pelo jato de ar e a pressão do ar ser responsável pela formação dos nós. No que diz respeito à velocidade de produção concluíram, mais uma vez, que a sua redução promovia a distribuição e qualidade da mistura, sendo a influência acentuada com o aumento da sobrealimentação. Por fim, verificaram que o número de filamentos nos rolos foi o parâmetro com maior peso na disposição e qualidade. Os resultados demonstraram que o uso de um maior número de rolos com baixa densidade linear resulta numa qualidade e distribuição superior face à utilização de somente um rolo grosso, tornando-se este efeito mais evidente com o aumento da velocidade de produção (Kravaev et al. 2014).

Um aspeto importante nos fios “commingled” corresponde aos diferentes tipos de nós capazes de ser criados durante o entrelaçamento das fibras e filamentos. Segundo Miao e Soong, estes podem ser categorizados em nós trançados, entrelaçados, trançados-entrelaçados e nós com o núcleo envolvido. A estrutura dos nós tem um impacto profundo nas características dos fios híbridos, sendo a sua formação derivada das condições de aplicação do jato do ar. Nós entrelaçados resultam de uma abertura inicial adequada das fibras de reforço e filamentos termoplásticos, que permite o movimento destes elementos e seu entrelaçamento, enquanto nós trançados promovem a mistura, mas com uma abertura inicial inferior. Uma mudança na direção do jato de ar atuante leva ao entrelaçamento de grupos de fibras e filamentos parcialmente trançados, dando origem aos fios trançados-entrelaçados. Os nós enrolados resultam da abertura insuficiente por jatos de ar com pressão baixa nas fibras, que fazem com que os filamentos termoplásticos apenas revistam as fibras de reforço. Os nós também podem ser classificados em lado a lado (“side-by-side”) e núcleo (“core”) caso ocorra uma abertura desadequada das fibras e filamentos (Miao and Soong 1995).

Num estudo realizado por V. Ogale e R. Alagirusamy, as estruturas dos nós de fios “commingled” de vidro com PP ou PET ou PA foram analisadas, sendo investigada a evolução da frequência dos nós e grau de entrelaçamento com a variação da pressão do ar e da fração volúmica da matriz. Deste modo, verificaram que a frequência de nós aumentava com a pressão de 0,6 e 0,7 MPa (6 e 7 bar), não observando mudança ao atingir os 0,8 MPa (8 bar). Também se verificou um aumento da frequência com a fração volúmica à exceção da fibra de vidro e PP devido ao diâmetro dos filamentos do termoplástico. O aumento da pressão também foi responsável pelo crescimento contínuo do comprimento médio do nó, que, por sua vez,

implicou uma subida do nível de entrelaçamento, sendo este aumento independente da frequência de nós. Não menos relevante, a elevadas pressões os nós tendem a adotar a estrutura entrelaçada devido à abertura adequada das fibras e filamentos, enquanto a pressões mais baixas surge maior percentagem de nós trançados. É ainda de notar, que pressões superiores à estrutura trançada, mas inferiores à entrelaçada promovem a formação do nó trançado-entrelaçado. Com pressões significativamente baixas dá-se o aparecimento dos restantes géneros de nós. Em acréscimo, não observaram um impacto significativo da fração volúmica da matriz nos restantes parâmetros. Na Figura 21 e Figura 22 observam-se as diferentes estruturas capazes de se formar e secções de corte correspondentes (Alagirusamy and Ogale 2005).

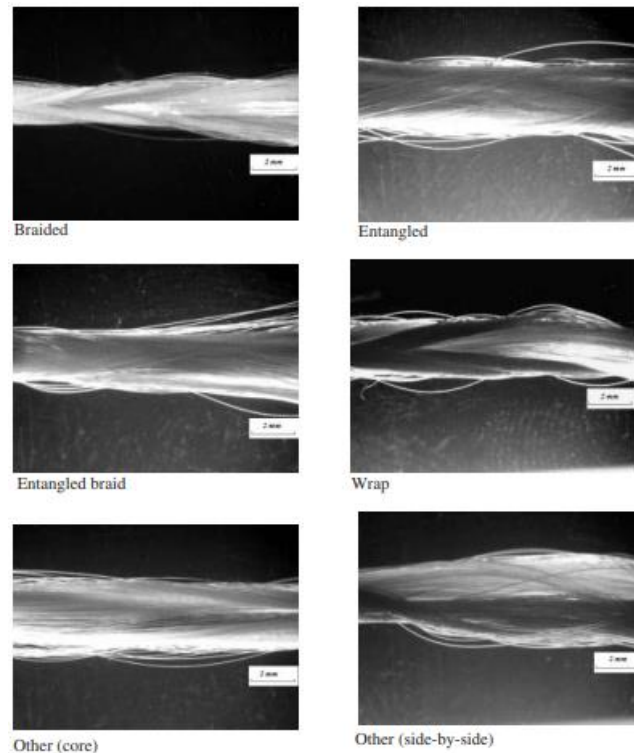


Figura 21 - Diferentes géneros de nós formados durante o processo de "commingling" (Alagirusamy and Ogale 2005)

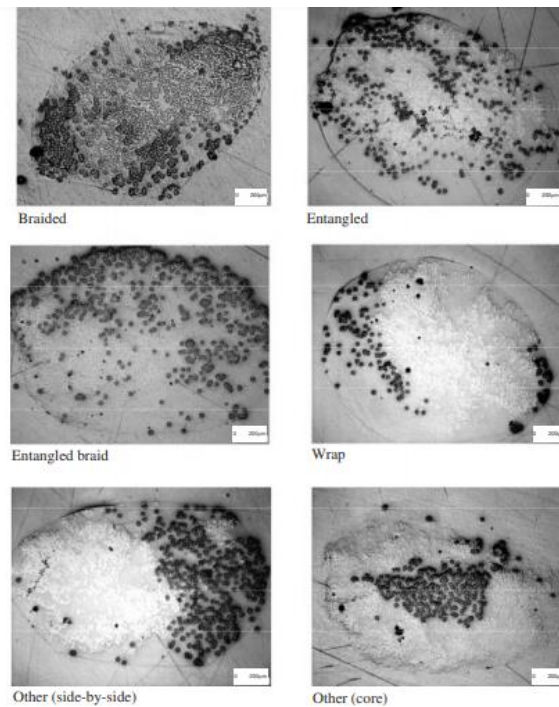


Figure 5. Typical cross sections of nips in GF/PP commingled yarns. (Light fibers: Glass, Dark fibers: PP) (Air pressure: 7 bar, Glass-PP V_m 47%).

Figura 22 - Secções de corte dos diferentes tipos de nós de fios "commingled" de vidro (fibras negras) e PP (filamentos brancos) (Alagirusamy and Ogale 2005)

As fibras de reforço apresentam geralmente fracas propriedades à flexão e compressão, pelo que é essencial o conhecimento do seu comportamento axial e não axial para descobrir o desempenho dos compósitos por estes produzidos. Neste contexto, V. Ogale e R. Alagirusamy, num estudo subsequente, avaliaram as propriedades à tração de fios “commingled” e sua relação com a estrutura dos fios. Foram testados fios com fibras de vidro misturados com três géneros de matrizes, designadamente: PET, PA e PP. É de destacar que as fibras de vidro entram primeiro em rotura face às matrizes devido ao seu alongamento na rotura reduzido. Além disso, a tenacidade na rotura do reforço também é inferior. Os autores constataram que a tenacidade depende predominantemente dos filamentos termoplásticos, enquanto as fibras são responsáveis pelo módulo. A pressão não manifestou grande variação da tenacidade dos fios “commingled”, mas o seu aumento provocou uma redução elevada do módulo dos fios de fibra de vidro e PET e de fibra de vidro e PA. Tal se deve ao aumento da velocidade do jato com a pressão, e consequente desalinhamento das fibras de vidro com o movimento gerado. Por outro lado, o módulo da fibra de vidro e PP não demonstrou grande variação, devido ao grande diâmetro e baixa densidade do PP, que resulta numa baixa eficácia do processo de “commingling”. É de salientar que, à medida que a fração de filamentos termoplásticos aumenta, verifica-se uma redução da tenacidade e do módulo dos fios, e que os nós dos fios “commingled” retêm cerca de 55 a 60% da resistência à tração axial. Além disso, demonstraram, de novo, que a estrutura dos nós afeta a distribuição dos elementos, obtendo-se melhor distribuição com uma forma de nós entrelaçados, entrelaçados-trançados e trançados (“braid”) face aos do género lado a lado e com enrolamento do núcleo (V. Ogale and Alagirusamy 2007).

A humidade também foi apontada como um fator relevante na qualidade final do compósito termoplástico desenvolvido, em virtude de alterações químicas que ocorrem na matriz, como é o caso da oxidação. Num estudo conduzido por Yan Ma *et al.*, o efeito da humidade e calor em compósitos de fibra de carbono (“PYROFIL® TR 50S15L, Mitsubishi

Rayon, Tokyo, Japan”) e PA (“MXD-PA, Mitsubishi Gas Chemical, Tokyo, Japan”) foi analisado. Assim sendo, as amostras obtidas por moldação por compressão foram submersas em água a 80°C (abaixo de T_g) e a 98°C (acima de T_g) durante um período de tempo. Os compósitos também foram sujeitos a jatos de ar seco a 80°C e 98°C para avaliar o impacto de calor. Estes apontaram a inexistência de um efeito negativo significativo nas características à flexão com o aumento da temperatura do ar seco. Contudo, descreveram que o aumento da temperatura da água e humidade era acompanhado por uma redução significativa (cerca de 50%) das propriedades mecânicas, pois era responsável pela degradação da matriz e interface. Wong e Broutman, bem como outros autores confirmaram essa suposição, revelando ainda que a exposição de compósitos a um ambiente húmido culminava na degradação da matriz e propriedades mecânicas, danos irreversíveis na interface reforço/matriz e fraturas na matriz termoplástica (Ma et al. 2018).

Os fios híbridos podem ser transformados em pré-formas, que mais tarde serão aplicadas na criação de termoplásticos de geometrias distintas. “Braids” são exemplos de pré-formas normalmente utilizadas na indústria, sendo o fio híbrido avaliado pela sua capacidade de criar “braids”, ou seja, “braidability”. Novamente, a superioridade dos fios “commingled” foi demonstrada por Ramasamy *et al.*, quando analisaram a capacidade de criação destas pré-formas a partir de fios “commingled” e fios revestidos com pó (Ramasamy, Wang, and Muzzy 1996).

A geometria do bocal de ar engloba a área e forma do canal principal por onde os fios são conduzidos, bem como dimensões e número dos canais de entrada de ar. Em relação, ao diâmetro do canal principal, verifica-se por norma que diâmetros inferiores resultam numa mistura mais consolidada. No entanto, a área de secção encontra-se diretamente dependente da densidade linear e diâmetro das fibras e filamentos. Por outro lado, a geometria do canal revela ser uma característica de enorme relevo pois define como o escoamento do jato de ar irá evoluir.

As principais formas que o canal principal pode adotar correspondem à geometria quadrada, circular, semicircular, triangulares e não circulares (Figura 23). Teoricamente a geometria quadrada fornece uma homogeneização superior que a forma semicircular, que, por sua vez, apresenta uma melhor mistura que a circular. Não menos relevante, a secção triangular é apontada como capaz de permitir uma subida de turbulência aplicando pressões mais baixas face às restantes e formas não circulares tendem a afastar os filamentos do local de turbulência (Hireni R Mankodi 2007; Loughborough University of Technology 1989a; Lazauskas V. 1987; Loughborough University of Technology 1989b). No entanto, numa investigação conduzida pelo INEGI, foram simulados os escoamentos gerados pelos jatos de ar em geometrias distintas e no bocal de ar previamente existente, verificando-se que a melhor forma do canal primário correspondia à circular com dois canais de ar. Nesse estudo, bocais com geometria semicircular (bocal original), quadrada e triangular com somente um jato de ar e, mais tarde, um bocal com dois canais de ar e um canal principal circular foram avaliados. Observaram assim, que a pior mistura ocorreu no semicircular, visto não ser criada turbulência e a sua forma não potenciar o entrelaçamento devido ao embate do fluxo na parede do canal, enquanto o bocal circular permitiu a formação de dois vórtices que promoveram a abertura e mistura dos filamentos, devido também à turbulência e velocidade gerada pela junção dos dois canais de ar. No caso da forma quadrada, o escoamento aleatório criado pode levar ao enrolamento e não ao seu entrelaçamento. Por fim, a geometria triangular apesar de apresentar um aumento da turbulência do escoamento, este não se traduz na formação dos dois vórtices característicos que asseguram a mistura dos fios.

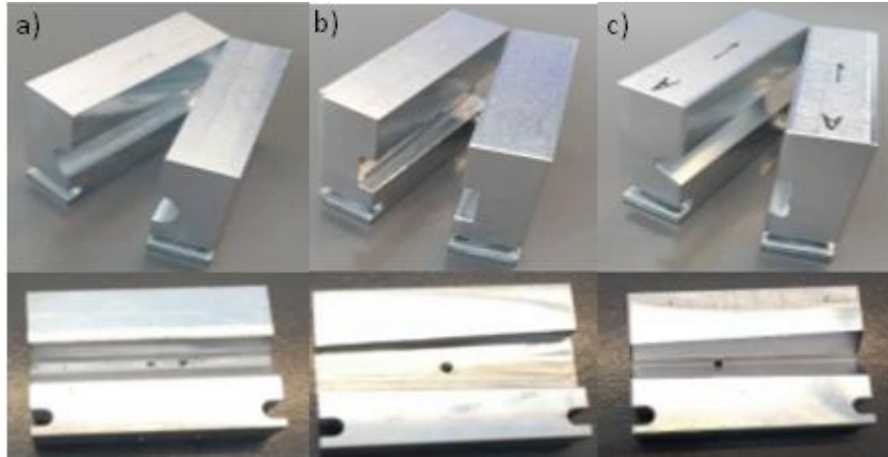


Figura 23 - Exemplos de possíveis geometrias de bocais de ar, em particular: circular (a), quadrada (b) e triangular (c)

O mesmo foi verificado por Hireni Mankodi e Pravin Patel ao investigarem o efeito do design de bocais de ar no “commingling” de fios de fibra de vidro e PP. Além disso, também averiguaram o impacto de certos parâmetros processuais e fração volúmica na distribuição dos fios “commingled”. Para esse fim testaram fios híbridos variando a pressão em 0,5; 0,6 e 0,7 MPa (5, 6 e 7 bar) e sobrealimentação em 0, 1 e 2%, mas mantendo uma velocidade de produção de 50 m/min. Ambos os bocais avaliados apresentavam 2 canais de entrada de ar com uma inclinação de cerca de 15°. Porém, o 1º bocal era de cerâmica com uma secção circular, com diâmetro do canal de fio de 2,5 mm, diâmetro de entrada de ar de 1,5 mm e comprimento de entrada de 40 mm, enquanto 2º bocal era metálico e semicircular com dimensões inferiores em relação ao 1º bocal, em particular 1,5 mm, 1,0 mm e 20 mm, respetivamente (Figura 24). Concluíram assim, que um bocal com uma secção de corte circular e de maiores dimensões permitiu obter propriedades superiores ao bocal semicircular, sendo este efeito mais evidente a pressões de 0,6 e 0,7 MPa (6 e 7 bar) e uma sobrealimentação de 1%, podendo o diâmetro elevado do PP ser um dos responsáveis pelos melhores resultados obtidos pelo uso de áreas maiores. Não menos relevante, verificaram que fios híbridos com um conteúdo de vidro/PP de 40:60 e 75:25 geravam fios homogêneos e que uma proporção de 75:25 fornecia propriedades mecânicas superiores (H.R. Mankodi 2016).

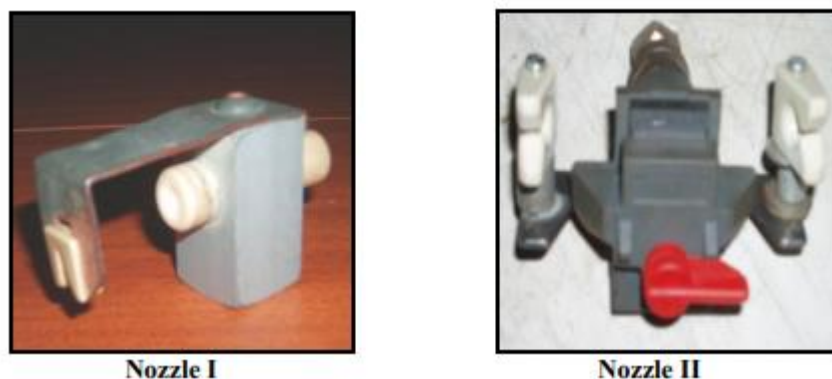


Figura 24 - Geometria de diferentes bocais de ar de "commingling" estudados (H.R. Mankodi 2016)

Na investigação realizada pelo INEGI revelou-se também que o comprimento elevado do canal principal promove a passagem do escoamento turbulento para laminar, reduzindo a mistura. Por outro lado, comprimentos reduzidos também têm um impacto negativo na homogeneidade do fio híbrido. Quanto ao ângulo a aplicar, os autores do estudo apontaram que o uso de um ângulo de 90° entre o canal de ar e o canal principal permite melhor simetria do

escoamento e que, apesar de ângulos diferentes de 90° permitirem também uma distribuição uniforme dos filamentos, estes tornavam as sobrealimentações dos materiais instáveis. É de notar ainda, que a diminuição do diâmetro dos canais de ar possibilita, para a mesma pressão de fonte, um aumento da velocidade e pressão gerada no canal e consequentemente uma subida da homogeneidade da mistura. Todavia, canais maiores apresentaram resultados superiores para fios com maior densidade linear. Além disso, desalinhamentos dos jatos de ar com o canal principal implicaram uma redução da abertura e entrelaçamento, pois um vórtice torna-se dominante, potenciando o enrolamento dos fios. Relativamente ao número de canais, é apontado que o uso de dois canais de ar permite melhorar o fluxo e, por conseguinte, a abertura e entrelaçamento dos materiais.

Na Tabela 16 encontra-se expresso um resumo dos principais fatores relativos às características dos materiais, parâmetros processuais e geometria do bocal, bem como sua influência na qualidade dos fios híbridos e compósitos por eles formados.

Tabela 16 - Síntese dos parâmetros relativos às propriedades dos materiais, parâmetros processuais e geometria do bocal, e sua influência

Classificação	Parâmetro	Conclusões
Propriedades dos materiais	Diâmetro filamental	Deverá apresentar um valor semelhante ou inferior ao diâmetro das fibras para permitir uma distribuição mais homogênea Fios finos revelam maior facilidade de entrelaçamento Os resultados demonstraram que o uso de um maior número de rolos com baixa densidade linear resulta numa qualidade e distribuição superior face à utilização de somente um rolo de maior densidade, tornando-se este efeito mais evidente com o aumento da velocidade de produção
	Comprimento das fibras	A subida do comprimento das fibras provoca um aumento das propriedades mecânicas dos compósitos por elas formados
	Número de fibras e filamentos do fio	Um baixo número de fibras e filamentos é prejudicial ao processo de “commingling”
	Geometria filamental	Uma forma elíptica ou circular oca das fibras e filamentos permite uma melhoria do “commingling” face às circulares
	Fração volúmica da matriz	O aumento da fração volúmica da matriz é normalmente acompanhado pelo aumento da frequência de nós e diminuição do módulo e da tenacidade dos fios
Parâmetros do processo	Temperatura	Uma diminuição da rotura das fibras e filamentos do fio híbrido é obtida ao serem submetidos a um aquecimento entre 25 e 90% da temperatura de fusão dos termoplásticos

	Humidade	Verifica-se uma diminuição das propriedades mecânicas com o aumento da humidade e da temperatura da água
	Sobrealimentação	O somatório das sobrealimentações do reforço e termoplástico deve ser inferior a 45%
		O aumento da sobrealimentação provoca um aumento da qualidade de entrelaçamento e da tenacidade, sendo a tenacidade influenciada sobretudo pelo seu valor
		A sobrealimentação não tem um impacto significativo na frequência dos nós
	Pressão	A estabilidade dos nós é influenciada pela interação da sobrealimentação, pressão e velocidade de produção
		Pressões elevadas geram uma mistura mais homogênea e compacta, mas provocam um maior dano nas fibras
Geometria do bocal		Com o aumento da pressão sucede-se um aumento da frequência dos nós, tenacidade e regularidade dos nós
	Velocidade de produção	Baixas velocidades de produção implicam melhoria da homogeneidade da mistura e redução da frequência dos nós
	Diâmetro do canal principal	Apesar da influência do diâmetro se encontrar dependente do diâmetro das fibras e filamentos e densidade linear do fio, observa-se geralmente uma distribuição e entrelaçamento melhorado com o uso de diâmetros mais pequenos
	Forma do canal principal	A geometria circular do canal primário origina a melhor mistura homogênea, pelo que é superior à forma quadrada, triangular e semicircular
	Diâmetro dos canais de ar	Contata-se um aumento da velocidade e pressão geradas no canal de ar com a redução dos diâmetros dos canais de ar, pelo que se obtêm uma distribuição uniforme das fibras e filamentos
	Número de canais de ar	O impacto deste parâmetro depende de densidade linear dos fios
	Ângulo entre o canal de ar e o canal principal	Observou-se uma mistura melhorada com a implementação de dois canais de ar
		A introdução de um ângulo de 90° entre o canal de ar e canal principal potencia a simetria do escoamento e uma mistura homogênea das fibras e filamentos

Por fim, quanto à estrutura, observa-se uma enorme escassez de estudos acerca da implementação e criação de novas etapas e componentes no processo de “commingling” e informação acerca da influência da geometria ou posicionamento de diferentes elementos. Assim sendo, atendendo à enorme importância deste parâmetro, o presente trabalho debruçar-se-á na projeção e introdução de novas secções e peças no equipamento de “commingling”, como se verá em melhor detalhe no capítulo “Desenvolvimento do processo produtivo”.

2.4.3 Avaliação da qualidade do fio híbrido

A qualidade final do fio híbrido produzido é avaliada através da realização de diferentes testes capazes de determinar as características superficiais, grau de homogeneidade, propriedades à tração, propriedades à flexão, comportamento não axial, entre outros. Outros critérios de interesse na análise da qualidade final dos fios híbridos englobam a resistência à compressão, o atrito, o nível de desgaste e características de processamento, como “braidability” (V. Ogale and Alagirusamy 2007; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). No caso particular do desgaste (indicado em percentagem), este traduz-se na aplicação de uma deformação nos nós que varia entre 0 e 5% durante 10 ciclos de modo a analisar a estabilidade dos mesmos, sendo obtido a partir da equação 2.4.3.1 (Alagirusamy and Ogale 2005).

$$\text{Desgaste} = \frac{(\text{trabalho realizado no 1}^{\text{o}} \text{ ciclo}) - (\text{trabalho realizado no 10}^{\text{o}} \text{ ciclo})}{\text{Trabalho realizado no 1}^{\text{o}} \text{ ciclo}} \times 100 \quad (2.4.3.1)$$

Relativamente à regularidade da mistura, esta pode ser classificada segundo o índice de distribuição radial (R_d), o índice de distribuição lateral (L_t) e pelo grau de entrelaçamento. Além disso, a análise microscópica de secções de corte do fio híbrido revela ser um critério qualitativo fulcral na classificação do nível de homogeneidade da mistura. A medição de R_d e L_t do reforço e termoplástico constituem parâmetros ideais para a caracterização da homogeneização, já que revelam, respetivamente, o comportamento migratório da fibra (caso ela se desloque para a superfície ou centro da secção de corte) e a uniformidade da distribuição dos elementos distintos na secção de corte do fio híbrido (Schäfer et al. 2016; V. Ogale and Alagirusamy 2007).

O R_d da fibra é determinado pelo quociente entre a distância média dos filamentos de reforço do centro da secção de corte (R_c) e a distância de todos os filamentos do centro (R_a) (equação 2.4.3.2). No caso do R_d do termoplástico, este passa pela simples substituição do R_c pela distância média dos filamentos do termoplástico do centro da secção de corte (R_p). Desta forma, o R_d indica se os filamentos tendem a mover-se para a superfície ou aproximar-se do centro da secção de corte caso o seu valor seja superior ou inferior a 1, respetivamente, sendo 1 a indicação de uma distribuição uniforme (Schäfer et al. 2016).

$$R_d = \frac{R_c}{R_a} \quad (2.4.3.2)$$

Onde:

R_d , índice de distribuição radial

R_c , distância média dos filamentos de reforço do centro da secção de corte

R_a , distância de todos os filamentos do centro

Os elementos R_c , R_p e R_a são determinados através das coordenadas centrais das fibras e das coordenadas da matriz, assim como, com recurso às coordenadas centrais de todos os filamentos, o número de fibras de reforço e o número de filamentos de termoplástico, tal como se verifica nas equações 2.4.3.3, 2.4.3.4 e 2.4.3.5 (Schäfer et al. 2016).

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sqrt{[X_c(i) - C_x]^2 + [Y_c(i) - C_y]^2}}{N_c} \quad (2.4.3.3)$$

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \sqrt{[X_p(i) - C_x]^2 + [Y_p(i) - C_y]^2}}{N_p} \quad (2.4.3.4)$$

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sqrt{[X_c(i) - C_x]^2 + [Y_c(i) - C_y]^2}}{N_c + N_p} + \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \sqrt{[X_p(i) - C_x]^2 + [Y_p(i) - C_y]^2}}{N_c + N_p} \quad (2.4.3.5)$$

Onde:

$X_c(i)$, coordenadas centrais (i) das fibras

$Y_c(i)$, coordenadas centrais (i) da matriz

C_x , coordenadas centrais de todos os filamentos na direção x

C_y , coordenadas centrais de todos os filamentos na direção y

N_c , número de fibras de reforço

N_p , número de filamentos de termoplástico

Em relação ao L_t , a uniformidade é indicada pela sua proximidade do valor nulo, enquanto o seu afastamento do zero revela o seu oposto. O cálculo deste indicador envolve as coordenadas centrais de todas as fibras do reforço e é efetuado através da equação 2.4.3.6 (Schäfer et al. 2016).

$$L_t = \frac{\sqrt{(C_{xc} - C_x)^2 + (C_{yc} - C_y)^2}}{R_a} \quad (2.4.3.6)$$

Onde:

L_t , índice de distribuição lateral

C_{xc} , coordenadas centrais de todas as fibras do reforço na direção x

C_{yc} , coordenadas centrais de todas as fibras do reforço na direção y

No caso da determinação do grau de entrelaçamento, este consiste no quociente entre o somatório do comprimento total dos diversos nós e o comprimento do fio híbrido em análise, sendo esta expressa pela equação 2.4.3.7 (Alagirusamy and Ogale 2005).

Grau de entrelaçamento (%)

$$= \frac{\text{Comprimento total dos nós do fio híbrido}}{\text{Comprimento do fio híbrido}} \times 100 \quad (2.4.3.7)$$

Alguns dos critérios de maior interesse na avaliação do desempenho dos fios híbridos, consistem nas propriedades destes quando sujeitos à tração, permitindo descobrir a resistência máxima à tração, alongamento à rotura, módulo de Young e tenacidade. Estas podem ser medidas através de uma máquina de tração, que permite também determinar as curvas força em função do alongamento. Em acréscimo, com o conhecimento da densidade linear e seu comprimento é possível converter a curva previamente determinada, na curva de tensão em

relação à deformação e calcular a tenacidade, deformação na rotura e módulo inicial (Schäfer et al. 2016; V. Ogale and Alagirusamy 2007; Kothari and Timble 1991). No caso particular da análise de laminados unidirecionais o módulo de Young poderá ser calculado pela lei das misturas definida pela equação 2.4.3.8 (Schäfer et al. 2016).

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.4.3.8)$$

Onde:

E_c , valor do módulo de Young do laminado

E_f , módulo da fibra

E_m , módulo da matriz

V_f , fração volúmica do reforço

V_m , fração volúmica do termoplástico

As análises das propriedades à tração podem ser realizadas segundo diversas normas internacionais, das quais se destacam: a ISO 2062 e a norma ASTM 2256-02. De acordo com a norma ISO 2062, o registo da força e alongamento ocorre numa amostra de fio sujeita à tração até surgir a rotura da mesma numa máquina CRE (Standard 1995). Em relação à ASTM 2256-02, esta norma possibilita a medição da força de rotura e respetivo alongamento, bem como obtenção do módulo de Young e tenacidade de rotura (razão entre força de rotura e densidade linear expressa em cN/tex) de fios monofilamentares, multifilamentares, entre outros. As amostras podem seguir 3 formas distintas, nomeadamente: em linha reta, com nós ou ondulada. Em acréscimo, estas amostras podem estar sujeitas a condições ambientais distintas (temperatura ambiente, molhadas submersas, molhadas e não submersas, entre outros) (V. Ogale and Alagirusamy 2007).

Durante o pós-processamento dos fios híbridos em compósitos de geometria complexa, estes são sujeitos a adotar formas curvilíneas sob tensão, gerando uma acumulação de forças transversais ao eixo dos fios individuais, que, por sua vez, resulta na migração das fibras de reforço e consequente distribuição não uniforme e impregnação desadequada. Em acréscimo, dada a baixa resistência à flexão das fibras, estes elementos sofrem danos durante a aplicação do jato de ar e no decurso do pós-processamento, pelo que o conhecimento do seu comportamento à flexão é fundamental. Segundo a ASTM D790-07, a avaliação da capacidade do material à flexão pode ser determinada através da realização de ensaios à flexão de 3 pontos em laminados de fios híbridos consolidados e com recurso a uma máquina de testes universal. A realização destes ensaios permite analisar as propriedades referentes à resistência máxima à flexão, alongamento e módulo de Young (V. Ogale and Alagirusamy 2007; Kothari and Timble 1991).

No entanto, a conceção dos laminados exige a realização de um maior número de etapas, custo acentuado e equipamento adequado à sua conceção, pelo que surgiram diferentes técnicas para analisar o comportamento não axial dos fios híbridos sem recorrer ao seu pós-processamento. Uma das principais técnicas consiste na execução de testes à tração de fios híbridos com nós, permitindo assim estudar o comportamento dos fios híbridos quando adquirem formas complexas ou curvas.

Quanto às características superficiais, estas englobam sobretudo o volume físico, a frequência dos nós, bem como a sua estabilidade e regularidade.

A determinação do volume físico baseia-se na razão entre a massa específica ou volume específico dos fios de reforço e termoplástico singular com a densidade do fio híbrido produzido. As massas específicas dos diferentes elementos necessários são determinadas pelo

quociente entre a massa e volume correspondente, sendo a massa extraída a partir da colocação dos fios de reforço, termoplástico e híbrido na máquina de enrolamento, sob a mesma tensão, e os volumes obtidos com recurso à medição dos respectivos diâmetros dos fios. Na equação 2.4.3.9 encontra-se expressa o cálculo para a obtenção do volume físico em percentagem (Kothari and Timble 1991).

$$Volume\ Físico = \frac{\rho_{reforço} + \rho_{termoplástico}}{\rho_{fio\ do\ híbrido}} \times 100 \quad (2.4.3.9)$$

Onde:

$\rho_{reforço}$, massa específica do fio do reforço

$\rho_{termoplástico}$, massa específica do fio do termoplástico

$\rho_{híbrido}$, massa específica do fio do híbrido

No que se refere à frequência dos nós, esta corresponde ao número de nós por metro de fio híbrido, permitindo avaliar a qualidade do entrelaçamento do fio híbrido. A sua determinação passa pela contagem manual dos nós obtidos após o processo de “commingling” seguido da sua razão pelo comprimento total do fio em causa, sendo definido pela equação 2.4.3.10 e seu valor indicado em nós por metro. Igualmente, a estabilidade dos nós (expressa em ciclos) é um parâmetro qualitativo que consiste na aplicação manual de força até ocorrer a eliminação do nó em análise.

$$Frequência\ dos\ nós = \frac{Número\ total\ de\ nós\ do\ fio\ híbrido}{Comprimento\ total\ do\ fio\ híbrido} \quad (2.4.3.10)$$

Por último, a regularidade dos nós, indicada em centímetros, é determinada a partir do comprimento de abertura dos nós, que também pode ser analisada pelo respetivo grau de abertura. Deste modo, boas propriedades de entrelaçamento são obtidas através de valores reduzidos da regularidade de nós. Este critério encontra-se intrinsecamente conectado à pressão e velocidade a que os fios híbridos foram sujeitos (H. Mankodi and Patel 2009).

2.5 Pós-Processamento

Durante as últimas décadas, os compósitos termoplásticos têm vindo a ser cada vez mais empregues em aplicações que requerem massa reduzida anteriormente dominadas por materiais metálicos de alto custo. A sua versatilidade, capacidade de produção em larga escala, maleabilidade, resistência ao impacto e ciclo reduzido são apontadas como as principais razões responsáveis pelo seu crescente uso. Assim sendo, os fios híbridos, em particular os fios “commingled”, surgem como materiais de excelência para a conceção de compósitos (V and Kandasubramanian 2020).

A transformação dos fios híbridos em produtos finais pode ser atingida com recurso a diversos métodos de pós-processamento, sendo a temperatura selecionada, taxa de arrefecimento, taxa de aplicação da pressão, pressão máxima e tempo de consolidação os parâmetros mais influentes (V and Kandasubramanian 2020; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). Atendendo ao impacto que os processos têm na qualidade final do compósito, eles serão devidamente tratados subsequentemente.

2.5.1 Moldação por compressão

A moldação por compressão é considerada um método de excelência para a conceção de compósitos termoplásticos estruturais, já que apresenta um rápido ciclo de produção, baixo investimento e versatilidade de design. Porém, as componentes produzidas não possuem

espessura uniforme (Bernet et al. 2001). O processo resume-se à compressão entre o molde superior e inferior das fibras de reforço e filamentos de termoplástico aquecidos de modo a preencher a cavidade e obter a componente final (V and Kandasubramanian 2020).

Num estudo realizado por Vinayak Ogale e R. Alagirusamy foram avaliadas as propriedades mecânicas de laminados obtidos a partir de moldação por compressão, enrolamento filamentar e empilhamento filamentar (“film stacking”) de fios “commingled”. Os autores constataram que a moldação por compressão apresentava um conteúdo de vazios inferior às restantes, e subsequentemente propriedades à tração superiores (Vinayak Ogale and Alagirusamy 2008).

Numa variante denominada por termoconformação (Figura 25), compósitos termoplásticos de espessura uniforme podem ser criados a partir de placas de fio híbrido pré-consolidado, obtidas por prensagem por cones duplos (“double belt press”), como indicado pela Figura 26. Após a inserção das placas no sistema procede-se ao aquecimento e fusão do material, que é de seguida sujeita a um aumento da pressão com o fecho do molde superior e molde inferior. O conjunto é pressurizado durante 10 a 20 segundos antes da abertura e extração da peça final. Posteriormente, com a consolidação do material completa é retirado o compósito com a forma desejada (Bernet et al. 2001).

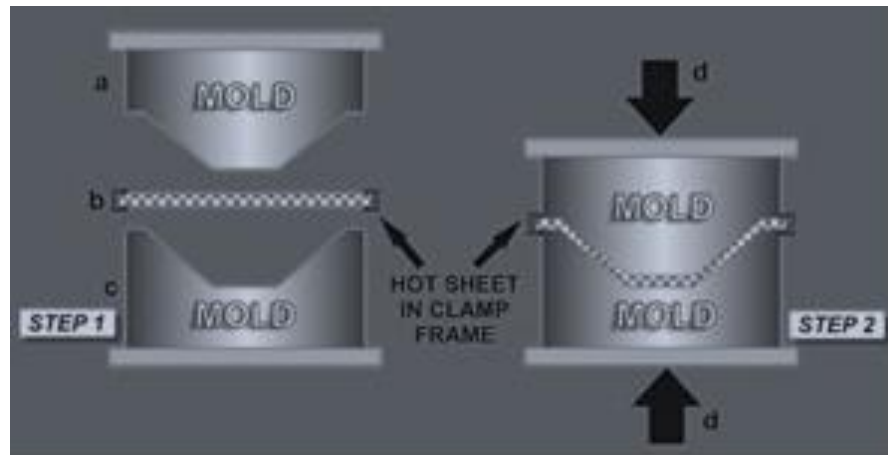


Figura 25 - Ilustração do processo de termoconformação

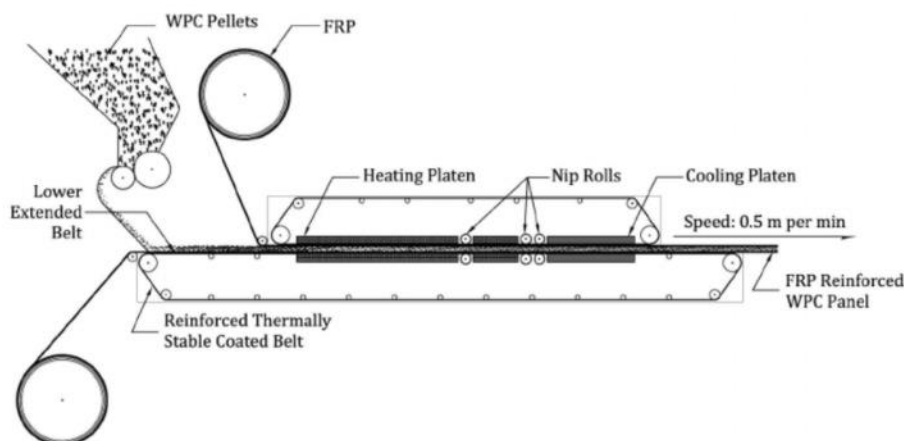


Figura 26 - Representação esquemática da prensagem por cones duplos (V and Kandasubramanian 2020)

2.5.2 Moldação em autoclave

Moldação em autoclave (Figura 27) é uma técnica com maior versatilidade na orientação das fibras depositadas e capaz de produzir peças com maior fração volúmica de fibras e de

qualidade superior às obtidas por termoconformação. Tal deve-se ao método de aplicação de calor e pressão. Em acréscimo, ela possibilita a criação de componentes de grandes dimensões e geometria complexa (V and Kandasubramanian 2020).

Em primeiro lugar as fibras de reforço e filamentos termoplásticos são colocadas numa base com a orientação desejada, sendo depois as camadas soldadas para impedir o movimento relativo entre as camadas de fio híbrido. De seguida o conjunto é introduzido num saco de vácuo e inserido num forno “autoclave”, onde após um ciclo de pressão e calor ser aplicado, e a peça final é retirada. De modo a assegurar a qualidade de consolidação, geralmente a pressão aplicada durante 1 minuto encontra-se restrita 0,1 MPa (V and Kandasubramanian 2020).

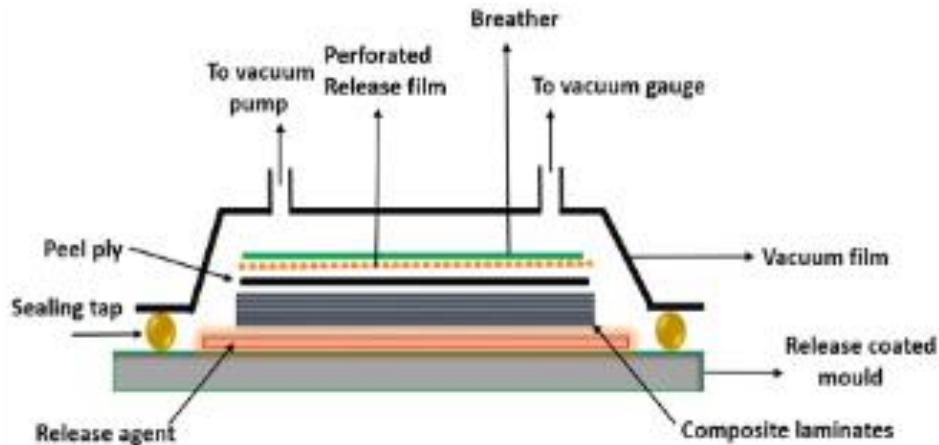


Figura 27 - Sistema de moldação por autoclave (V and Kandasubramanian 2020)

2.5.3 Enrolamento filamental

Enrolamento filamental (Figura 28) corresponde a outro processo para conceção de compósitos termoplásticos, caracterizado por possibilitar um estágio de cura é eliminado. Tal deve-se ao enrolamento do material em torno de um mandril, onde é simultaneamente submetido a pressão e aquecimento na zona de contacto entre o rolo e o mandril, ocorrendo numa única etapa a deposição do material, fusão do termoplástico e sua consolidação (V and Kandasubramanian 2020; Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998). Além do mandril, o mecanismo de enrolamento filamental é constituído por rolos de compactação, guiamentos e um sistema de aquecimento. Esta técnica é adequada para a produção de peças abertas ou elementos estruturais fechados, como tubos, cilindros e tanques. Apesar de apresentar um baixo nível de acabamento superficial, este processo destaca-se pela sua elevada taxa de produção e capacidade de distribuir o fio híbrido ao longo de todo o corpo (V and Kandasubramanian 2020). Além disso, o uso de tensões não uniformes nesta técnica e a desigualdade de valores da rigidez do reforço e matriz, resultam num retrocesso do entrelaçamento, que conduz a uma impregnação insuficiente das fibras (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

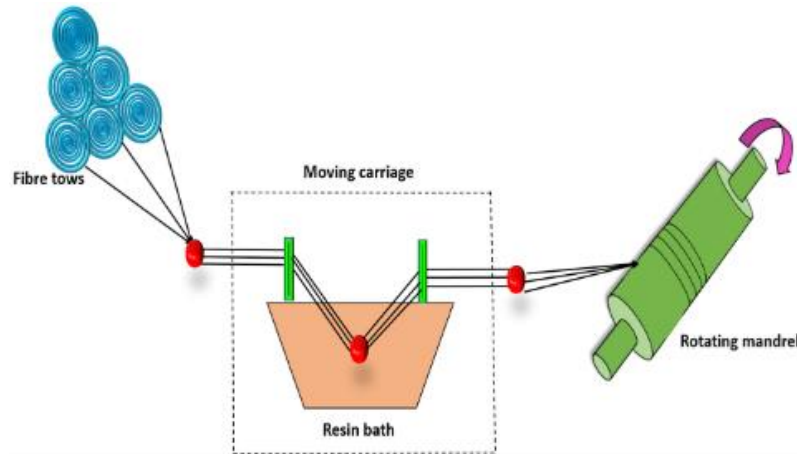


Figura 28 - Esquema do processo de enrolamento filamental (V and Kandasubramanian 2020)

2.5.4 Pultrusão

Apesar das dificuldades existentes com a elevada viscosidade dos termoplásticos e consequente necessidade de forças de puxo elevadas, a pultrusão surge como um método ideal quando se requer elevada precisão e uniformidade das secções transversais dos compósitos (Figura 29). Não menos relevante é a poupança de material e energia, caraterísticos deste processo de fabrico.

A pultrusão tem início com a alimentação e passagem do fio híbrido da bobina para uma câmara de pré-aquecimento, sendo posteriormente encaminhado para a fieira que lhe confere a forma. Esta estrutura, consiste numa câmara de aquecimento onde a matriz termoplástica funde e impregna o reforço, sendo prosseguida pela polimerização, cura e conformação na forma final desejada (V and Kandasubramanian 2020). No entanto, dá-se o mesmo fenómeno de desentrelaçamento visualizado no enrolamento filamental (Svensson, Shishoo, and Gilchrist 1998).

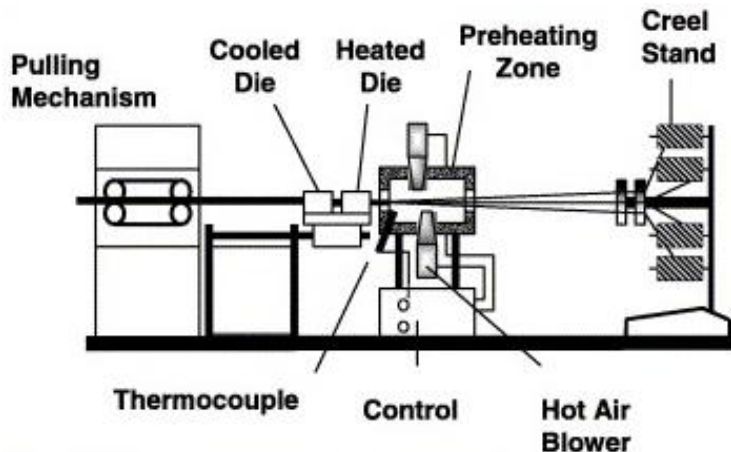


Figura 29 - Ilustração da técnica de pultrusão da direita para a esquerda (Angelov et al. 2007)

2.5.5 “Bladder inflation moulding”

De modo a mitigar as limitações presentes na conceção de componentes ocas, o processo denominado por “Bladder inflation moulding” (Figura 30) oferece uma alternativa para a produção de peças ocas economicamente competitiva. Este método, como o próprio nome indica, requer a utilização de um mandril polimérico capaz de expandir, isto é, um “Bladder”. O processo inicia-se com a colocação em torno do mandril de pré-formas obtidas a partir de

fios híbridos, seguida da introdução do conjunto dentro de um molde e posteriormente numa prensa térmica de pratos quentes. O aquecimento gradual do material é acompanhado pela expansão do mandril, que pressiona o material contra as paredes da cavidade do molde de modo a adquirir a forma pretendida. Por fim, a peça é retirada da prensa e do molde, seguida da extração do mandril (Bernet et al. 2001).

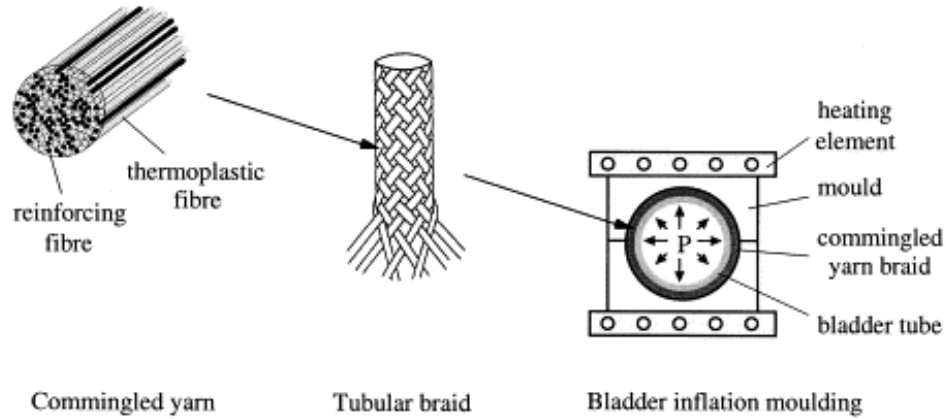


Figura 30 - Representação esquemática de "Bladder inflation moulding" através de "braids" tubulares de fios commingled (Bernet et al. 2001)

2.5.6 Processamento integrado

Processamento integrado ("integrated processing") incorpora diferentes etapas da transformação do fio híbrido num compósito, desde a concepção do fio até à impregnação da fibra, numa só unidade de produção. Normalmente robotizado, esta técnica possibilita a disposição dos fios híbridos na direção que requer mais resistência e rigidez, enquanto o termoplástico é sobre injetado para a componente adquirir a forma final (Bernet et al. 2001).

Na Figura 31 observa-se a metodologia da técnica de processamento integrado, começando pela criação de uma pré-forma feita a partir de PA 12 por injeção para servir de suporte para o restante conjunto. Com a base construída, procede-se à introdução e orientação dos fios híbridos de fibra de carbono e PA12 por um bocal aquecido com auxílio robótico para assegurar a sua disposição, sendo acompanhada pela sua compactação devido à pressão exercida por um peso colocado no bocal. Posteriormente, durante a consolidação final dos fios é realizada a sobre injeção de PA 12 aquecida na ordem dos 280°C a uma pressão de cerca 90 MPa (900 bar) nos fios "commingled", obtendo-se a peça final (Bernet et al. 2001).

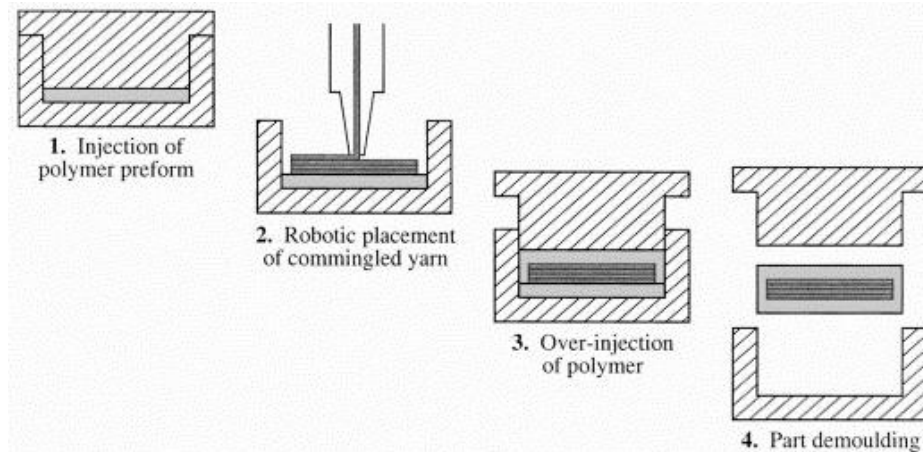


Figura 31 - Ilustração da técnica de processamento integrado com colocação robótica do fio e injeção do polímero (Bernet et al. 2001)

2.5.7 Colocação automática de fibra com matriz termoplástica

A título de curiosidade um método inovador na concepção de compósitos termoplásticos reforçados com fibras com um elevado nível de automação e precisão, corresponde ao processo denominado por colocação automática de fibra com matriz termoplástica (TAFP) (Figura 32). Apesar de utilizar filmes pré-impregnados e não fios híbridos, o grande interesse neste sistema deve-se à possibilidade de eliminação da etapa de pós-consolidação, que resulta na eliminação da necessidade da técnica de autoclave, bem como na redução do custo de funcionamento e aquisição. TAFP recorre a um laser para o aquecimento dos filmes e fusão do termoplástico, sendo estes posicionados e compactados através de um rolo de consolidação (Denkena, Schmidt, and Kaczemirzk 2021).

Para evitar as perdas de temperatura derivadas do aquecimento por laser e melhorar a qualidade de consolidação requer-se a introdução de vibrações sub-ultrassónicas no rolo de consolidação. A excitação do cilindro permite a diminuição da quantidade de calor dissipado e redução da viscosidade do termoplástico. Deste modo, melhora-se o contacto entre as camadas e consolidação das fibras, levando a uma qualidade de consolidação superior (Denkena, Schmidt, and Kaczemirzk 2021).

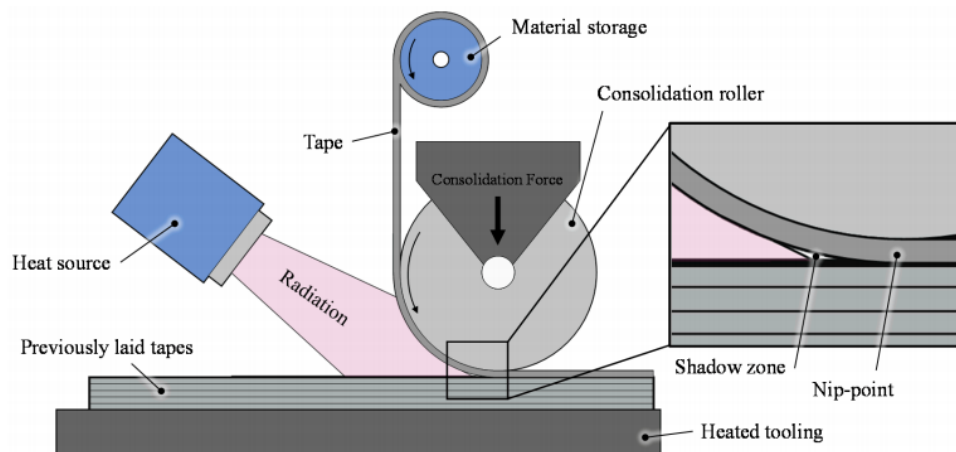


Figura 32 - Representação esquemática da técnica de "Thermoplastic Automated Fiber Placement" (Denkena, Schmidt, and Kaczemirzk 2021)

As vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de pós-processamento anteriormente referidas encontram-se expressas na Tabela 17.

Tabela 17 - Vantagens e desvantagens de diferentes métodos de pós-processamento

Processo	Vantagens	Desvantagens
Moldação por compressão	Processo de investimento reduzido e com um rápido ciclo de produção Peças de design versátil Componentes possuem um conteúdo de vazios reduzidos Possui variantes, como a Termoconformação, capazes de produzir peças uniformes	Não assegura uma espessura uniforme das peças
Moldação por “autoclave”	Processo que gera peças com propriedades mecânicas superiores à termoconformação Controlo da orientação das fibras depositadas Capaz de gerar peças complexas de elevadas dimensões	Possibilidade de ocorrer uma impregnação incompleta Grande desperdício de material
Enrolamento filamentar	Eliminação do estágio de cura Geração de componentes abertas ou fechadas Boa orientação dos fios híbridos Taxa de produção elevada	Acabamento superficial fraco Tendência de uma impregnação incompleta devido ao desentrelaçamento criado pelo uso de tensões não uniformes
Pultrusão	Formação de compósitos com elevada precisão	Desentrelaçamento gerado pela aplicação de tensões não uniformes, que levam a uma baixa impregnação
“Bladder inflation moulding”	Fabrico de peças ocas	Limitado à produção de peças ocas
Processamento integrado	Criação do fio híbrido e compósito numa só unidade	Investimento elevado
Colocação automática de fibra com matriz termoplástica	Baixo custo de aquisição e funcionamento Não requer a técnica de autoclave	Limitado ao uso de filmes pré-impregnados

3 Desenvolvimento do processo produtivo

Atendendo à relevância do equipamento de “commingling” na obtenção de um fio híbrido homogêneo, com dano filamentar reduzido e desempenho melhorado, este capítulo vem apresentar o trabalho desenvolvido para adaptação de algumas etapas do processo em função da máquina de “commingling” pré-existente.

Deste modo, o funcionamento do equipamento e seus componentes foram alvo de estudo, referindo os benefícios e desvantagens do estado prévio da máquina. De seguida, procedeu-se à análise das zonas de intervenção e componentes a implementar nas novas estações. Mais tarde, sucede-se a descrição da evolução do projeto da máquina em causa, em particular das secções e peças. Por fim, aborda-se a versão final das diferentes estações e seus componentes, vantagens da sua instalação, simulação estrutural dos conjuntos principais, listagem de componentes e desenhos técnicos e de montagem.

3.1 Análise do equipamento “commingling”

As propriedades dos fios híbridos e qualidade de homogeneização encontram-se dependentes das propriedades dos materiais dos fios em questão, características dos fios e parâmetros de processamento. O design da máquina de “commingling” e seus elementos têm uma relação direta com diferentes parâmetros de processamento, pelo que consequentemente tem uma influência no fio híbrido fabricado, sendo essencial a sua análise para a otimização do processo de “commingling”.

O processo de “commingling” permite o entrelaçamento de fios de reforço e de termoplástico obtendo-se assim uma mistura homogênea, boa impregnação dos elementos de reforço e um bom comportamento do material quando consolidado. Este processo tradicionalmente inicia-se com a colocação dos rolos de matéria-prima nos suportes (1) seguindo-se o desenrolamento dos mesmos através dos cilindros (2) e (5), que permitem também que os filamentos desenrolados estejam em sobrealimentação ou esticados de acordo com as velocidades relativas existentes e tensão aplicada. Após a passagem dos fios pelos rolos de alimentação, o fio prossegue para os guias de suporte (3) que conduzem os fios para a câmara de mistura (4) onde ocorre o entrelaçamento homogêneo dos filamentos através de um jato de ar pressurizado. Posteriormente, o fio híbrido é transferido para os cilindros de entrega e de seguida para o enrolador (6) onde o fio híbrido é bobinado e puxado. A Figura 33 e Figura 34 mostram a estrutura e componentes do equipamento de “commingling” original tal como foi anteriormente descrita. É de anotar que o uso de “godets” com rolo de transferência (2 e 5) permite diminuir os custos de aplicar “godets” duplos, assim como, a utilização de motorização em cada “godet” individual possibilita o uso de velocidades relativas distintas para que os fios sofram sobrealimentações e tensões diferentes. Além disso, o sistema de fixação dos rolos dos fios de reforço e dos termoplásticos não garante a saída precisa do fio.

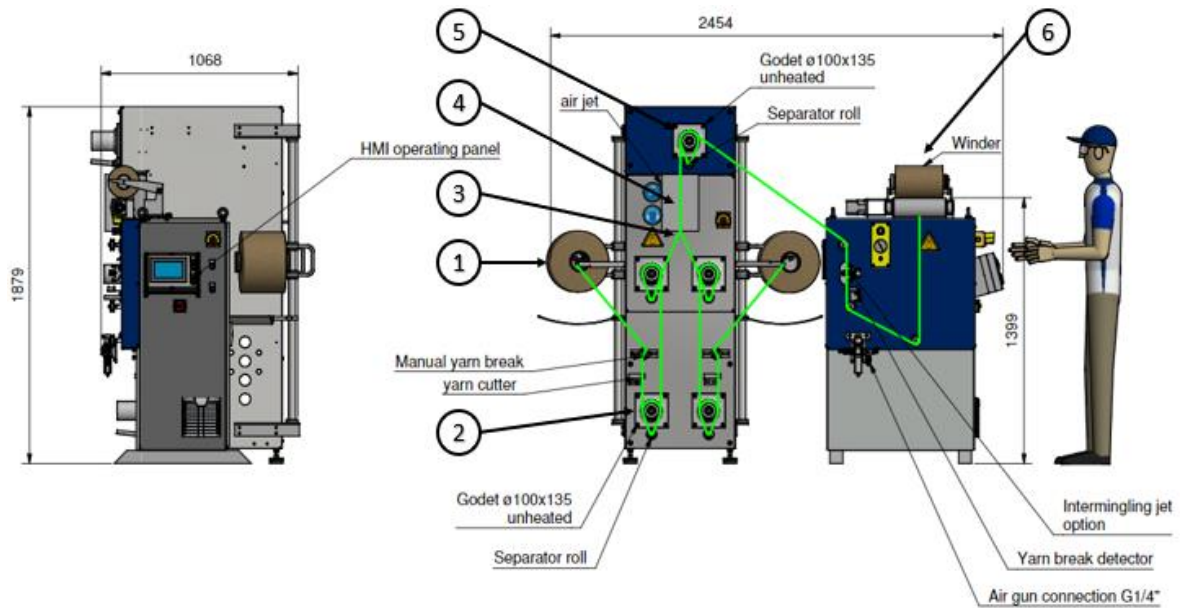


Figura 33 - Representação esquemática da estrutura de “commingling” original, que engloba os suportes do rolo do fio (1), conjuntos de cilindros (2 e 5), guias de suporte (3), câmara de mistura (4) e enrolador (6)



Figura 34 - Máquina de “commingling” existente, onde 1 corresponde aos suportes do rolo do fio, 2 e 5 ao conjunto de cilindros, 3 ao suporte de guiamentos, 4 à câmara de mistura e 6 ao enrolador

O método tradicional de “commingling” tipicamente permite uma boa homogeneização dos elementos integrantes do fio híbrido, contudo este possui as seguintes dificuldades que devem ser mitigadas:

- Pressões elevadas aplicadas pelo jato de ar provocam danos nas fibras de reforço e possível rotura, que, por sua vez, implicam uma degradação das propriedades do produto final. Este problema é acentuado pelo estiramento distinto da fibra de reforço e filamento termoplástico e pelo facto de os reforços possuírem fracas propriedades ao corte e tensões transversais

- Cargas excessivas podem levar a um movimento relativo entre as fibras (“fiber migration”) e os filamentos, podendo provocar uma má homogeneização e diminuição das características mecânicas do fio “commingled”.

Desta forma, procedeu-se de seguida à análise de possíveis soluções em termos de estrutura do sistema com o objetivo de mitigar ou até mesmo eliminar estes obstáculos e tornar o “commingling” num método ainda mais atrativo.

3.2 Otimização do processo produtivo

De modo a reduzir a pressão aplicada durante a conceção do fio “commingled” sem comprometer a qualidade da mistura dos materiais foram redesenhadas etapas do processo adaptando-as à máquina de “commingling” existente.

Tendo em conta a análise da estrutura e processo da máquina de “commingling”, é possível destacar como zonas de intervenção: a zona de fixação e colocação dos rolos de alimentação e a região do guiamento antes do espalhamento. Não menos relevante, também será apresentado o desenvolvimento de um setor responsável pelo espalhamento individual dos fios de reforço e termoplástico e sua pré-mistura, permitindo diminuir a pressão necessária do jato de ar e consequentemente, reduzir o dano das fibras, sem perda da homogeneidade da mistura.

3.2.1 Estação de alimentação

A análise do equipamento de “commingling” existente revela que os rolos de reforço e de termoplástico devem ser capazes de cumprir os seguintes requisitos técnicos:

- Montagem e colocação simples de modo a reduzir o tempo de troca do rolo aquando do fim deste
- Impedir que material perca tensão durante o movimento dos cilindros motorizados do sistema.

Quanto ao primeiro requisito, a fácil colocação e remoção do material passa pela existência de uma extremidade de fácil acesso que possui um número reduzido de peças a retirar durante o manuseamento do rolo de alimentação.

A saída de material pelo puxo dos cilindros, cria zonas de baixa tensão que impedem o funcionamento adequado do processo, ao reduzir o paralelismo dos filamentos e consolidação do fio híbrido. Posto isto, o projeto deverá ter em conta a direção de desenrolamento do rolo de fio, tendo-se verificado que a direção de saída do fio mais indicada deverá ser perpendicular ao eixo do rolo de alimentação.

3.2.2 Estação de guiamento

Quanto à região responsável pelo guiamento dos fios provenientes dos rolos de alimentação para a secção de espalhamento, será adotado um guiamento de pequenas dimensões que potencia a separação e dispersão das fibras e filamentos devido à sua superfície curva e de acordo com o posicionamento dos diferentes rolos. Estes elementos também possuirão uma superfície suave de modo a não danificar os fios. Além disso, o guiamento assegura a centragem dos fios antes de estes atingirem os rolos de espalhamento.

A relevância deste guiamento foi demonstrada por Muhammad Awais Naeem *et al.* em dois estudos sucessivos em fios de algodão e poliéster, sendo na Figura 35 observada a forma peculiar do guiamento responsável pelo aumento da qualidade do fio híbrido final. Nesses estudos verificou-se um aumento da largura de espalhamento, tenacidade, resistência e

extensão de rotura, bem como a formação de fios mais compactos com a sua implementação. Além da geometria e dimensões do guiamento, o seu posicionamento também possui um papel essencial, pelo que deverão encontrar-se próximos e alinhados com o centro do rolo de espalhamento para ocorrer uma dispersão uniforme das fibras e filamentos. Em acréscimo, ele também permite suportar a força de atrito excessiva do fio e deverá ter uma fixação capaz de evitar as vibrações, que ocorrem durante a produção dos fios e que provocam uma separação não uniforme (Naeem, Yu, and Zheng 2015; Naeem et al. 2018).

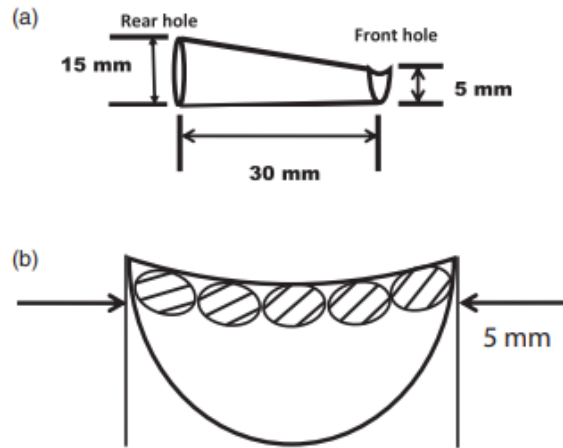


Figura 35 - Representação esquemática do guiamento (a) e do pré-espalhamento realizado por este elemento (b) (Naeem, Yu, and Zheng 2015)

3.2.3 Estação de espalhamento e pré-mistura

Por fim, a zona responsável pelo espalhamento dos fios híbridos deverá atender às limitações de produção das diferentes componentes, como também a minimização dos custos de produção ou aquisição.

A importância da etapa de espalhamento, foi também apresentada em artigos publicados na revista online “CompositesWorld”, sendo apontado que o aumento da compactação do material possibilita um aumento das propriedades mecânicas do material, podendo esta melhoria resultar numa distribuição uniforme e paralelismo das fibras e filamentos (TeXtreme 2014; Ginger Gardiner 2018). Segundo “Happach”, a dispersão pode ser realizada com recurso a barras de espalhamento onde os fios estão tensionados, através do uso de vibrações nos fios e a partir de um jato de ar preliminar (Figura 36). Destas destacam-se as barras de espalhamento pela sua simplicidade, podendo obter até 3 vezes a largura inicial. É de salientar, a relevância de ângulos de envolvimento elevados (90° a 180°) para obter um fio de desempenho superior (Ginger Gardiner 2018).



Figura 36 - Exemplificação de diferentes métodos de espalhamento, como o uso de barras de espalhamento (a), aplicação de um jato de ar (b) e uso de ultrassons (c) (Ginger Gardiner 2018)

Muhammad Awais Naeem *et al.* avaliaram a utilização de um rolo de espalhamento cilíndrico (Figura 37) e elíptico (Figura 38) com reentrâncias, verificando um aumento do desempenho do fio com o seu uso. Porém, os custos altos de criação das reentrâncias, desgaste

rápido e necessidade da largura e profundidade das ranhuras ser semelhante às fibras e filamentos selecionados torna o seu uso inviável (Naeem, Yu, and Zheng 2015; Naeem et al. 2018).

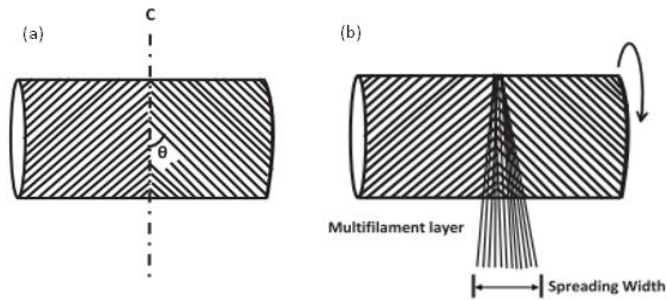


Figura 37 - Representação esquemática do cilindro de espalhamento com micro ranhuras (a) e espalhamento do fio multifilamentar (b) (Naeem, Yu, and Zheng 2015)

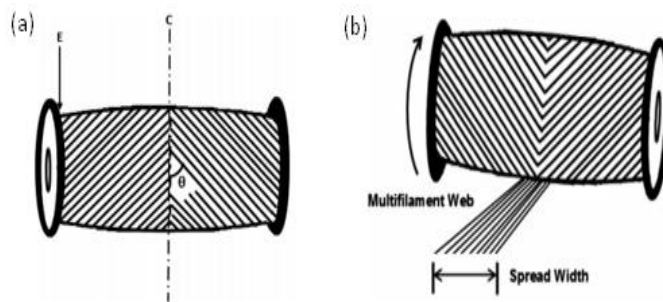


Figura 38 - Ilustração do rolo elíptico de espalhamento com micro ranhuras (a) e espalhamento do fio multifilamentar (b) (Naeem et al. 2018)

Muhammad Awais Naeem *et al.* constataram também a influência do ângulo de envolvimento na largura de dispersão obtida, tanto nos elementos de guiamento como nos de espalhamento. Tendo em conta que o ângulo de envolvimento corresponde ao ângulo gerado entre o ponto de contacto do multifilamento com o elemento e o ponto da sua saída, a subida do ângulo de envolvimento é acompanhada por um aumento da largura de espalhamento. Tal deve-se ao aumento da superfície de contacto do fio com o elemento de espalhamento, que, por sua vez, permite estender o período sob o qual os fios estão sujeitos ao espalhamento. Desta forma, evidenciaram a importância de garantir na estrutura a flexibilidade de posicionamento dos rolos de alimentação, das peças de guiamento e dos elementos de espalhamento e mistura (Naeem, Yu, and Zheng 2015; Naeem et al. 2018). Assim, deverá ocorrer o desalinhamento vertical do conjunto de elementos mencionados, de modo a aumentar o ângulo de envolvimento.

Por norma, pares de 3, 4 ou 5 conjuntos de rolos de espalhamentos são aplicados para a realização da compactação e dispersão das fibras e filamentos dos fios de origem, sendo os rolos inferiores normalmente feitos a partir de aço e os rolos superiores cobertos por uma borracha para reduzir o atrito. Assim sendo, o sistema adotará 5 pares de rolos de espalhamento e mistura, com capacidade de alterar a posição vertical e horizontal destes rolos na estrutura. Um aspeto interessante corresponde ao posicionamento dos cilindros de espalhamento com uma certa inclinação para aumentar o ângulo de envolvimento e espalhamento, como demonstrado na Figura 39. No entanto, esse aspeto não será empregue devido aos custos acrescidos que provinham da sua utilização (Ginger Gardiner 2018; Iftay Khairul Alam 2020).

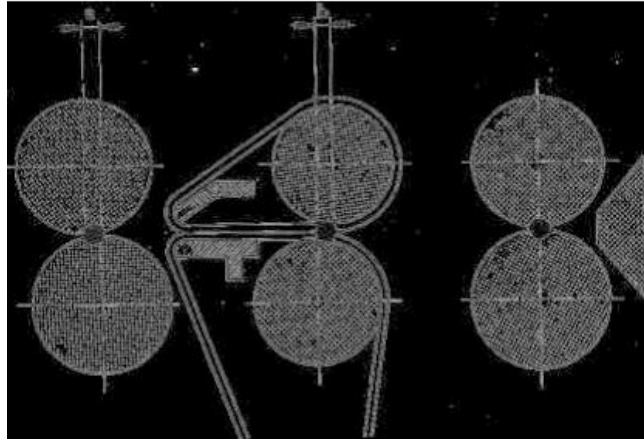


Figura 39 - Representação esquemática do posicionamento dos rolos de espalhamento no processo de "ring spinning" (Iftay Khairul Alam 2020)

Outra possível inovação passaria pela introdução de uma ou mais componentes capazes de aquecer o material até atingir T_g ou próximo de T_f , permitindo em princípio melhorar o comportamento do fio "commingled". Este aquecimento pode ser introduzido no sistema através da aplicação de um jato de ar quente num "godet" convencional (Figura 40a) e em "godets" duplos (Figura 40c), bem como através do uso "godets" aquecidos (Figura 40b) ou de "godets" aquecidos com rolos de transferências (Figura 40d). A melhor solução seria através do uso de um "godet" duplo no interior de uma câmara de temperatura controlada (Figura 41). No entanto, os custos de aquisição e modificações necessárias na estrutura original impediram a sua introdução (Castiglioni 2008).

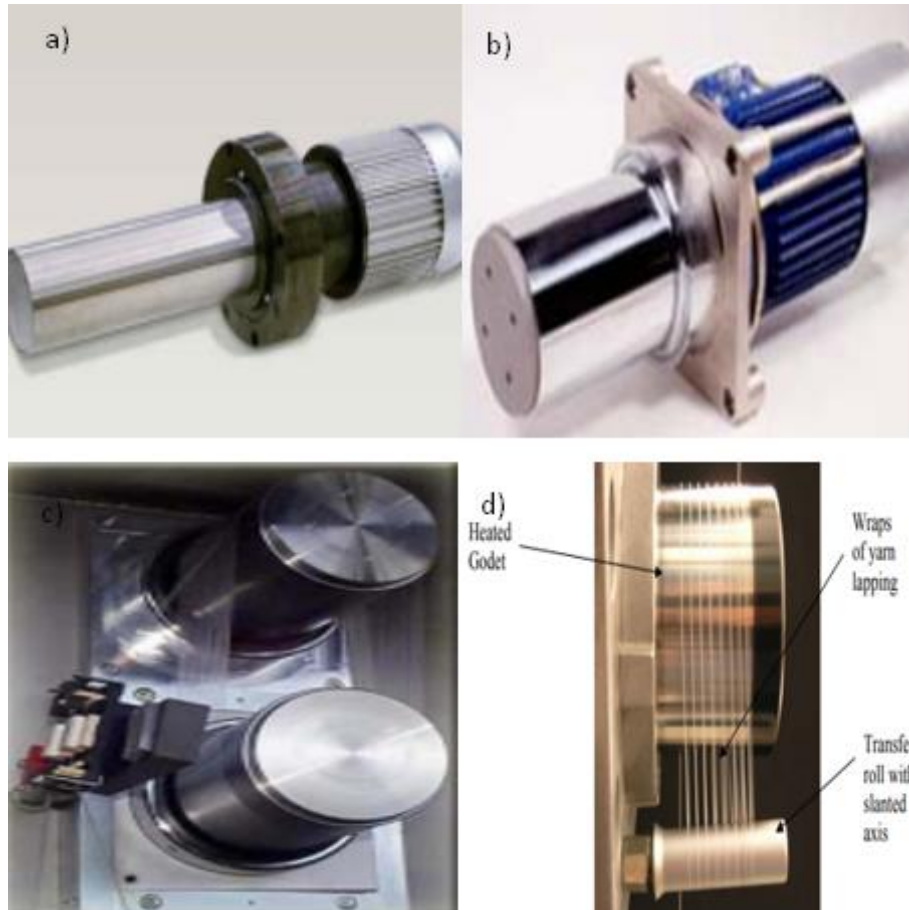


Figura 40 - Ilustração de um “godet” tradicional (a), “godet” aquecido (b), “godet” duplo (c) e “godet” aquecido com rolo de transferência (d) (Castiglioni 2008)

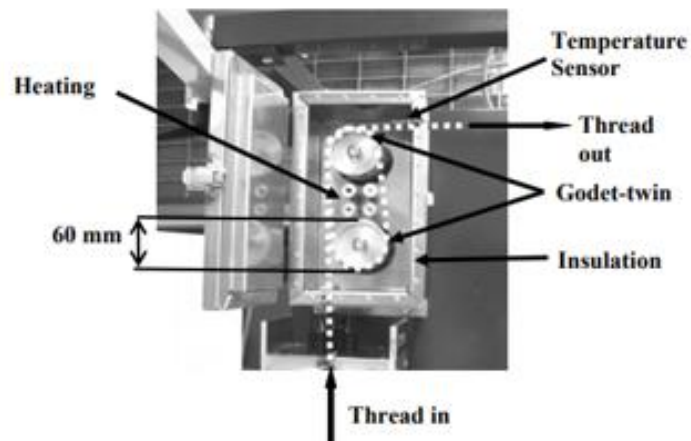


Figura 41 - Câmara de temperatura controlada com “godet” duplo (Castiglioni 2008)

3.3 Evolução do projeto

Após a leitura, análise e interpretação de estudos distintos, bem como a conceptualização das novas etapas a implementar no equipamento de “commingling”, deu-se início ao projeto dos diferentes elementos da estação de alimentação, de guiamento e de espalhamento e pré-mistura.

O projeto em causa sofreu várias modificações no seu decurso, pelo que só serão descritos 3 dos 6 modelos desenvolvidos, que possuem um maior número de alterações relevantes. A solução adotada será abordada com detalhe no subcapítulo “Projeto de detalhe”.

O modelo em causa seguiu os seguintes requisitos:

- Fácil montagem
- Substituição simples dos rolos dos fios, bem como dos rolos de espalhamento para manutenção
- Garantir um espaçamento mínimo entre os rolos do fio de cerca de 200 mm, visto que este é normalmente o diâmetro das bobinas usadas
- Assegurar o alinhamento dos fios entre as diferentes secções do processo, seu espalhamento e posterior pré-mistura antes de atingir a fase de aplicação do jato de ar
- Simplificação da geometria e redução da dimensão das peças a produzir, de modo a minimizar os custos totais do material.

Versão 1

A estrutura inicial (Figura 42) foi obtida implementando perfis tipo Bosch 30x30 de 500 mm para o comprimento e largura e perfis Bosch 30x30 de 860 mm para a altura da estrutura. Um perfil tipo Bosch 30x60 de 800 mm é instalado para permitir a fixação do suporte dos rolos do fio, assim como também, servir de reforço à estrutura. Os perfis são depois unidos usando fêmeas de inserção rápida e parafusos. A seleção dos perfis tipo Bosch face ao uso de outras soluções deveu-se à sua versatilidade, modelaridades, leveza e resistência, bem como aos custos associados ao uso de uma chapa com a espessura e dimensões adequadas ao projeto em causa.

De modo a elevar a estrutura e impedir o contacto dos perfis com o solo, aplica-se um pé nivelador com uma base em borracha antiderrapante. Uma placa de montagem estabelece o contacto e união dos perfis inferiores aos pés niveladores.

Estes materiais foram selecionados a partir do catálogo fornecido pela Wolweiss, que é uma empresa com longa experiência no ramo industrial e que oferece diversas soluções construtivas e acessórios feitos a partir de alumínio ou plásticos técnicos.

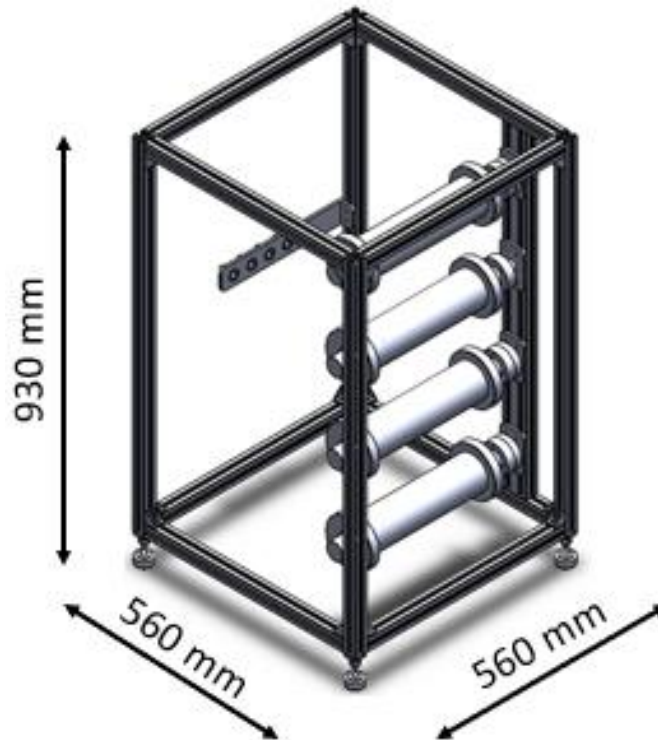


Figura 42 - 1ª versão desenvolvida na perspectiva isométrica

Na versão 1, somente as secções de colocação dos rolos de fios e guiamento tinham iniciado a fase de desenvolvimento. Como é possível observar na Figura 43 e Figura 44, o conjunto encarregue de armazenar e fixar o rolo é formado por uma peça de fixação (1) que irá estabelecer a ligação do conjunto de alimentação aos perfis da estrutura. O rolamento (7) encontra-se apoiado na peça 1, sendo os componentes 1 e 8 responsáveis pelo contacto com o anel interior do rolamento e os elementos 2 e 3 pelo contacto com o anel exterior. A fixação do rolamento (7) pela anilha ou espaçador (8), assim como, a ligação dos elementos 2 e 3 é efetuada através de parafusos. A peça 3, suportada pelo rolamento, possui uma geometria cilíndrica comprida onde os elementos 4 e 6 se encontram apoiados. Por fim, a fixação e apoio do rolo do fio é garantida pelas peças 4 e 6. Aqui, a seleção e o dimensionamento do rolamento são cruciais para o funcionamento do sistema de fixação dos rolos, estando posteriormente relacionado com o seu modo de montagem aqui proposto.

Desta forma, garante-se a fácil introdução e retirada dos rolos de fios. Não menos relevante, é o posicionamento dos rolos e guiamento no interior da estrutura face ao exterior de forma a minimizar os esforços e momentos criados pelo peso conjunto deles.

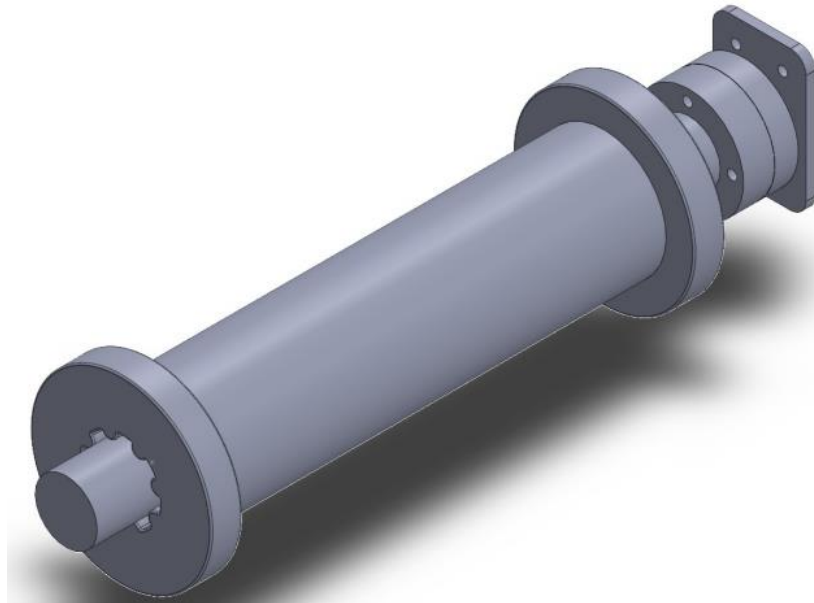


Figura 43 - Conjunto de fixação do rolo do fio da 1ª versão

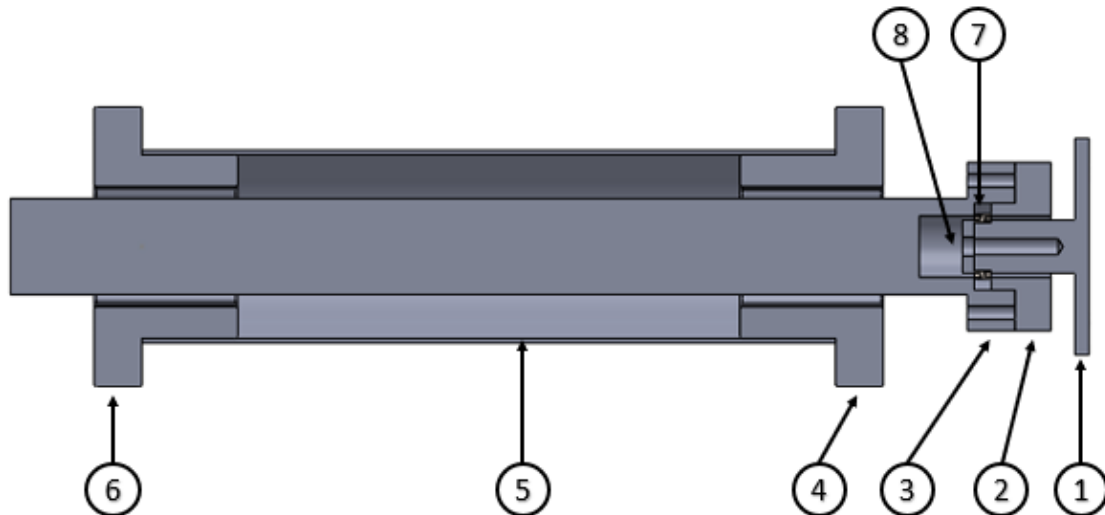


Figura 44 - Vista de corte do conjunto de alimentação da 1ª versão, formado por: fixação do conjunto do rolo do fio (1), elemento de fixação e acoplamento do rolamento (2), elemento de fixação e apoio do rolo do fio (3), apoios do rolo (4 e 6), rolo do fio (5), rolamento (7) e anilha customizada (8)

Relativamente ao guiamento, como consta na Figura 45, este conjunto resume-se a uma peça quinada (2) com furos para colocação dos quatro guiamentos (1), sendo o seu acoplamento feito por pressão e o contacto estabelecido pela zona não afunilada dos elementos de orientação. A superfície curva do guiamento permite uma pré-dispersão dos fios antes de atingirem a estação de espalhamento, como indicado por Muhammad Awais Naeem *et al.* (Naeem et al. 2018; Naeem, Yu, and Zheng 2015)

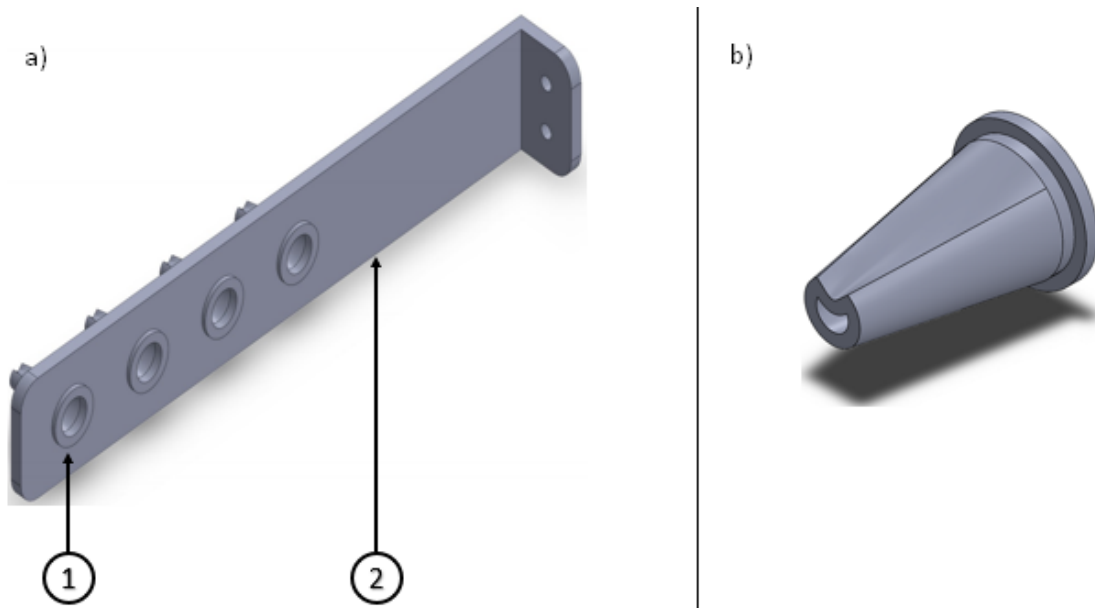


Figura 45 - Perspetiva isométrica da secção de guiamento da 1ª versão (a) e do guiamento (b), onde a peça 1 corresponde ao guiamento e a 2 à fixação dos guiamientos

Apesar do modelo apresentado assegurar uma montagem simples e fácil substituição dos rolos dos fios, os conjuntos de alimentação e de guiamento apresentam algumas desvantagens, nomeadamente:

- Como os furos da componente 2 e 3 da Figura 44 não se encontram alinhados, não é possível fixar axialmente o conjunto do rolo, pelo que corresponde a uma falha do projeto
- Inexistência de uma secção para a dispersão dos filamentos dos fios e posterior pré-mistura antes do processo de “commingling”
- Tendo em conta que a maioria das peças são produzidas a partir de alumínio maquinado, as grandes dimensões de algumas peças, como é caso da peça 3 da Figura 44, resultam num desperdício e custo elevado
- Não existem pés niveladores e respetivas placas de montagem compatíveis com os perfis tipo Bosch 30x30
- Os elementos 4 e 6 da Figura 44 que sustentam os rolos e permitem a sua inserção ou remoção possuem saliências interiores de difícil produção
- Dada a espessura da fixação dos guiamientos (2) da Figura 45, a peça é de difícil quinagem e furação, pelo que leva a um novo aumento do custo
- A posição do perfil onde se encontra fixo o conjunto do guiamento não é ajustável
- O posicionamento horizontal dos guiamientos atuais não permite a centragem dos fios, pelo que a posterior pré-mistura dos fios espalhados poderá ser afetada.

Versão 2

Tendo em conta os problemas detetados na 1ª versão e a necessidade de uma zona de espalhamento e pré-mistura, foi realizada uma nova iteração, 2ª versão, como ilustrada na Figura 46.

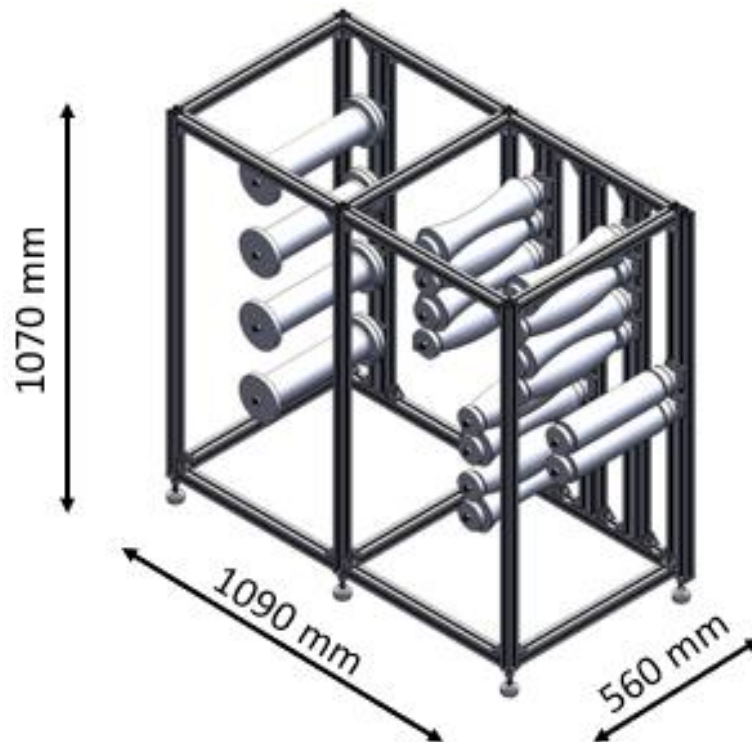


Figura 46 - Vista isométrica da 2ª versão

Tendo como base a 1ª versão desenvolvida, novos perfis 30x30 e perfis 30x60 foram adicionados para introduzir a estação de espalhamento e pré-mistura.

No que diz respeito ao conjunto de alimentação (Figura 47 e Figura 48) é possível observar que as peças 2 e 3 da nova versão não possuem qualquer obstáculo para a sua ligação e que a utilização de um varão (7) permite a redução do comprimento da peça 3 da Figura 44 e seus custos de maquinagem. Não menos relevante, é a transformação das peças 3 e 4 da Figura 44 num único componente (elemento 3 da Figura 48) capaz de acoplar o rolamento e sustentar o rolo de fio. A eliminação das reentrâncias interiores e introdução de uma superfície cônica nas peças 3 e 5 da Figura 48 permitem facilitar a entrada e saída do rolo do fio. Além disso, na 2ª versão insere-se uma porca (6) no final do varão roscado (7) para garantir a fixação do elemento 5, sendo o varão fixo pela peça 12 que é soldada ao elemento 3.

Esta solução permite também a mudança da posição entre os pares dos rolos, assim como, alterar o ângulo de envolvimento.

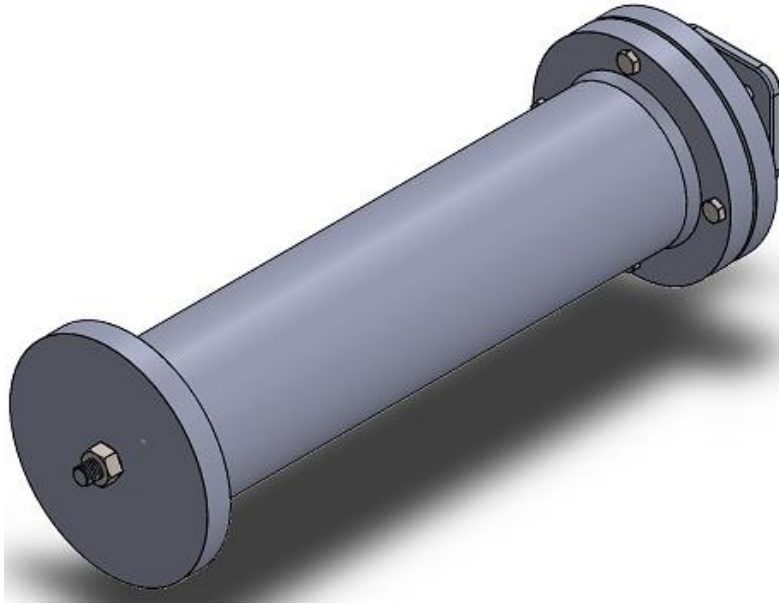


Figura 47 - Conjunto do rolo do fio da 2ª versão

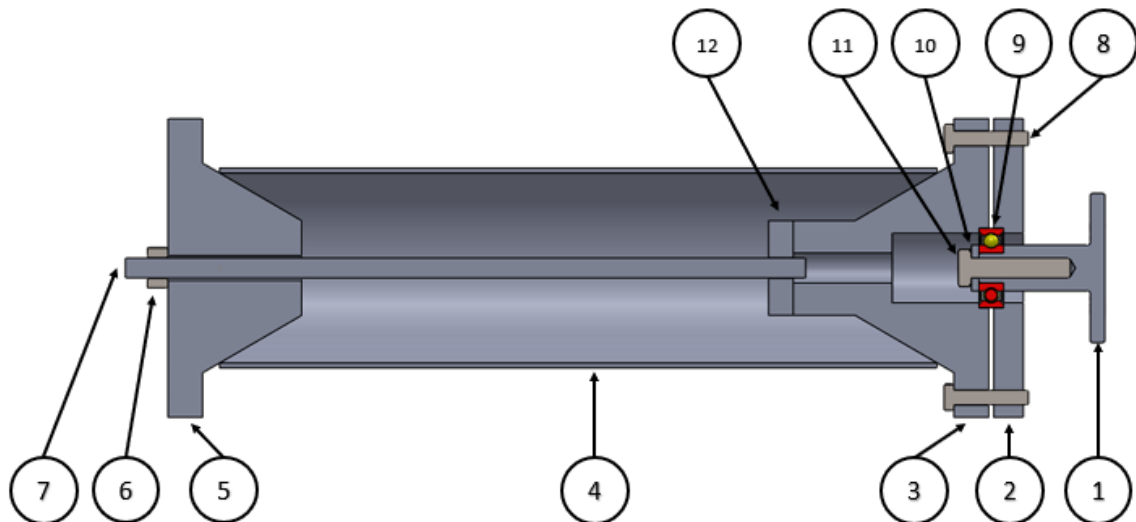


Figura 48 - Vista de corte do conjunto de alimentação da 2ª versão constituído por: fixação do conjunto do rolo do fio (1), elemento de fixação e acoplamento do rolamento (2), elemento de fixação e apoio do rolo do fio (3), rolo do fio (4), elemento de fixação e apoio do rolo do fio oposto (5), porca ISO - 4032 - M12 - W - C (6), varão M12 x 340 (7), parafusos ISO 4017 - M6 x 20-C (8), rolamento W 6201 (9), anilha customizada (10), parafuso ISO 4014 - M6 x 30 x 18-C (11) e peça soldada (12)

Relativamente às secções de espalhamento (Figura 49, Figura 50 e Figura 51), estas foram modeladas do mesmo modo que o conjunto dos rolos dos fios para simplificar a produção dos diversos elementos. Para maximizar a dispersão dos fios, as peças possuem geometrias elípticas complementares havendo uma dispersão inicial dos fios e pré-mistura dos mesmos, tal como sugerido por Muhammad Awais Naeem *et al.* (Naeem et al. 2018).

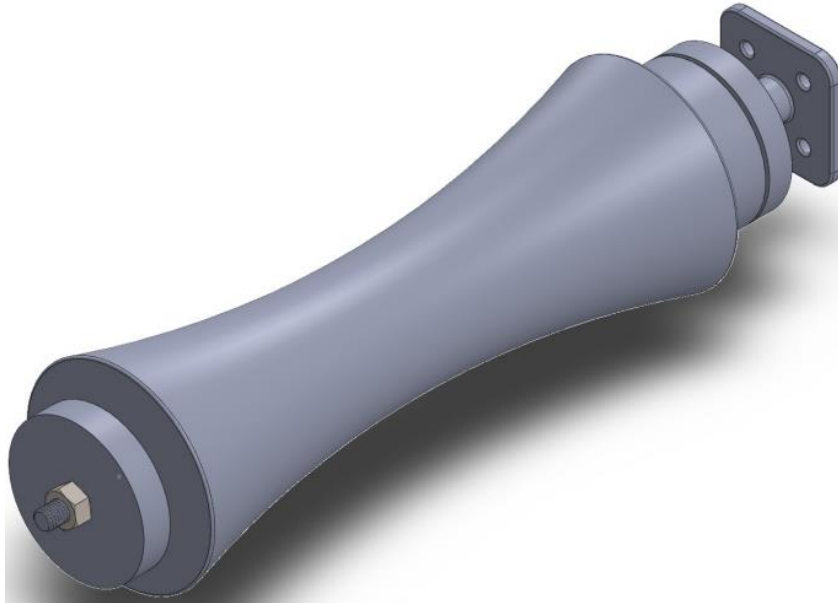


Figura 49 - Rolo de espalhamento elíptico da 2ª versão

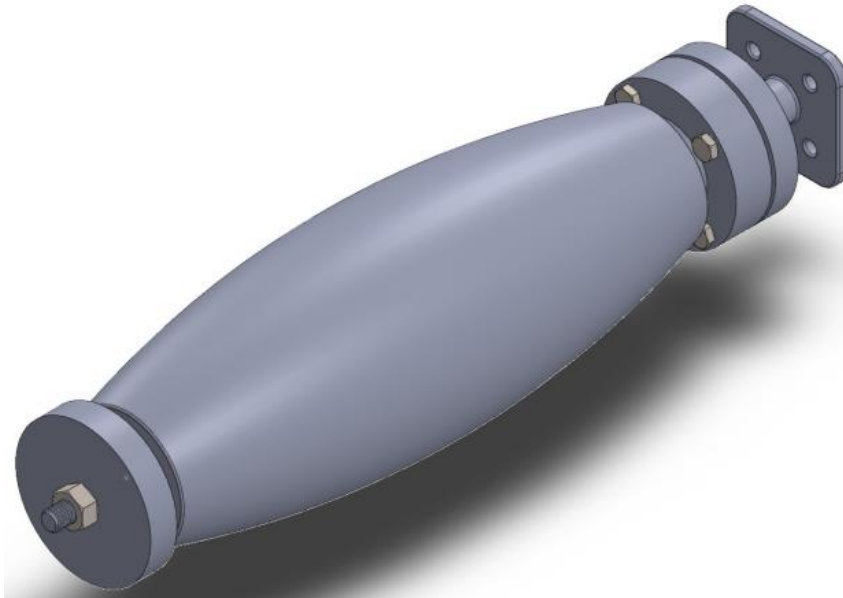


Figura 50 - Rolo de espalhamento elíptico correspondente à 2ª versão



Figura 51 – Conjunto do rolo de mistura da 2ª versão

O protótipo desenvolvido cumpre vários dos requisitos e resolve alguns dos problemas descritos no modelo anterior. Contudo, a estrutura e componentes constituintes ainda possuem vários desafios, em particular:

- Apresentam dimensões distintas e grande número de elementos constituintes da estrutura, como é o caso da quantidade de rolos de espalhamento (14), que implica custos excessivos de produção ou aquisição
- A existência de 3 tipos de rolos distintos para a realização do espalhamento e pré-mistura aumenta os custos de aquisição e produção do conjunto
- O uso de uma peça soldada (elemento 12 da Figura 48) para a fixação do varão não é a solução mais apropriada, atendendo que o processo pode levar a um baixo rigor dimensional que pode ter impacto direto no funcionamento do rolamento
- O conjunto do guiamento, para além de manter a dificuldade no processo de quinagem, não assegura o alinhamento dos fios antes de serem introduzidos nos pares de rolos de espalhamento
- Embora a geometria dos rolos de espalhamento permita adquirir uma boa dispersão dos fios, a forma destas componentes pode promover o deslizamento dos fios, pelo que põe em risco o processo
- Como o par de rolos de espalhamento exerce pressões significativas sobre os fios para gerar a sua dispersão, a existência de somente um ponto de fixação não garante a estabilidade do conjunto de espalhamento
- Os perfis onde se encontram fixos os elementos de guiamento e de dispersão não possuem a mesma flexibilidade de posição que os restantes conjuntos
- Não existem pés niveladores ou rodízios adaptados para os perfis tipo Bosch 30x30 e 30x60
- A aplicação de pé niveladores dificulta a movimentação da estrutura, caso tenha de ser movida.

Após algumas iterações obteve-se a 3ª versão do equipamento de “commingling” e suas estações, solução adotada que se descreve abaixo. No subcapítulo subsequente são também

abordadas as simulações da integridade estrutural dos conjuntos, listagem de componentes e desenhos técnicos e de montagem.

3.4 Projeto de detalhe

A proposta final (Figura 52), 3ª versão, visou a simplificação dos diferentes conjuntos para melhoria da sua integridade estrutural, desempenho das etapas distintas e flexibilidade, bem como a minimização do investimento necessário e resolução dos problemas detetados no decurso do seu desenvolvimento.

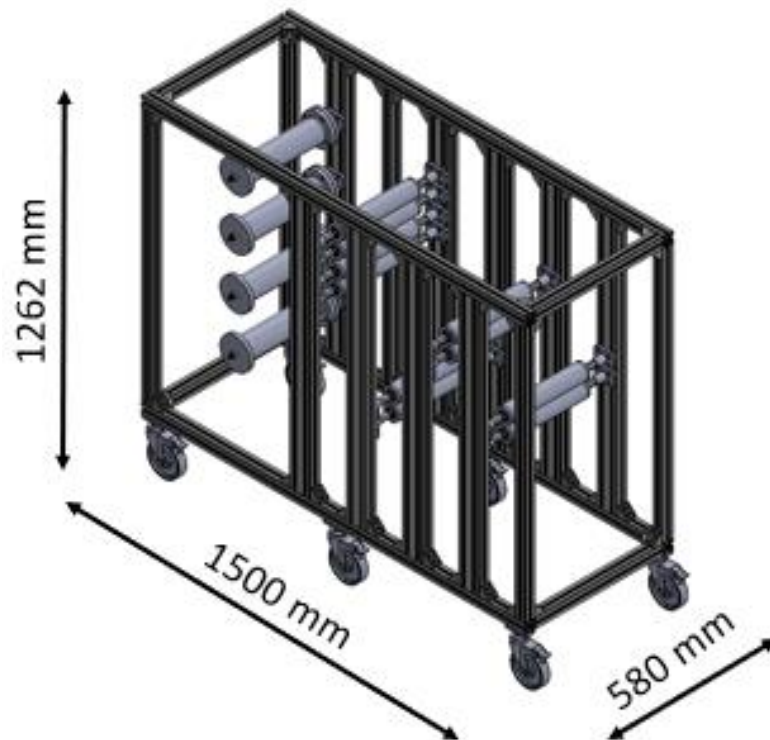


Figura 52 - Solução desenvolvida na perspetiva isométrica

Neste modelo os perfis 30x30 e 30x60 foram substituídos por perfis 40x40 e 40x80 devido ao aumento da resistência oferecida por estes e maior disponibilidade no mercado. O comprimento dos perfis foi standardizado, ao contrário das propostas anteriores, pelo que se implementaram perfis 40x40 de 500 mm, 1000 mm e de 1500 mm para definir a largura, altura e comprimento da estrutura, respetivamente. Também foram empregues perfis 40x80 de 1000 mm para permitir a ligação dos conjuntos de alimentação, espalhamento e pré-mistura e um perfil 40x40 de 1000 mm para o conjunto do guiamento, ao mesmo tempo que reforçam a estrutura. É de salientar que os perfis 40x40 e 40x80 de 1000 mm se encontram posicionados sob os perfis 40x40 de 1500 mm, permitindo assim o ajuste da sua posição, ou seja, a estrutura apresenta um potencial quanto à sua modularidade. Isto é, a possibilidade reposicionar os perfis, e consequentemente os sistemas a eles associados, permite adaptar as condições de processo como o controlo da tensão aplicada no fio e ângulo de envolvimento nas diferentes etapas.

Os diferentes perfis são unidos por esquadros adaptados para perfis 40 (1), sendo estes unidos à estrutura através de fêmeas de inserção rápida (2) e parafusos (3), como demonstrado na Figura 53. A utilização de fêmeas de inserção rápida deve-se à facilidade de montagem, pois podem ser introduzidas em qualquer zona do perfil e não somente a partir das extremidades. É

de destacar, o uso de rodízios giratórios com travão e respetivo adaptador para assegurar o reposicionamento fácil e bloqueio da estrutura.

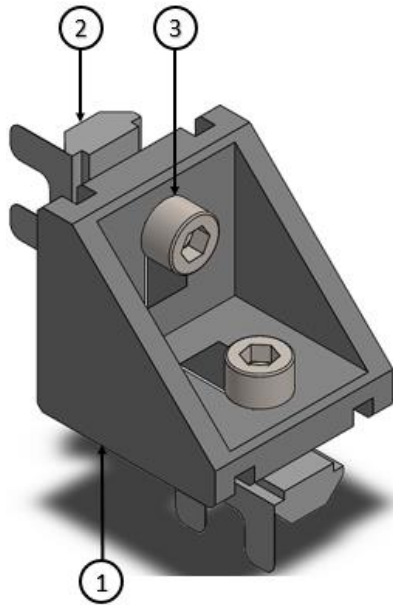


Figura 53 – Montagem do esquadro (1), fêmeas de inserção rápida (2) e parafusos ISO 4762 M6 x 12 - 12N (3) da solução adotada

Seguindo uma metodologia semelhante à 2ª versão, o conjunto de inserção do rolo na 3ª versão (Figura 54 e Figura 55), inicia-se com a colocação dos elementos 1 e 2 em contacto com o anel interior e exterior do rolamento W 6201 da SKF (12), respetivamente. A seleção do rolamento teve em conta a sua disponibilidade no mercado e tendo-se assumido como carga mínima 10 Kg (2 Kg do peso do rolo do fio e 8 Kg para as restantes componentes do conjunto), bem como um diâmetro interior de 12 mm para assegurar a integridade da fixação do conjunto do rolo do fio. Posteriormente, procede-se à colocação dos componentes 13 e 3 em contacto com o anel interior e exterior do rolamento, respetivamente. O rolamento encontra-se apoiado na peça 1, sendo capaz de suportar cerca de 3 kN (Anexo A), que é adequado para o sistema em causa, enquanto a peça 13 exerce pressão através de um parafuso ISO 4017 (14). A peça 2 e 3 suportadas pelo rolamento, são ligadas a partir de 4 parafusos ISO 4014 (11) existindo um espaçamento entre os dois elementos, por questões de tolerâncias e de modo garantir o contacto com as extremidades do anel exterior. Antes de ocorrer a fixação do elemento 3, procede-se à introdução do varão M12 com 340 mm (9) no elemento 3, sendo presa com a inserção de uma porca ISO 4032 M12 no interior da componente 3 (4) e uma na outra extremidade (5). De seguida introduz-se o rolo de fio (6), seguido pela inserção da peça 7 com a mesma superfície cónica que o elemento 3, de modo a suportar o rolo, fixá-lo e assegurar a fácil substituição do mesmo. Por fim, insere-se outra porca ISO 4032 M12 (8) na outra extremidade da peça 7 para reforço da fixação axial do conjunto. A peça de fixação é acoplada ao perfil a partir de 4 parafusos ISO 4017 (10) e fêmeas de inserção rápida correspondentes.

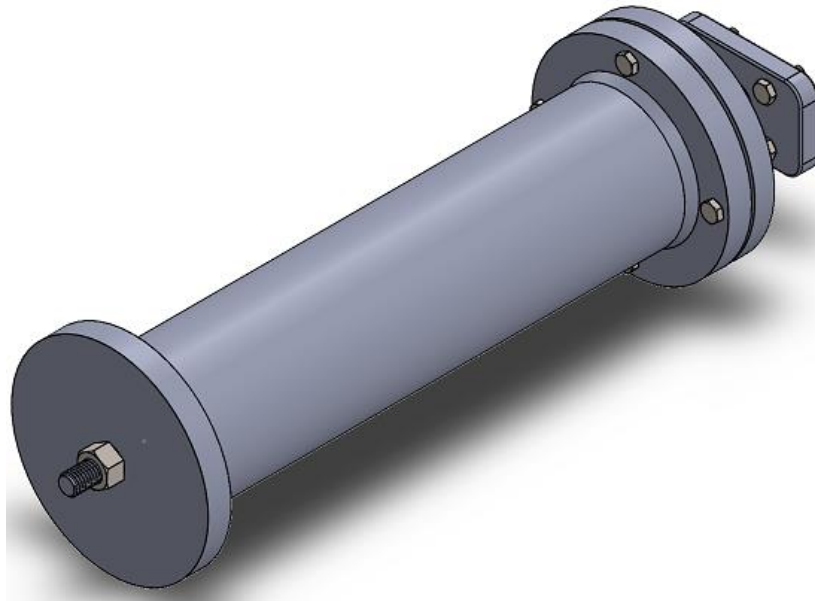


Figura 54 - Conjunto do suporte do rolo do fio da versão final

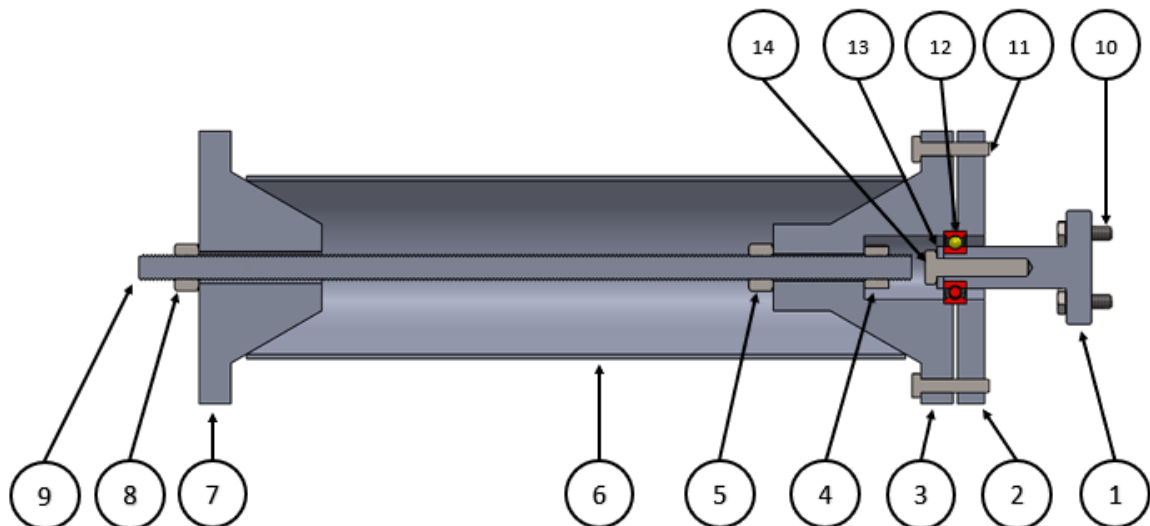


Figura 55 – Vista de corte do conjunto do rolo do fio da 3ª versão composto por: fixação do conjunto do rolo do fio (1), elemento de fixação e acoplamento do rolamento (2), elemento de fixação e apoio do rolo do fio (3), porcas ISO - 4032 - M12 - W - C (4, 5 e 8), rolo do fio (6), elemento de fixação e apoio do rolo do fio oposto (7), varão M12 x 340 (9), parafusos ISO 4017 - M6 x 20-C (10), parafuso ISO 4014 - M6 x 30 x 18-C (11), rolamento W 6201 (12), anilha customizada (13) e parafuso ISO 4014 - M8 x 40 x 22-C (14)

A unidade que engloba as componentes de fixação dos elementos de guiamento (Figura 56) é responsável por conduzir os fios dos seus rolos de origem até aos cilindros de espalhamento e pré-mistura. A peça de fixação (2) em alumínio é obtida através da quinagem de uma chapa, reduzindo assim os custos associados à sua conceção face à solução descrita na 2ª versão. Esta componente possui 4 furos verticalmente posicionados de modo a garantir o alinhamento dos guiamentos (3) com o centro dos cilindros de espalhamento e a sobreposição dos fios. O conjunto de guiamento é unido ao perfil através de 3 parafusos ISO 4017 (1) e respectivas fêmeas de inserção rápida. Em acréscimo, os guiamentos não sofreram alterações, visto que a geometria curva que apresentam (Figura 45b) permite a ocorrência de uma dispersão dos fios que precede a entrada nos rolos de espalhamento.

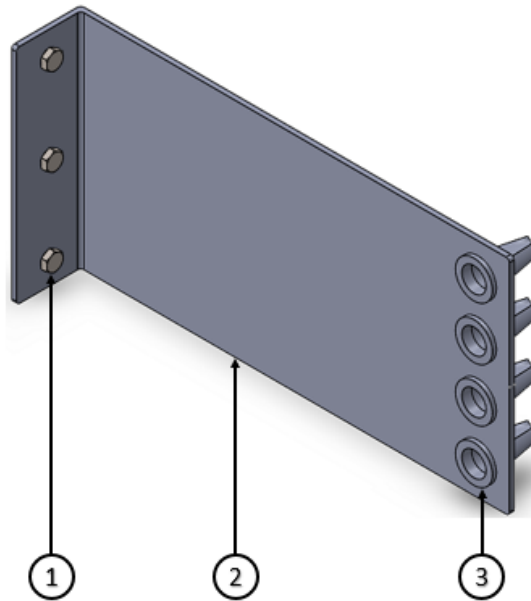


Figura 56 - Conjunto de guiação da solução desenvolvida, onde 1 indica os parafusos ISO 4017 - M6 x 12-C, 2 a fixação dos guiamentos e 3 os guiamentos

Por último na estação de espalhamento e pré-mistura (Figura 57 e Figura 58), os rolos introduzidos (4) correspondem a rolos de carga comerciais, em aço com diâmetro de 60 mm e com eixos roscados M12 x 20 e 300 mm de comprimento do rolo, com uma capacidade de carga de 120 Kg. Para realizar uma pressão e subsequente dispersão dos filamentos, estes rolos foram agrupados em pares em quatro sub-estações. O rolo selecionado pode ser fornecido pela “Kaiser+Kraft” e encontra-se no Anexo B. Tendo em conta que os cilindros estão a exercer pressão sob os fios, eles são apoiados nas duas extremidades por dois elementos de fixação (2), sendo cada um unido por 4 parafusos ISO 4017 (1) e respectivas fêmeas de inserção rápida aos perfis tipo Bosch 40x80. A ligação entre as componentes de fixação (2) e o cilindro (4) é assegurada por uma porca de extensão (3) (caraterísticas no Anexo C), que permite o ajuste fino da posição e fácil montagem ou substituição dos cilindros devido a desgaste.

Como foi anteriormente referido, nesta estação ocorre primeiramente uma dispersão individual dos fios de reforço e termoplástico por 2 pares de cilindros, seguindo-se a sobreposição dos fios e sua mistura, bem como a continuação do espalhamento ao longo dos 3 pares de cilindros restantes. A 3ª versão mantém também a flexibilidade do posicionamento a diferentes alturas e distâncias observada na 2ª versão, de modo a possibilitar um aumento do ângulo de envolvimento.



Figura 57 - Conjunto de espalhamento e mistura da 3ª versão

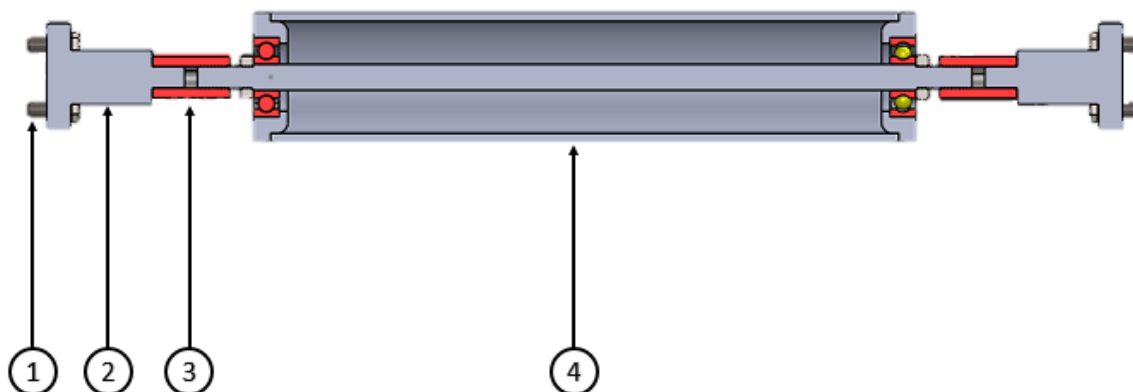
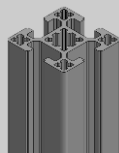
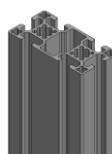
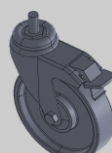
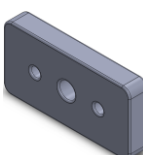
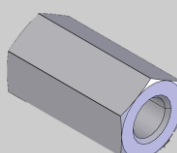
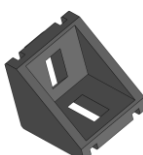


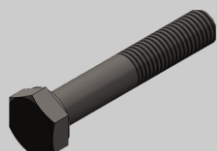
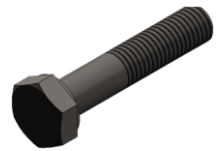
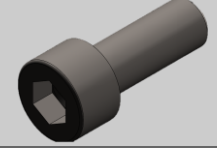
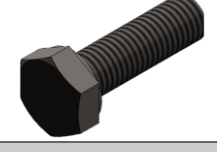
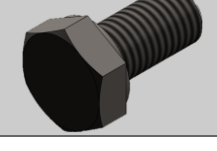
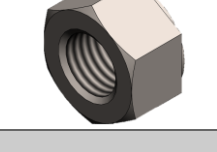
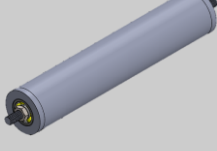
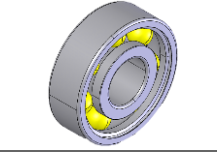
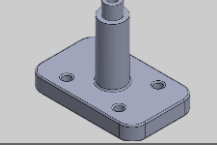
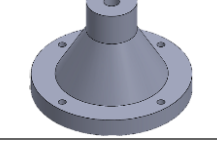
Figura 58 - Vista de corte do conjunto de espalhamento e mistura da solução adotada, sendo os parafusos ISO 4017 - M6 x 20-C indicados pelo número 1, fixação do rolo de carga pelo número 2, porca de extensão M12-36 pelo número 3 e o rolo de carga em aço da “Kaiser+Kraft” pelo número 4

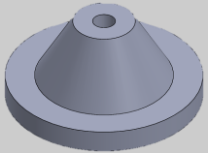
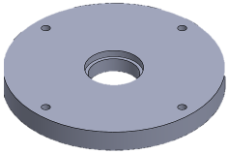
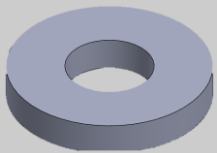
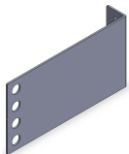
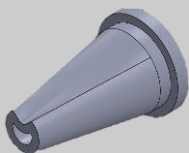
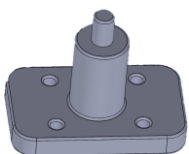
A Tabela 18 apresenta a lista dos diferentes componentes constituintes da estrutura desenvolvida, sua quantidade e modelo correspondente. Como se pode observar, esta estrutura foi desenhada no sentido de ser constituída por elementos normalizados tornando-a modular. No entanto para a montagem dos sistemas funcionais foi necessário desenvolver componentes de produção. Os desenhos técnicos dos componentes de produção encontram-se no anexo D, assim como os desenhos de montagem dos conjuntos e estrutura.

Tabela 18 - Listagem de componentes

Designação	Quantidade	Material	Tipo de componente	Modelo
Perfil do grupo 40 - 40x40 com 4 entradas - 500 mm de comprimento	4	Alumínio	De catálogo da Wolweiss	

Perfil do grupo 40 - 40x40 com 4 entradas - 1000 mm de comprimento	5			
Perfil do grupo 40 - 40x40 com 4 entradas - 1500 mm de comprimento	4			
Perfil do grupo 40 - 40x80 com 6 entradas - 1000 mm de comprimento	9	Alumínio	De catálogo da Wolweiss	
Rodízio giratório com perno roscado e travão M12 Ø63	6	Corpo: aço ao carbono com pintura electrostática preta Roda: poliamida ou poliuretano	De catálogo da Wolweiss	
Adaptador de perfil 40 para rodízio giratório com perno roscado	6	Aço zincado	De catálogo da Wolweiss	
Porca De Extensão M12-36	20	Aço temperado	De catálogo da Norelem	
Esquadro 40x40	64	Alumínio injetado	De catálogo da Wolweiss	
Fêmea de inserção rápida M6 e rasgo 10	239	Aço níquelado	De catálogo da Wolweiss	
Varão M12 x 340	4	Aço AISI 1020	De catálogo da Leroy Merlin	

Parafuso ISO 4014 - M8 x 40 x 22-C	4	Aço	De catálogo da Wolweiss	
Parafuso ISO 4014 - M6 x 30 x 18-C	16	Aço	De catálogo da Wolweiss	
Parafuso ISO 4762 M6 x 12 - 12N	128	Aço	De catálogo da Wolweiss	
Parafuso ISO 4017 - M6 x 20-C	108	Aço	De catálogo da Wolweiss	
Parafuso ISO 4017 - M6 x 12-C	3	Aço	De catálogo da Wolweiss	
Porca ISO - 4032 - M12 - W - C	12	Aço	De catálogo da Wolweiss	
Rolo de carga em aço Ø 60, eixo roscado M 12 x 20 com 300 mm de comprimento	10	Aço	De catálogo da “Kaiser+Kraft”	
Rolamento W 6201	4	-	De catálogo da SKF	
Fixação do conjunto do rolo do fio	4	Alumínio 6063 – T5	Produção (Maquinação)	
Elemento de fixação e apoio do rolo do fio	4	Alumínio 6063 – T5	Produção (Maquinação)	

Elemento de fixação e apoio do rolo do fio oposto	4	ABS	Produção (Maquinação)	
Elemento de fixação e acoplamento do rolamento	4	Alumínio 6063 – T5	Produção (Maquinação)	
Anilha customizada	4	Alumínio 6063 – T5	Produção (Maquinação)	
Fixação dos Guiamentos	1	Alumínio 6063 – T5	Produção (Quinagem)	
Guiamento	4	ABS	Produção (Maquinação)	
Fixação do rolo de carga	20	Alumínio 6063 – T5	Produção (Maquinação)	

De modo a avaliar a segurança e estabilidade da solução encontrada foram realizadas simulações no conjunto de alimentação, na unidade de guiamento e no conjunto de espalhamento e pré-mistura da estrutura. Na Tabela 19 é possível observar as principais características dos materiais que constituem as peças que integram os conjuntos submetidos à simulação.

Tabela 19 - Propriedades gerais dos materiais aplicados no estudo integral dos diferentes conjuntos

Propriedade	Aço AISI 1020	Alumínio 6063 - T5	ABS
Módulo de Young (GPa)	200	69	2
Coeficiente de Poisson	0,29	0,33	0,394
Densidade (kg/m ³)	7900	2700	1020
Resistência à tração (MPa)	420,507	185	30
Tensão de limite elástico (MPa)	351,571	145	-

No primeiro caso, após simplificação do modelo através dos elementos da extremidade livre do varão, considerou-se o conjunto de alimentação fixo nos furos da fixação do conjunto do rolo do fio, sendo o varão feito a partir de aço AISI 1020 e as restantes peças através da liga de alumínio 6063-T5. Além de introduzir a condição de contacto geral sem penetração, os

parafusos e rolamento foram substituídos pelos devidos conectores do sistema. A simulação permitiu analisar as tensões e deslocamentos gerados no conjunto quando submetido ao peso próprio e a uma carga de 20 N na extremidade livre do varão, visto corresponder à carga provocada pelo peso da bobina de fio. Deste modo, para um tamanho de elemento de malha de cerca de 9,2 mm e uma malha de tipo sólido (“solid mesh”), foi possível a obtenção das tensões e deslocamentos no conjunto de alimentação sob as condições impostas, como indicado pela Figura 59 e Figura 60.

Na Tabela 20 encontram-se expressas as tensões e deformações máximas observadas em cada elemento do conjunto, demonstrando que nenhum componente excede o seu limite de tensão elástica, não ocorrendo deformação plástica. Os valores de deformação máxima foram obtidos a partir da diferença entre os deslocamentos máximo e mínimo presentes em cada componente. É de salientar que a tensão máxima do conjunto, $1,352 \times 10^2$ MPa, foi observada na fixação do conjunto do rolo do fio (Figura 61). Em relação às deformações, observam-se valores reduzidos, sendo o máximo de $3,094 \times 10^0$ mm observado no extremo do varão M12 x 340.

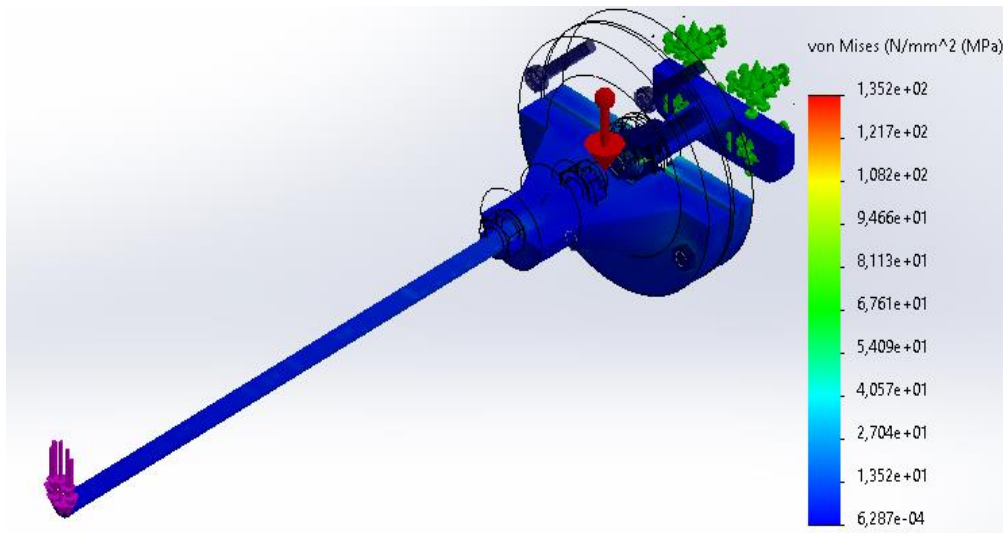


Figura 59 - Tensões no conjunto do rolo do fio

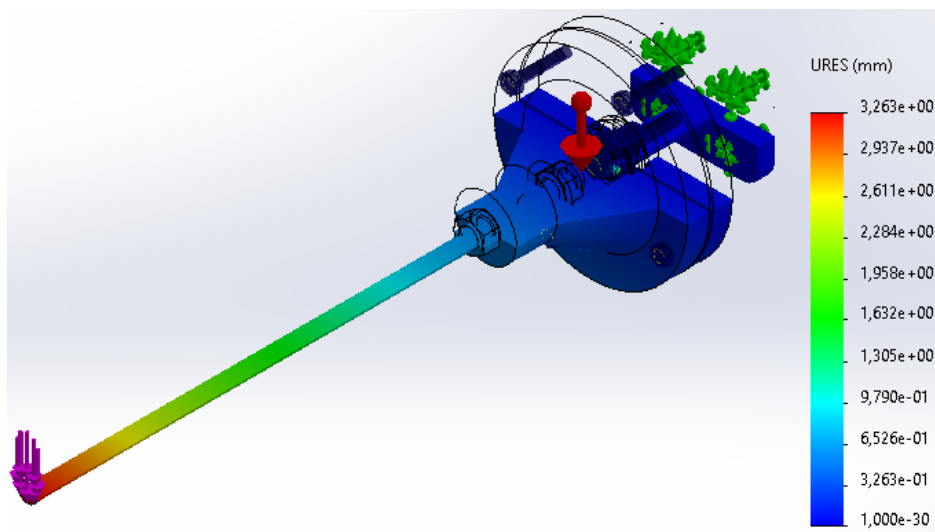


Figura 60 – Deslocamentos no conjunto do rolo do fio

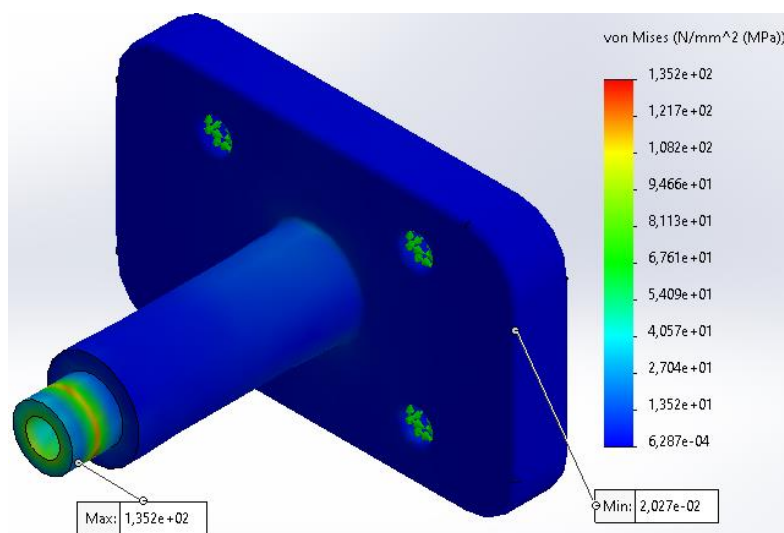


Figura 61 – Tensões na fixação do conjunto do rolo do fio

Tabela 20 - Tensões e deformações máximas nos diferentes elementos do conjunto de alimentação

Componente	Tensão Máxima (MPa)	Deformação máxima (mm)
Fixação do conjunto do rolo do fio	$1,352 \times 10^2$	$3,258 \times 10^{-2}$
Elemento de fixação e acoplamento do rolamento	$7,641 \times 10^1$	$4,484 \times 10^{-1}$
Elemento de fixação e apoio do rolo do fio	$4,045 \times 10^1$	$5,289 \times 10^{-1}$
Anilha customizada	$7,603 \times 10^1$	$6,894 \times 10^{-1}$
Porca inserida no interior do elemento de fixação e apoio do rolo do fio	$5,837 \times 10^{-1}$	$7,760 \times 10^{-2}$
Porca inserida no exterior do elemento de fixação e apoio do rolo do fio	$2,712 \times 10^0$	$7,900 \times 10^{-2}$
Varão M12 x 340	$3,832 \times 10^1$	$3,094 \times 10^0$

Numa segunda instância analisou-se a integridade da unidade de guiamento estando apenas sujeita ao seu peso próprio. A fixação dos guiamentos foi feita através da liga de alumínio 6063-T5 e os guiamentos por ABS e considerou-se a inexistência de penetração dos componentes, bem como a fixação do conjunto nos furos da peça de fixação dos guiamentos. Deste modo, obtiveram-se as tensões e deslocamentos expressos na Figura 62 e Figura 63, respetivamente, para um elemento de malha de 6,3 mm e uma malha de tipo sólido (“solid mesh”).

Os valores máximos das tensões e deformações dos componentes da estação de guiamentos (Tabela 21) revelam que as peças se encontram no domínio elástico e que os componentes sofrem deformações desprezáveis. A tensão e deformação máxima verificaram-se ambas na fixação dos guiamentos, apresentando um valor de $4,450 \times 10^0$ MPa e de $7,007 \times 10^{-3}$ mm, respetivamente. Os valores da deformação foram obtidos como o indicado na simulação anterior.

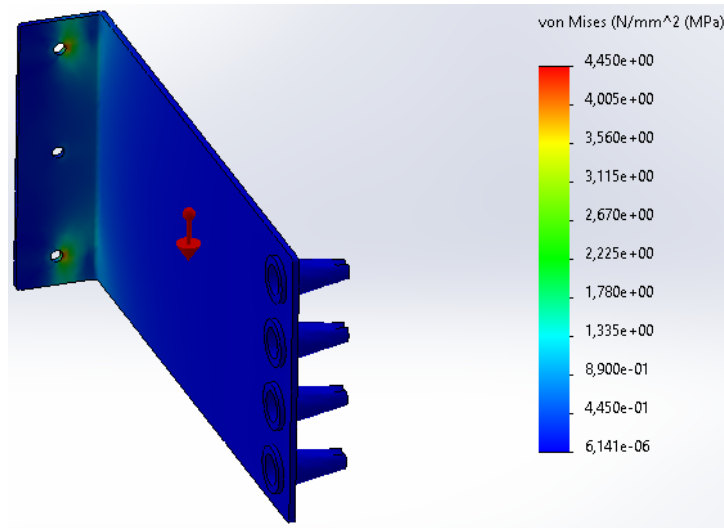


Figura 62 - Tensões nas componentes de guiamento

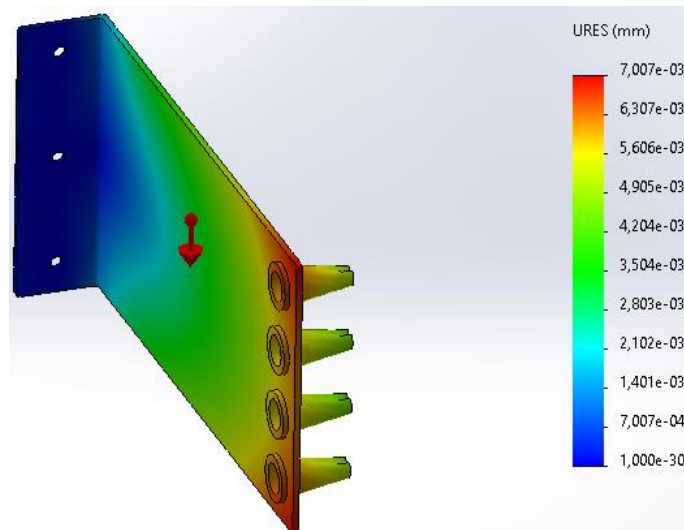


Figura 63 - Deslocamentos nos elementos de guiamento

Tabela 21 - Tensões e deformações máximas nos diferentes elementos do conjunto de guiamento

Componente	Tensão Máxima (MPa)	Deformação máxima (mm)
Fixação dos guiamentos	$4,450 \times 10^0$	$7,007 \times 10^{-3}$
Guiamentos	$1,047 \times 10^{-3}$	$1,830 \times 10^{-3}$

O conjunto de mistura e guiamento foi simplificado para as componentes de fixação ao perfil e porca de extensão, uma vez que o rolo de mistura e espalhamento que se adquire suporta uma carga na ordem dos 1200 N. Assim sendo, aplicou-se uma carga de 600 N na extremidade livre da porca de extensão como situação extrema. As peças analisadas são de alumínio 6063-T5, sendo fixadas nos furos existentes no elemento de fixação do rolo de carga. Tendo em conta uma malha de tipo sólido (“solid mesh”) e um elemento de malha de aproximadamente 2,1 mm, bem como a inexistência de penetração dos elementos, a Figura 64 e Figura 65 apresentam as tensões e deformações do conjunto.

Atendendo à tensão de limite elástico do alumínio selecionado, os dados referentes às tensões e deslocamentos máximos dos elementos do conjunto em causa (Tabela 22) revelam que não são significativos. A tensão máxima observa-se na fixação do rolo de carga com $6,342 \times 10^1$ MPa, enquanto a deformação máxima verifica-se na porca na ordem dos $6,107 \times 10^{-2}$ mm. Não menos relevante, os valores de deformação foram calculados como indicado na 1ª simulação.

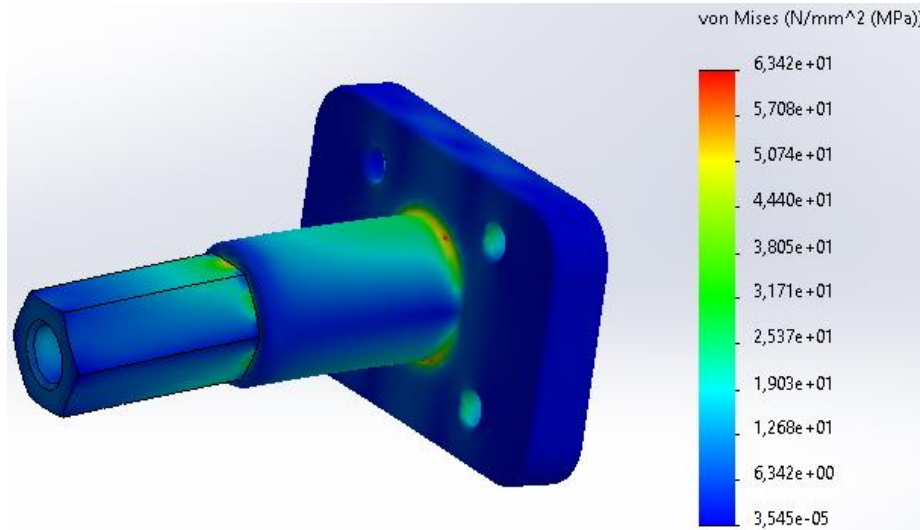


Figura 64 - Tensões na unidade de espalhamento e mistura

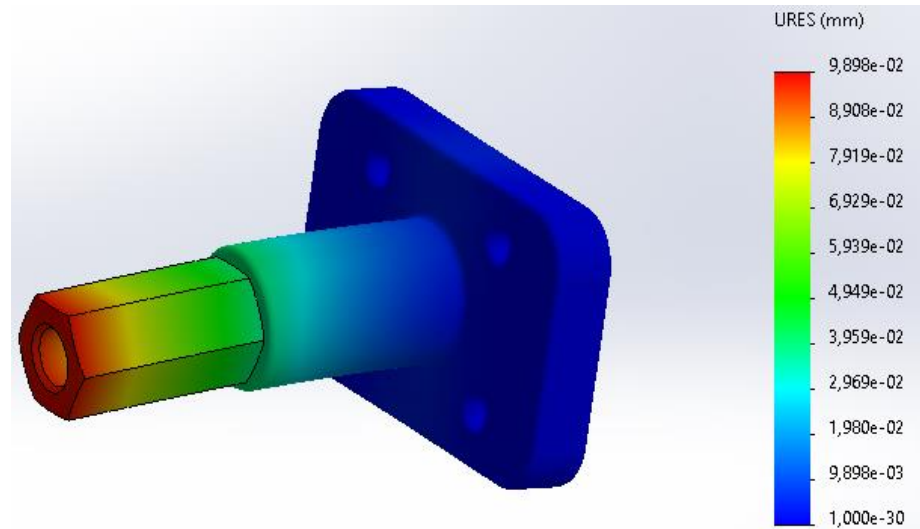


Figura 65 - Deslocamentos na unidade de espalhamento e mistura

Tabela 22 - Tensões e deformações máximas nos diferentes elementos do conjunto de espalhamento e pré-mistura

Componente	Tensão Máxima (MPa)	Deformação máxima (mm)
Fixação do rolo de carga	$6,342 \times 10^1$	$5,833 \times 10^{-2}$
Porca de extensão M12-36	$6,098 \times 10^1$	$6,107 \times 10^{-2}$

Tendo em conta as simulações realizadas, pode concluir-se que as estruturas das estações desenvolvidas asseguram a sua integridade estrutural e funcional, sendo viável o seu avanço para a etapa de prototipagem e teste.

4 Plano de experiências

De modo a analisar a influência das adaptações implementadas no equipamento de “commingling” nas variáveis de processo e nas propriedades mecânicas e de homogeneidade do fio híbrido foi definido um plano de experiência. Para tal recorreu-se à metodologia DOE, “Design of experiments”, e ao “Design of Experiment 13®” para obtenção de um plano de estudos ideal.

O DOE integra num ramo de estatística aplicada que engloba o planeamento, análise e interpretação da influência das variáveis que controlam as diferentes respostas a anotar e avaliar. Ao contrário de plano de experiências tradicional, onde somente uma variável é alterada, esta metodologia experimental permite revelar as relações existentes entre as diferentes variáveis a partir da manipulação de múltiplos parâmetros em simultâneo e sua combinação, de forma a compreender os seus impactos relativos. Além disso, esta ferramenta de recolha e análise experimental permite gerar modelos que contabilizam todas as combinações existentes (fatorial completo) ou apenas uma porção das combinações existentes (fatorial fracionário) para minimizar custos e reduzir o tempo dedicado à experimentação (ASQ 2021; JMP 2019).

Muitas das experiências ao envolverem apenas a mudança de uma variável de cada vez (OFAT ou “one factor at a time”) tornam o processo ineficiente comparativamente à mudança simultânea de variáveis. O planeamento da estrutura e execução das experiências permite evitar problemas que geralmente ocorrem durante a análise. Assim sendo, é essencial que o plano seja realizado numa sequência aleatória de amostras de forma a mitigar ou até eliminar os efeitos de variáveis desconhecidas ou incontrolláveis, bem como aplicar um método fatorial fracionário caso o número de variáveis de entrada seja elevado e fatorial completo quando o oposto acontece (ASQ 2021; JMP 2019).

De modo a averiguar e verificar a influência dos principais parâmetros de processo nas propriedades dos fios híbridos produzidos, foram identificadas cinco variáveis de entrada, nomeadamente: pressão, sobrealimentação da matriz, sobrealimentação do reforço, velocidade de produção e fração volúmica do reforço. Dada a quantidade de fatores em análise, foi selecionado o método fatorial fracionário designado por “Box-Benhken” com 3 níveis para cada uma das variáveis. Atendendo ao método escolhido, foi selecionada uma pressão mínima de 0,2 MPa (2 bar) e máxima de 0,4 MPa (4 bar), uma sobrealimentação do termoplástico a variar entre 2 e 4%, uma sobrealimentação do reforço com 1% de mínimo e 3% de máximo, uma velocidade de produção compreendida entre os 20 e 50 m/min e uma fração volúmica do reforço num intervalo de 30 a 50%.

O plano proposto, presente na Tabela 23, considera 46 amostras a efetuar na configuração original da máquina de “commingling” e mais tarde no equipamento com as devidas alterações implementadas, para validação do projeto e otimização das variáveis.

Tabela 23 - Plano de testes proposto na máquina antes e após otimização do processo de “commingling”

Amostra	Pressão (MPa)	Sobrealimentação da matriz (%)	Sobrealimentação do reforço (%)	Velocidade de produção (m/min)	Fração volúmica do reforço (%)
1	0,2	3	1	35	40
2	0,3	3	2	35	40
3	0,3	3	2	20	50
4	0,4	3	3	35	40
5	0,4	3	2	35	50
6	0,4	2	2	35	40
7	0,3	3	1	20	40
8	0,2	3	2	50	40
9	0,3	2	3	35	40
10	0,3	3	1	35	50
11	0,2	3	2	35	50
12	0,3	3	1	50	40
13	0,3	3	2	35	40
14	0,3	2	2	35	30
15	0,2	3	2	35	30
16	0,3	2	2	20	40
17	0,3	3	2	35	40
18	0,3	3	3	20	40
19	0,3	2	2	35	50
20	0,3	3	2	50	50
21	0,3	4	2	20	40
22	0,3	4	2	35	50
23	0,4	3	2	20	40
24	0,3	3	3	35	30
25	0,3	4	1	35	40
26	0,3	3	2	35	40

27	0,3	4	2	35	30
28	0,4	3	2	35	30
29	0,3	4	3	35	40
30	0,3	3	2	35	40
31	0,2	2	2	35	40
32	0,3	2	1	35	40
33	0,2	4	2	35	40
34	0,3	3	2	20	30
35	0,4	4	2	35	40
36	0,3	3	3	35	50
37	0,3	2	2	50	40
38	0,3	3	2	50	30
39	0,3	3	3	50	40
40	0,3	4	2	50	40
41	0,2	3	2	20	40
42	0,3	3	1	35	30
43	0,4	3	1	35	40
44	0,4	3	2	50	40
45	0,3	3	2	35	40
46	0,2	3	3	35	40

No sentido de reduzir o número de experiências e caso não estejam cumpridas as condições necessárias para realização do plano anterior, recomenda-se uma redução das variáveis de entrada e seus níveis. Assim selecionam-se 2 níveis e como variáveis a pressão, sobrealimentação do termoplástico e velocidade de produção, pois apontam ser as variáveis chaves do processo de “commingling”. Face à diminuição dos fatores e níveis, a metodologia escolhida foi o fatorial completo com valores de pressão de 0,2 e 0,4 MPa (2 e 4 bar), 3 e 6% de sobrealimentação e 20 e 50 m/min para a velocidade de produção. O plano de experiências, como descrito na Tabela 24, possui apenas 8 amostras a realizar em ambas as máquinas (16 amostras no total), pelo que requiere um menor tempo de laboratório, material e investimento.

Tabela 24 - Plano de testes reduzido proposto na máquina antes e após otimização

Amostra	Pressão (MPa)	Sobrealimentação da matriz (%)	Velocidade de produção (m/min)
1	0,2	3	20
2	0,4	3	20
3	0,4	3	50
4	0,2	6	50
5	0,2	3	50
6	0,4	6	20
7	0,2	6	20
8	0,4	6	50

Após a formação dos fios “commingled” segundo o DOE delineado, as características dos fios híbridos serão avaliadas de acordo com os critérios definidos por uma versão modificada da ISO 2062, desenvolvida pelo INEGI. Apesar dos seus valores experimentais não serem admitidos comercialmente, eles possibilitam o estudo comparativo das características dos fios híbridos e retirar as devidas conclusões acerca do seu comportamento.

Posto isto, devem ser pelo menos registadas a frequência de nós, estabilidade de nós e regularidade dos nós, quanto às características superficiais. Em relação à homogeneidade, esta deve ser averiguada a partir do estudo microscópico da secção de corte dos fios e do grau de entrelaçamento. Relativamente às propriedades à tração, é essencial analisar as curvas de força/alongamento, assim como força máxima e alongamento na rotura. Por fim, a força máxima dos fios híbridos sujeitos a um nó prévio e sua evolução deve ser anotada de modo a analisar o comportamento não axial dos mesmos.

5 Conclusão

O processo de “commingling” constitui uma técnica inovadora que tem vindo a ganhar espaço na conceção de fios híbridos com reforços e termoplásticos para a produção de componentes em compósito, porém, o seu princípio de funcionamento com recurso a ar comprimido pode provocar a rotura das fibras.

A presente dissertação possibilitou constatar os diversos fatores de relevo no processo de “commingling” e sua influência. Estes são categorizados no conjunto que envolve as características dos reforços e termoplásticos (como propriedades, forma e diâmetro dos filamentos) e também nos parâmetros do processo (por exemplo pressão, sobrealimentação e velocidade de processamento). Não menos relevante, os parâmetros podem ser agregados no conjunto que engloba a geometria do bocal (número, forma e dimensões dos canais dos fios e do ar) e na estrutura da máquina de “commingling” (peças e fases de funcionamento). Destes parâmetros, constatou-se a possibilidade de um forte potencial para otimizar o equipamento existente, pelo que se sucedeu o desenvolvimento de uma estação de alimentação, guiamento, espalhamento e pré-mistura.

A solução adotada possui uma estrutura em perfil tipo Bosch que assegura um baixo peso da estrutura, modularidade, fácil montagem e manutenção. A geometria e posicionamento do sistema de guiamento, além de assegurar o alinhamento dos fios entre os diferentes estágios do processo, possibilita a ocorrência de uma dispersão inicial dos fios de alimentação. Já no caso da zona de espalhamento e pré-mistura, o uso de pares de cilindros resulta numa abertura e dispersão dos fios e subsequente combinação dos mesmos. A flexibilidade da posição vertical e horizontal dos diferentes conjuntos possibilita a adição de mais rolos de alimentação e outras componentes, bem como controlar o ângulo de envolvimento e consequente eficácia das etapas em causa.

Devido à impossibilidade de materializar as estações desenvolvidas, não se concretizou a realização do plano experimental delineado, razão pela qual não foi possível comprovar e quantificar a melhoria que as alterações empregues provocariam no sistema. Porém, atendendo aos artigos científicos sobre o tema, pode afirmar-se que as novas secções de espalhamento e de combinação das fibras de reforço e filamentos termoplásticos introduzidas devem proporcionar melhorias na eficácia do sistema de “commingling”. Tal indisponibilidade deveu-se à situação pandémica atualmente vivida onde as limitações de circulação, entrada em espaços, e aquisição de material não permitiram cumprir o plano de trabalhos previsto no âmbito desta tese.

6 Trabalhos Futuros

A continuação da presente dissertação levaria à realização de aspetos que carecem de maior desenvolvimento e análise ou que não puderam ser realizados, nomeadamente:

- Montagem da estrutura e estações desenvolvidas
- Realização do plano de testes delineado de modo a averiguar o impacto da solução adotada e influência das variáveis
- Análise do impacto da cobertura dos cilindros de espalhamento na redução do atrito a que os fios de reforço e termoplástico estão sujeitos, como a introdução de coberturas de borracha natural ou estireno-butadieno nos cilindros (Flexorol 2016)
- Avaliação da influência da utilização de motorização individual dos cilindros e de diferentes velocidades relativas na estabilidade dos fios, extensão e redução da espessura das fibras e filamentos
- A influência relativa do uso de “sizings” distintos nas propriedades mecânicas dos fios de acordo com os seus fornecedores
- Estudo aprofundado da geometria do bocal de “commingling” (ângulo, tamanho, comprimento do canal principal e canais de ar e número de canais de ar) e escoamentos gerados no seu interior
- Prova de conceito acerca da influência da temperatura e análise da viabilidade da construção de uma câmara térmica.

Referências

- Acar, M., R. K. Turton, and G. R. Wray. 1986. “18—An Analysis of the Air-Jet Yarn Texturing Process Part IV: Fluid Forces Acting on the Filaments and the Effects of Filament Cross Sectional Area and Shape.” *Journal of the Textile Institute* 77 (4): 247–54. <https://doi.org/10.1080/00405008608658417>.
- Akonda, M. H., C. A. Lawrence, and B. M. Weager. 2012. “Recycled Carbon Fibre-Reinforced Polypropylene Thermoplastic Composites.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43 (1): 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.014>.
- Alagirusamy, R., and Vinayak Ogale. 2005. “Development and Characterization of GF/PET, GF/Nylon, and GF/PP Commingled Yarns for Thermoplastic Composites.” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 18 (3): 269–85. <https://doi.org/10.1177/0892705705049557>.
- Alfredo Balacó de Moraes, António Gonçalves de Magalhães, and Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de Moura. 2009. *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2ª Edição.
- Angelov, I., S. Wiedmer, M. Evstatiev, K. Friedrich, and G. Mennig. 2007. “Pultrusion of a Flax/Polypropylene Yarn.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38 (5): 1431–38. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.01.024>.
- Anil, Arya, Jose E. Tomlal, Gejo George, Jomit T. Mathew, and V. B. Manilal. 2016. “Novel Eco-Friendly Commingled Polypropylene/Banana Fiber Composite: Studies on Thermal and Mechanical Properties.” *Polymer Bulletin* 73 (11): 2987–3005. <https://doi.org/10.1007/s00289-016-1636-0>.
- ASQ. 2021. “What Is Design of Experiments (DOE)? | ASQ.” 2021. <https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>.
- Bernet, N., V. Michaud, P. E. Bourban, and J. A.E. Månson. 2001. “Commingled Yarn Composites for Rapid Processing of Complex Shapes.” *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing* 32 (11): 1613–26. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00180-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00180-9).
- Castiglioni, Matteo. 2008. “Control and Stability in Velocity of Individually Driven Drawing Godets for Thermoplastic Filament Yarns.” <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010025751>.
- Chari, V. Srinivasa, P. R. Venkatesh, Krupashankar, and Veena Dinesh. 2018. “Effect of Processing Parameters on FDM Process.” *AIP Conference Proceedings* 1943 (June 2007): 2007. <https://doi.org/10.1063/1.5029637>.
- Cherif, Chokri. 2016. *Textile Materials for Lightweight Constructions: Technologies - Methods - Materials – Properties*. *Textile Materials for Lightweight Constructions: Technologies*

- *Methods - Materials - Properties*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46341-3>.
- Choi, B.-D, O Diestel, and P Offermann. 1999. “Commingled CF/PEEK Hybrid Yarns for Use in Textile Reinforced High Performance Rotors.” *12th International Conference on Composite Materials (ICCM)*, 796–806. <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap528.pdf>.
- Choi B. D. 2005. “Development of Commingling Hybrid Yarns for Fiber Reinforced Thermoplastic Composites.” PhD Thesis, TU Dresden, Faculty for Mechanical Engineering, Dresden: TUD Press.
- CompositesWorld. 2016. “Materials & Processes: Fibers for Composites | CompositesWorld.” *CompositesWorld*, 2016. <https://www.compositesworld.com/articles/the-fiber>.
- David Rig. 2001. “An Overview of Development and Trends in the Use of Composite for Technical Textile Application.”
- Denkena, Berend, Carsten Schmidt, and Maximilian Kaczemirzk. 2021. “Influence of a Dynamic Consolidation Force on In Situ Consolidation Quality of Thermoplastic Composite Laminate,” 1–12.
- Effing, Michael. 2018. “Expert Insights in Europe’s Booming Composites Market.” *Reinforced Plastics* 62 (4): 219–23. <https://doi.org/10.1016/j.repl.2017.06.086>.
- Flexorol. 2016. “Matérias-Primas | Flexocol.” 2016. <http://flexocol.pt/raw-materials/>.
- Ginger Gardiner. 2018. “How Is Tow Spread? | CompositesWorld.” 2018. <https://www.compositesworld.com/articles/how-is-tow-spread>.
- Gong, R. H. 2011. *Specialist Yarn and Fabric Structures: Developments and Applications*. *Specialist Yarn and Fabric Structures: Developments and Applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857093936>.
- Herath, Chathura Nalendra, Bok Choon Kang, Beong Bok Hwang, Kyung Ho Min, Jung Min Seo, In Chul Lee, Jayasekara Vishara Ruchiranga, and Joong Yeon Lim. 2008. “Microscopic Evaluation and Analysis on the Tensile Strength of Hybridized Reinforcement Filament Yarns by the Commingling Process.” *Advanced Composite Materials* 17 (3): 225–33. <https://doi.org/10.1163/156855108X345234>.
- Iftay Khairul Alam. 2020. “Draw Frame: Functions|Drafting Arrangement|Roller Setting|Autoleveller - TextileTuts Yarn Manufacturing.” 2020. <https://textiletuts.com/draw-frame/>.
- Jalal Uddin, A. 2010. *Novel Technical Textile Yarns*. *Technical Textile Yarns*. <https://doi.org/10.1533/9781845699475.2.259>.
- JMP. 2019. “Design of Experiments | JMP.” 2019. https://www.jmp.com/en_us/applications/design-of-experiments.html.
- José António Almacinha, and José Simões Morais. 2017. *DESENHO DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA - Apontamentos Teórico-Práticos*.
- José Manuel de Simões Morais. 2016. *DESENHO TÉCNICO BÁSICO*. Edited by José Manuel de Simões Morais. 26^aEdition.
- Khan, Shahzad Maqsood, Nafisa Gull, Muhammad Azeem Munawar, Saba Zia, Farheen Anjum, Muhammad Sajid Iqbal, Muhammad Shafiq, et al. 2016. “Polyphenylene Sulphide/Carbon Fiber Composites: Study on Their Thermal, Mechanical and Microscopic Properties.” *Iranian Polymer Journal (English Edition)* 25 (6): 475–85.

<https://doi.org/10.1007/s13726-016-0439-3>.

- Kothari, V. K., and N. B. Timble. 1991. "Air-Jet Texturing: Effect of Jet Type and Some Process Parameters on Properties of Air-Jet Textured Yarns." *Indian Journal of Fibre & Textile Research* 16 (16(1), March): 29–38.
- Kravaev, Plamen, Oleg Stolyarov, Gunnar Seide, and Thomas Gries. 2014. "Influence of Process Parameters on Filament Distribution and Blending Quality in Commingled Yarns Used for Thermoplastic Composites." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 27 (3): 350–63. <https://doi.org/10.1177/0892705712446167>.
- Krucińska, Izabella, E Kłata, W Ankudowicz, and H Dopierała. 2001. "Influence of the Structure of Hybrid Yarns on the Mechanical Properties of Thermoplastic Composites." *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 9 (April): 38–41.
- Lauke, B., U. Bunzel, and K. Schneider. 1998. "Effect of Hybrid Yarn Structure on the Delamination Behaviour of Thermoplastic Composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 29 (11): 1397–1409. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00059-1).
- Lazauskas V., Lukosaitis A. And Matukonis A. 1987. "Effect of the Design Parameters of the Aerodynamic Device on the Tangle Lacing Intensity of Filament Yarns."
- Lekube, Blanca Maria, Wolfgang Hermann, and Christoph Burgstaller. 2020. "Partially Compacted Polypropylene Glass Fiber Non-Woven Composite: Influence of Processing, Porosity and Fiber Length on Mechanical Properties and Modeling." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 135 (May): 105939. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105939>.
- Long, Andrew, C E Wilks, and Christopher Rudd. 2001. "Experimental Characterisation of the Consolidation of a Commingled Glass/Polypropylene Composite." *Composites Science and Technology* 61 (August): 1591–1603. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00059-8).
- Loughborough University of Technology. 1989a. "Air-Jet Texturing and Mingling/ - Interlacing."
- . 1989b. "Texturing and Intermingling process by Using Air-Jets."
- Ma, Yan, Shanshan Jin, Masahito Ueda, Tomohiro Yokozeki, Yuqiu Yang, Fumitake Kobayashi, Hiroaki Kobayashi, Toshi Sugahara, and Hiroyuki Hamada. 2018. "Higher Performance Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites from Thermoplastic Prepreg Technique: Heat and Moisture Effect." *Composites Part B: Engineering* 154 (August): 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.060>.
- Mäder, E., J. Rausch, and N. Schmidt. 2008. "Commingled Yarns - Processing Aspects and Tailored Surfaces of Polypropylene/Glass Composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39 (4): 612–23. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.07.011>.
- Mankodi, H.R. 2016. "Effect of Nozzle Design and Processing Parameter on Characteristics of Glass / Polypropylene Hybrid Yarns Effect of Nozzle Design and Processing Parameter on Characteristics of Glass / Polypropylene Hybrid Yarns." *Journal of Engineering Research and Applications* 4 (December 2014): 144–49.
- Mankodi, Hireni, and Pravin Patel. 2009. "Study the Effect of Commingling Parameters on Glass/Polypropylene Hybrid Yarns Properties." *Autex Research Journal* 9 (3): 70–73.

- Mankodi, Hireni R. 2007. “Effect of Processing Parameters on Co-Mingling Behaviour and Properties of Hybrid Yarns.”
- Miao, Menghe, and Mei-Chun Christa Soong. 1995. “Air Interlaced Yarn Structure and Properties.” *Textile Research Journal* 65 (8): 433–40. <https://doi.org/10.1177/004051759506500801>.
- Naeem, Muhammad Awais, Nicholus Tayari Akankwasa, Adélaïde Leroy, Qasim Siddiqui, and Afzal Ahmad. 2018. “A Study of Novel Multifilament Spreading and Feeding Method , to Produce Filament Wrapped- Staple Core Composite Yarn Using Modified Ring Frame.” *The Journal of The Textile Institute* 5000 (May): 1–8. <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1480342>.
- Naeem, Muhammad Awais, Weidong Yu, and Yong-hong Zheng. 2015. “Structure and Spinning of Composite Yarn Based on the Multifilament Spreading Method Using a Modified Ring Frame.” <https://doi.org/10.1177/0040517514532163>.
- Ogale, V., and R. Alagirusamy. 2007. “Tensile Properties of GF-Polyester, GF-Nylon, and GF-Polypropylene Commingled Yarns.” *Journal of the Textile Institute* 98 (1): 37–45. <https://doi.org/10.1533/joti.2005.0181>.
- Ogale, Vinayak, and R. Alagirusamy. 2008. “Properties of GF/PP Commingled Yarn Composites.” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 21 (6): 511–23. <https://doi.org/10.1177/0892705708091281>.
- Ramasamy, A, Youjiang Wang, and John Muzzy. 1996. “Braided Thermoplastic Composites from Powder-Coated Towpregs. Part II: Braiding Characteristics of Towpregs.” *Polymer Composites* 17 (3): 505–14. <https://doi.org/10.1002/pc.10640>.
- Righetti, Bárbara, Ricardo Mello, Di Benedetto, Denise Hirayama, and Olívia De Andrade. 2017. “Manufacturing and Characterization of Jute / PP Thermoplastic Commingled Composite 2 . Experimental Procedures.” *Materials Research* 20: 458–65.
- Rok, Z A, Ing Mohanapriya Venkataraman, D Ph, Ing Alžbeta Samková, Ing Jana Novotná, and Ing Karolína Voleská. 2017. “O DBORNÁ ZPRÁVA O POSTUPU PRACÍ A DOSAZENÝCH VÝSLEDČÍCH Review on Hybrid Yarn , Structure and Techniques.”
- Schäfer, Jens, Oleg Stolyarov, Rana Ali, Christoph Greb, Gunnar Seide, and Thomas Gries. 2016. “Process–Structure Relationship of Carbon/ Polyphenylene Sulfide Commingled Hybrid Yarns Used for Thermoplastic Composites.” *Journal of Industrial Textiles* 45 (6): 1661–73. <https://doi.org/10.1177/1528083715569372>.
- Standard, International. 1995. “Textiles- ~ ISOJ” 1993.
- Svensson, N., R. Shishoo, and M. Gilchrist. 1998. “Manufacturing of Thermoplastic Composites from Commingled Yarns - A Review.” *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 11 (1): 22–56. <https://doi.org/10.1177/089270579801100102>.
- TeXtreme. 2014. “What Is Spread Tow Technology – TeXtreme.” 2014. <https://www.textreme.com/technology/what-is-spread-tow-technology/>.
- Torun, A, G Hoffmann, Adil Mountasir, and Ch Cherif. 2012. “Effect of Twisting on Mechanical Properties of GF/PP Commingled Hybrid Yarns and UD-Composites.” *Journal of Applied Polymer Science* 123 (January): 246–56. <https://doi.org/10.1002/app.34458>.
- V, Nayana, and Balasubramanian Kandasubramanian. 2020. “Advanced Polymeric Composites via Commingling for Critical Engineering Applications.” *Polymer Testing* 91

- (August): 106774. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106774>.
- Vishnu Vardhini, K. J., R. Murugan, and R. Surjit. 2018. "Effect of Alkali and Enzymatic Treatments of Banana Fibre on Properties of Banana/Polypropylene Composites." *Journal of Industrial Textiles* 47 (7): 1849–64. <https://doi.org/10.1177/1528083717714479>.
- Wakeman, M. D., T. A. Cain, C. D. Rudd, A. C. Long, and R. Brook. 1995. "Proc. 4th International Conf. Automated Composites."
- Xu, Dongxia, Baoying Liu, Gang Zhang, Shengru Long, Xiaojun Wang, and Jie Yang. 2016. "Effect of Air Plasma Treatment on Interfacial Shear Strength of Carbon Fiber-Reinforced Polyphenylene Sulfide." *High Performance Polymers* 28 (4): 411–24. <https://doi.org/10.1177/0954008315585012>.
- Ye, Lin, Klaus Friedrich, Joachim Kästel, and Yiu Wing Mai. 1995. "Consolidation of Unidirectional CF/PEEK Composites from Commingled Yarn Prepreg." *Composites Science and Technology* 54 (4): 349–58. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00061-5).

Anexo A - Rolamento W 6201



W 6201 Rolamentos rígidos de esferas

Rolamentos rígidos de esferas

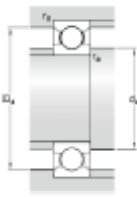
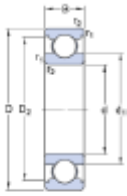
Dados do rolamento

Tolerâncias,
Normal (métrico), P6, P5, Normal
(polegadas),
Folga interna radial,
Pares de rolamentos parados, Apo
insustentável d < 10 mm, Outros
rolamentos

Interfaces do rolamento

Tolerâncias de assento para
condições padrão,
Tolerâncias e ajustes resultantes

Especificações técnicas



DIMENSÕES

d	12 mm	Diâmetro do furo
D	32 mm	Diâmetro externo
B	10 mm	Largura
d ₁	± 18.5 mm	Diâmetro do ressalto do anel interno
D ₂	± 27.95 mm	Diâmetro do rebaixo do ressalto do anel externo
r _{1,2}	min. 0.6 mm	Dimensão de chanfro do anel externo

DIMENSÕES DO ENCOSTO

d ₁	min. 16 mm	Diâmetro do encosto do eixo
D	max. 28.5 mm	Diâmetro do encosto do mancal
r _s	max. 0.6 mm	Raio de concordância



Página 1 de 4

DADOS DE CÁLCULO

C	5.72 kN	Classificação de carga dinâmica básica
C ₀	3 kN	Classificação de carga estática básica
P _a	0.127 kN	Limite de carga de fadiga
	53 000 r/min	Velocidade de referência
	34 000 r/min	Velocidade-limite
k _r	0.03	Fator de cálculo
f ₀	12	Fator de cálculo

MASSA

0.034 kg	Massa do rolamento
----------	--------------------

TOLERANCE CLASS

Normal	Dimensional tolerances
Normal	Radial run-out

Anexo B - Rolo de carga em aço



1-3 | Rolos de carga em aço

- Construção em aço duradoura e altamente resistente
- Marcha suave para fluxo de material impecável
- Disponível com eixos em diferentes variantes

Material: aço.

		1	2	3
Versão do eixo		eixo de mola	eixo roscado M 10 x 20	eixo roscado M 12 x 20
Ø do eixo	mm	10	10	12
Ø dos rolos	mm	50	50	60
Comprimento do rolo				
200 mm	N.º	176 079 6F	176 567 6F	176 889 6F
	€	15.95	18.95	19.95
300 mm	N.º	176 109 6F	176 591 6F	176 893 6F
	€	17.95	20.90	22.90
400 mm	N.º	176 133 6F	176 621 6F	176 923 6F
	€	18.95	21.90	24.90
500 mm	N.º	176 176 6F	176 664 6F	176 966 6F
	€	19.95	22.90	26.90
600 mm	N.º	176 206 6F	176 699 6F	176 990 6F
	€	22.90	24.90	28.90
800 mm	N.º	176 265 6F	176 753 6F	177 059 6F
	€	25.90	29.90	33.90
1000 mm	N.º	176 044 6F	176 532 6F	176 834 6F
	€	27.90	32.90	38.90

Anexo C - Porca de extensão M12-36

Descrição do artigo/Imagens dos produtos



Descrição

Material:

Aço temperado.

Versão:

Aço com classe de resistência 10, brunido.

Indicação:

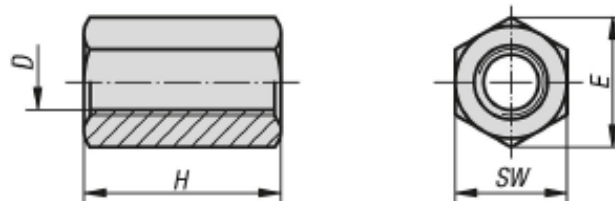
Por motivos de segurança e para o bom funcionamento, os parafusos devem ser aparafusados de ambos os lados no máximo até metade da altura da porca. Comprimento mínimo de aparafusamento 1x diâmetro.

Sob consulta:

Tamanhos de chaves de acordo com a norma DIN ISO 272.



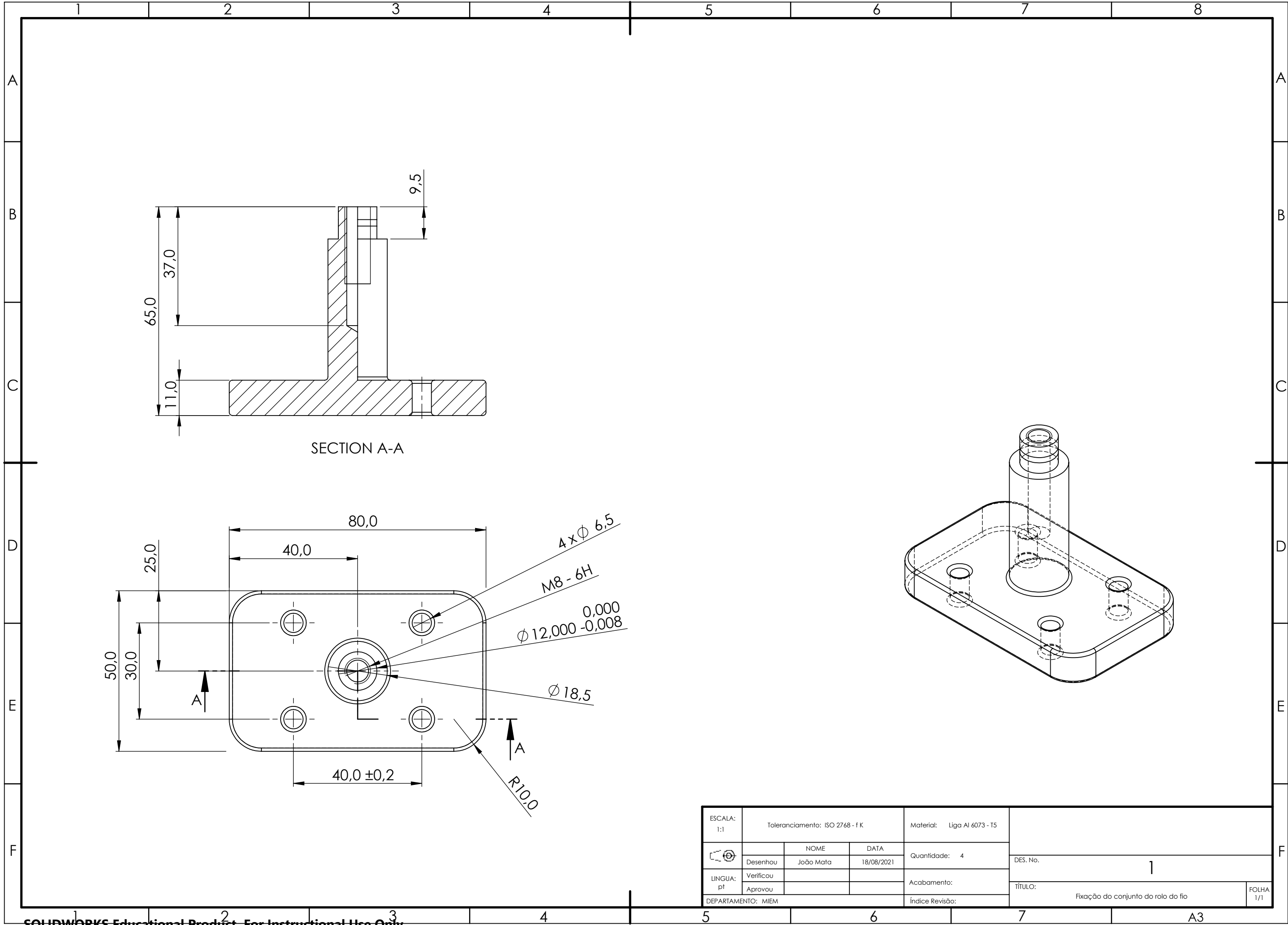
Desenhos



Novos fios híbridos para compósitos

Código do artigo	D	H = 3 x D	SW	E
07220-06	M6	18	10	11,5
07220-08	M8	24	13	15
07220-10	M10	30	17	19,6
07220-12	M12	36	19	21,9
07220-14	M14	42	22	25,4
07220-16	M16	48	24	27,7
07220-18	M18	54	27	31,2
07220-20	M20	60	30	34,6
07220-22	M22	66	32	36,9
07220-24	M24	72	36	41,6
07220-27	M27	81	41	47,3
07220-30	M30	90	46	53,1
07220-36	M36	108	55	63,5

Anexo D - Desenhos técnicos e de montagem



1

2

3

4

A

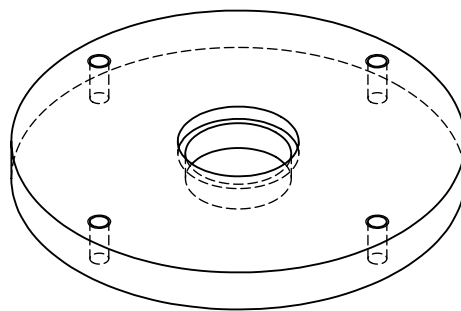
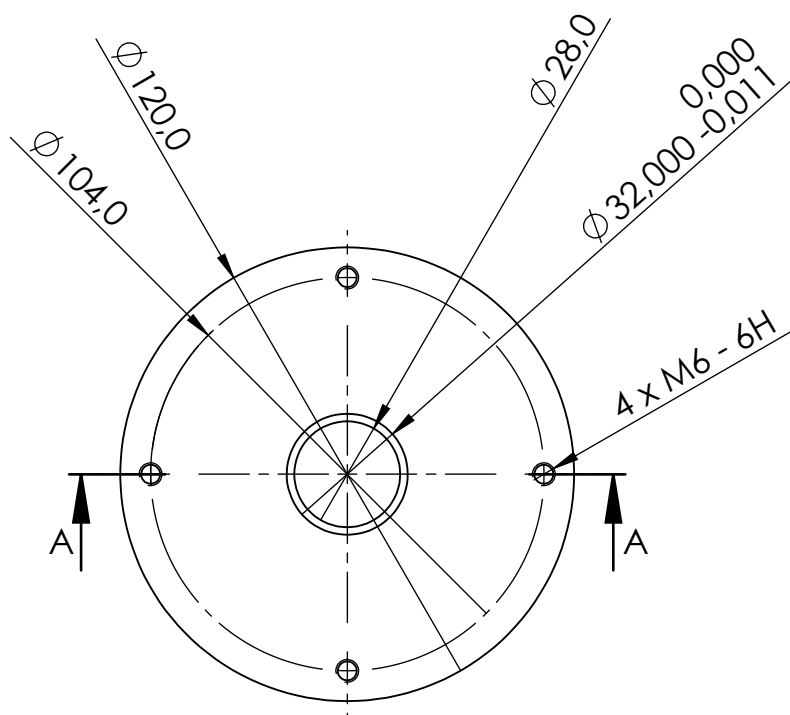
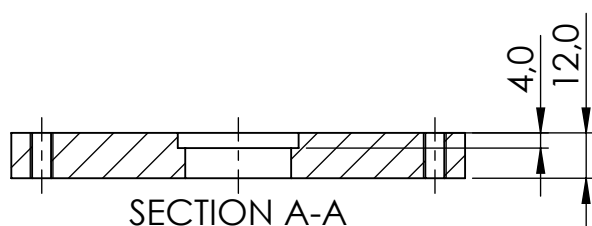
B

C

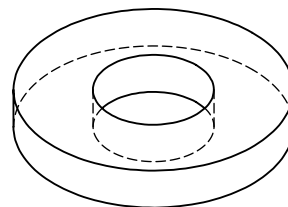
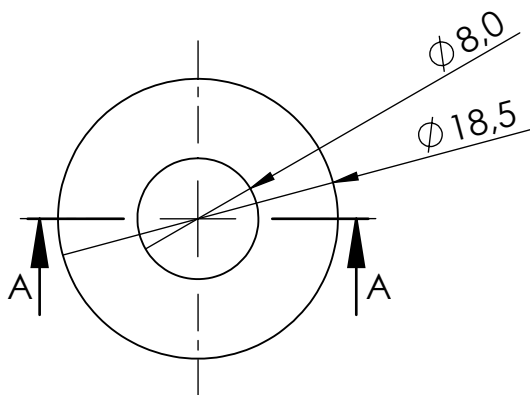
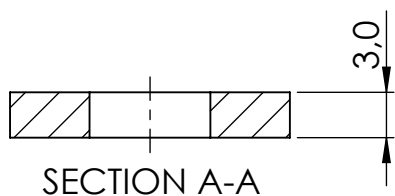
D

E

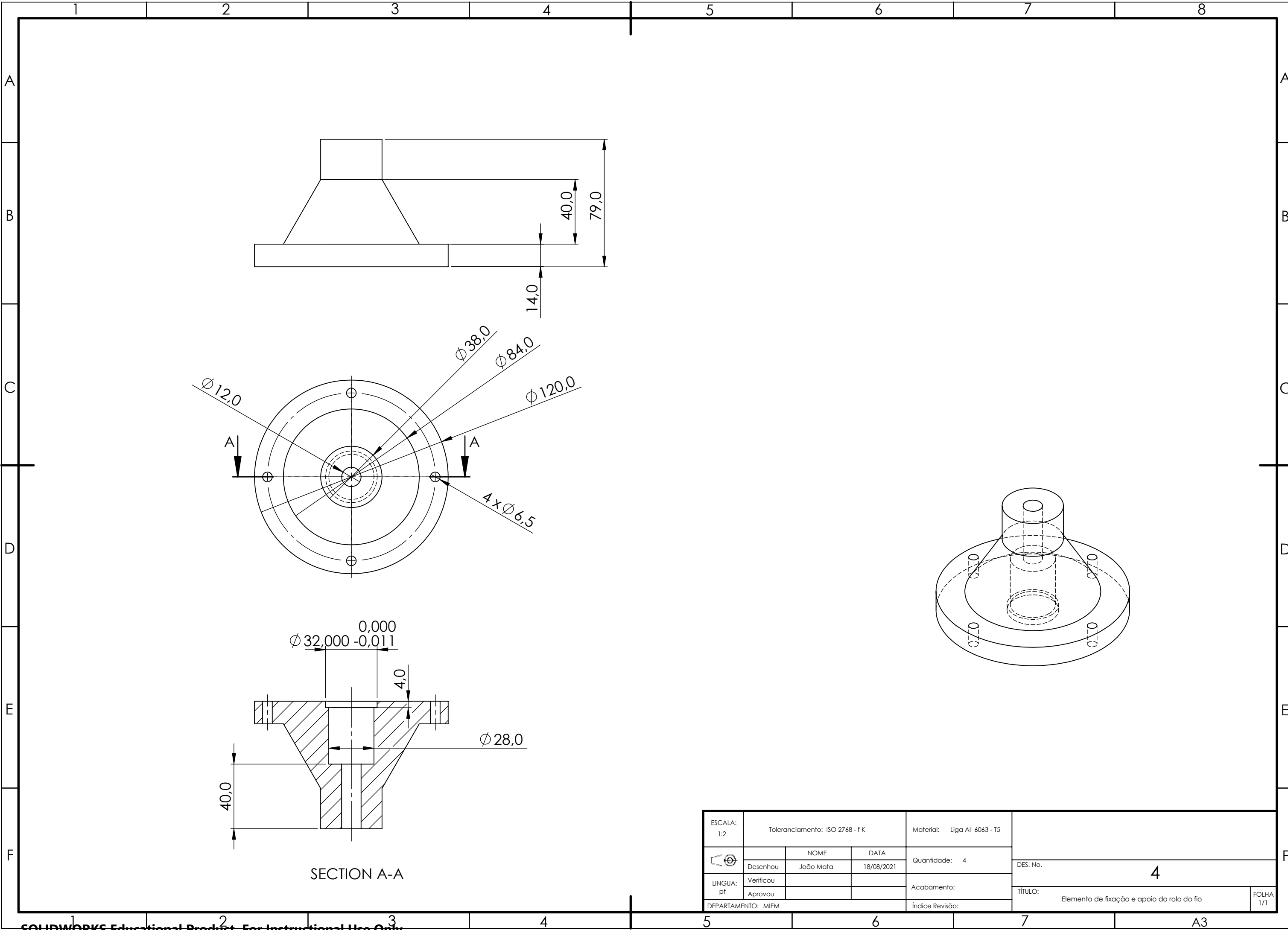
F



ESCALA: 1:2	Toleranciamento: ISO 2768 - f K			MATERIAL : Liga Al 6063 - T5	DES. No. 2 TÍTULO: Elemento de fixação e acoplamento do rolamento		FOLHA 1/1
		NOME	DATA	QUANTIDADE : 4			
LINGUA: pt	Desenhou	João Mata	18/08/2021	ACABAMENTO:			
	Verificou			INDICE REVISAO:			
DEPARTAMENTO: MIEM							



ESCALA: 2:1	Toleranciamento: ISO 2768 - f K			MATERIAL : Liga Al 6063 - T5	DES. No. 3 TÍTULO: Anilha customizada			FOLHA 1/1	
		NOME	DATA	QUANTIDADE : 1					
	Desenhou	João Mata	18/08/2021						
LINGUA: pt	Verificou			ACABAMENTO:					
	Aprovou								
DEPARTAMENTO: MIEM				ÍNDICE REVISÃO:					



ESCALA: 1:2	Toleranciamento: ISO 2768 - f K			Material: Liga Al 6063 - T5		
		NOME	DATA	Quantidade: 4		
LINGUA: pt	Desenhou	João Mata	18/08/2021	Quantidade: 4	DES. No. 4	
	Verificou			Acabamento:	TÍTULO: Elemento de fixação e apoio do rolo do fio	
DEPARTAMENTO: MIEM				Índice Revisão:	FOLHA 1/1	

1

2

3

4

A

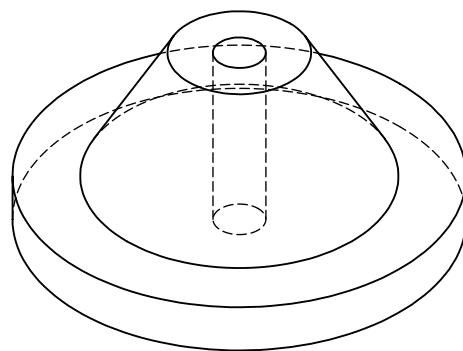
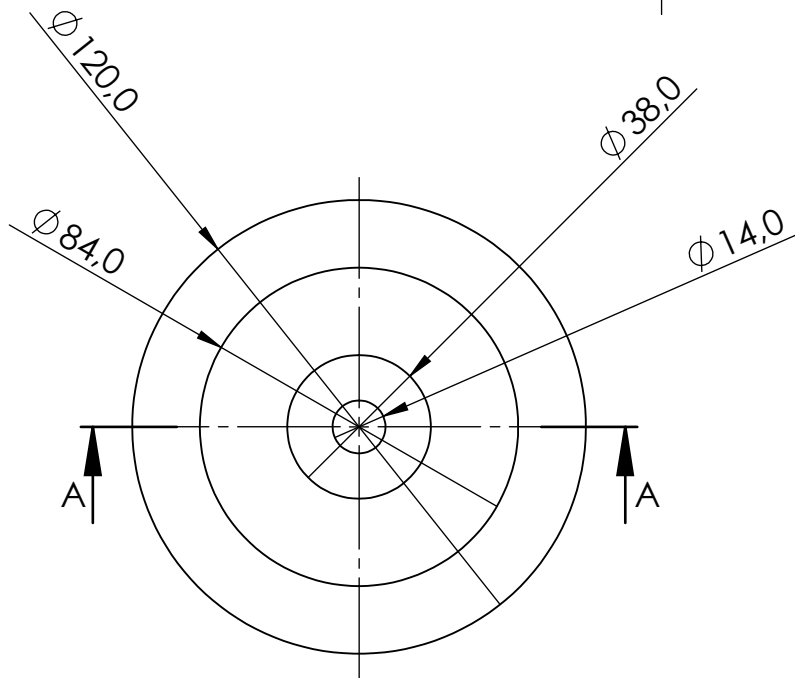
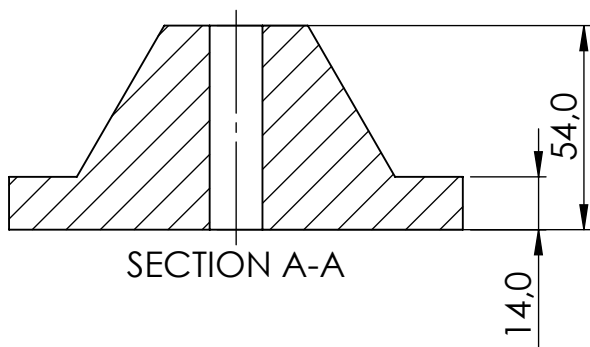
B

C

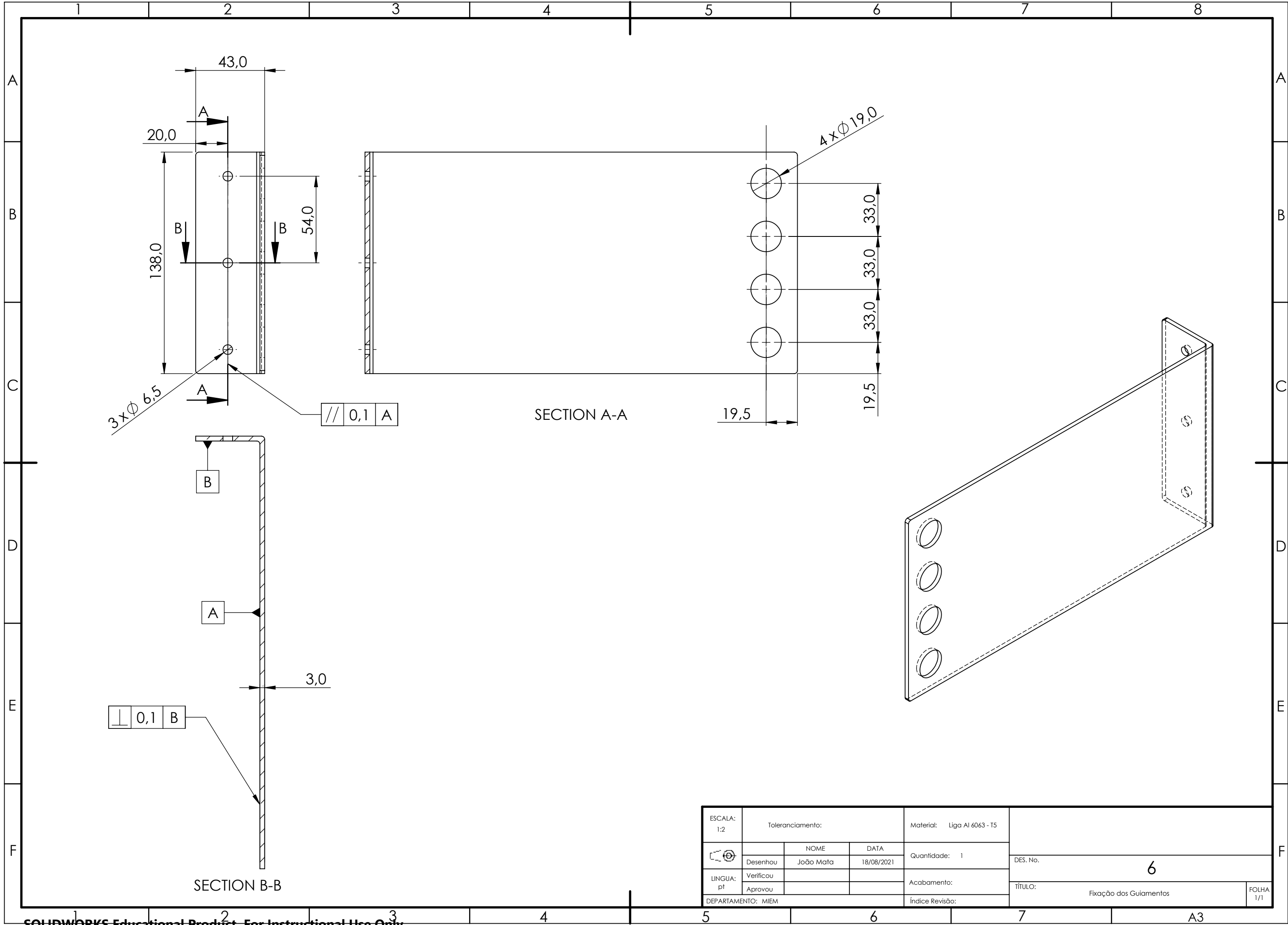
D

E

F



ESCALA: 1:2	Toleranciamento:			MATERIAL : ABS	DES. No. 5
		NOME	DATA	QUANTIDADE : 4	
	Desenhou	João Mata	18/08/2021		
	Verificou			ACABAMENTO:	
LINGUA: pt	Aprovou			INDICE REVISAO:	TÍTULO: Elemento de fixação e apoio do rolo do fio oposto
DEPARTAMENTO: MIEM					FOLHA 1/1



1

2

3

4

A

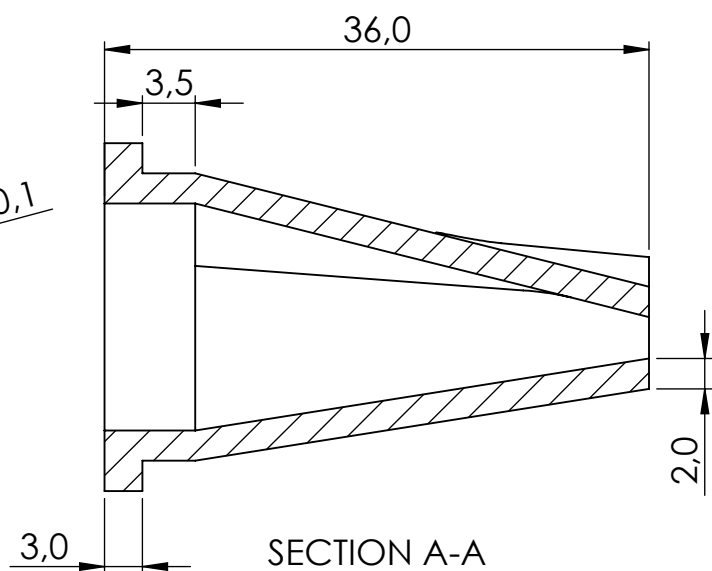
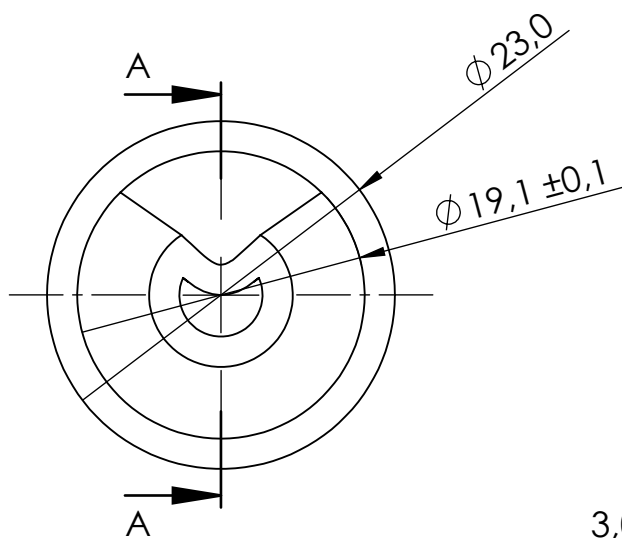
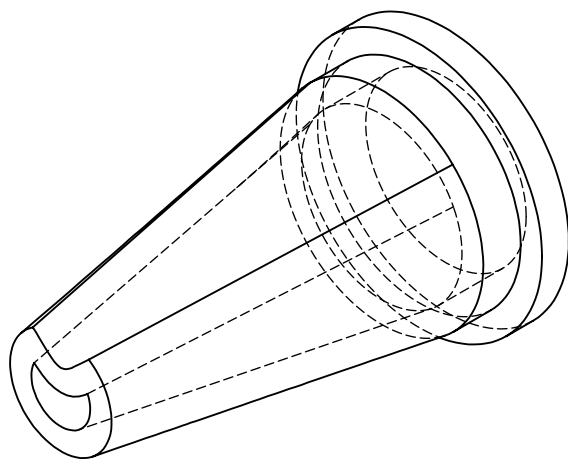
B

C

D

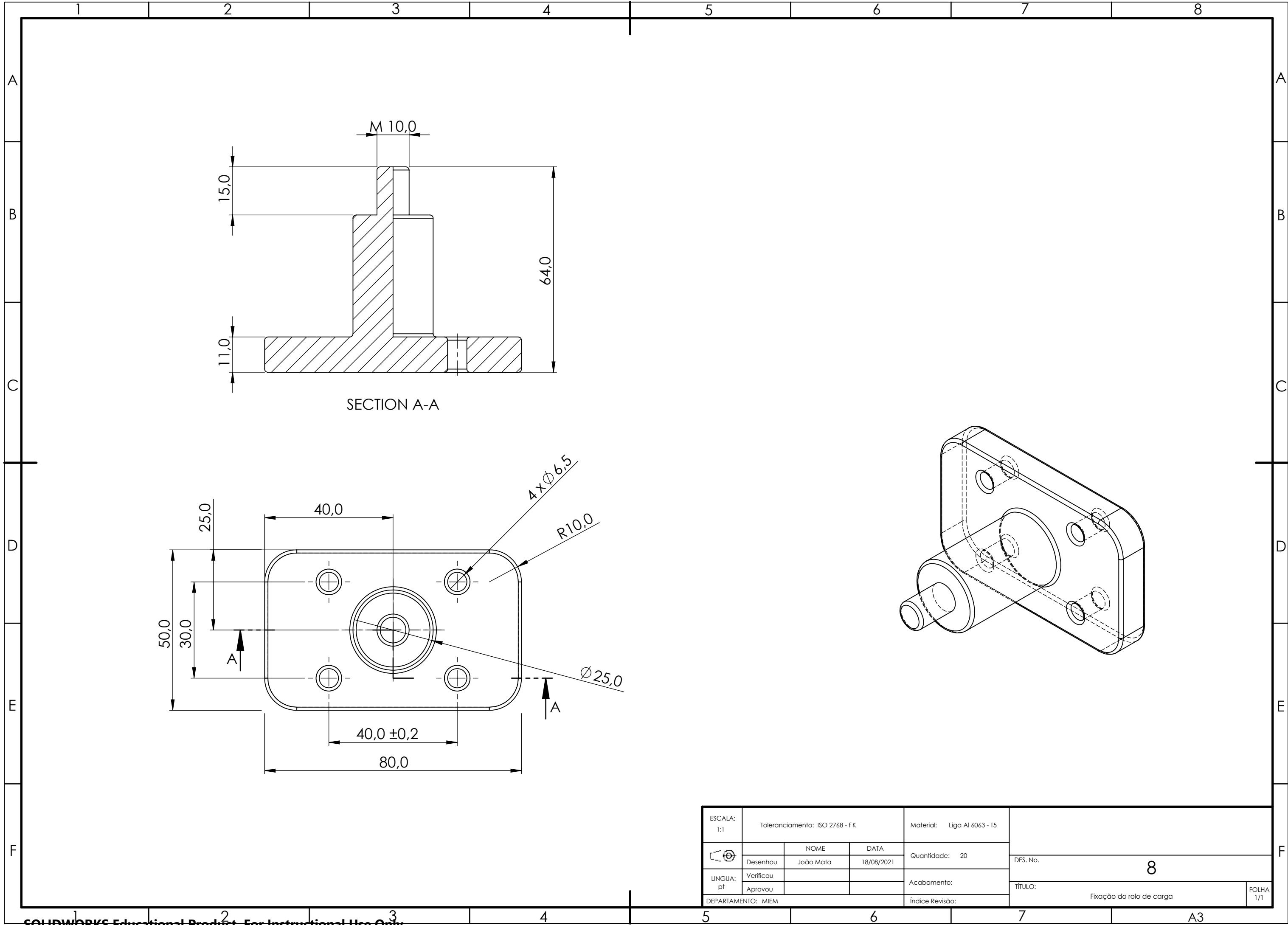
E

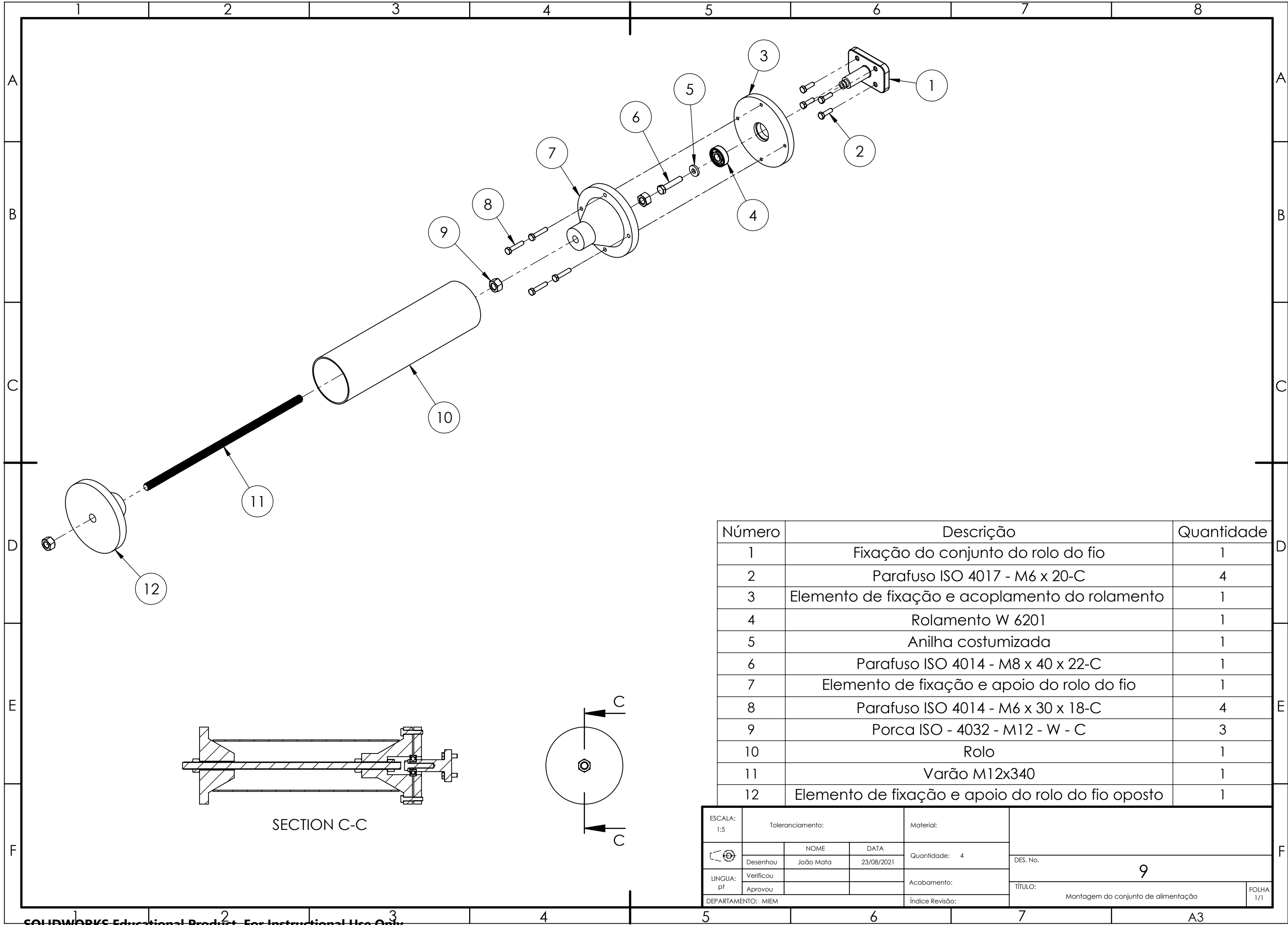
F



SECTION A-A

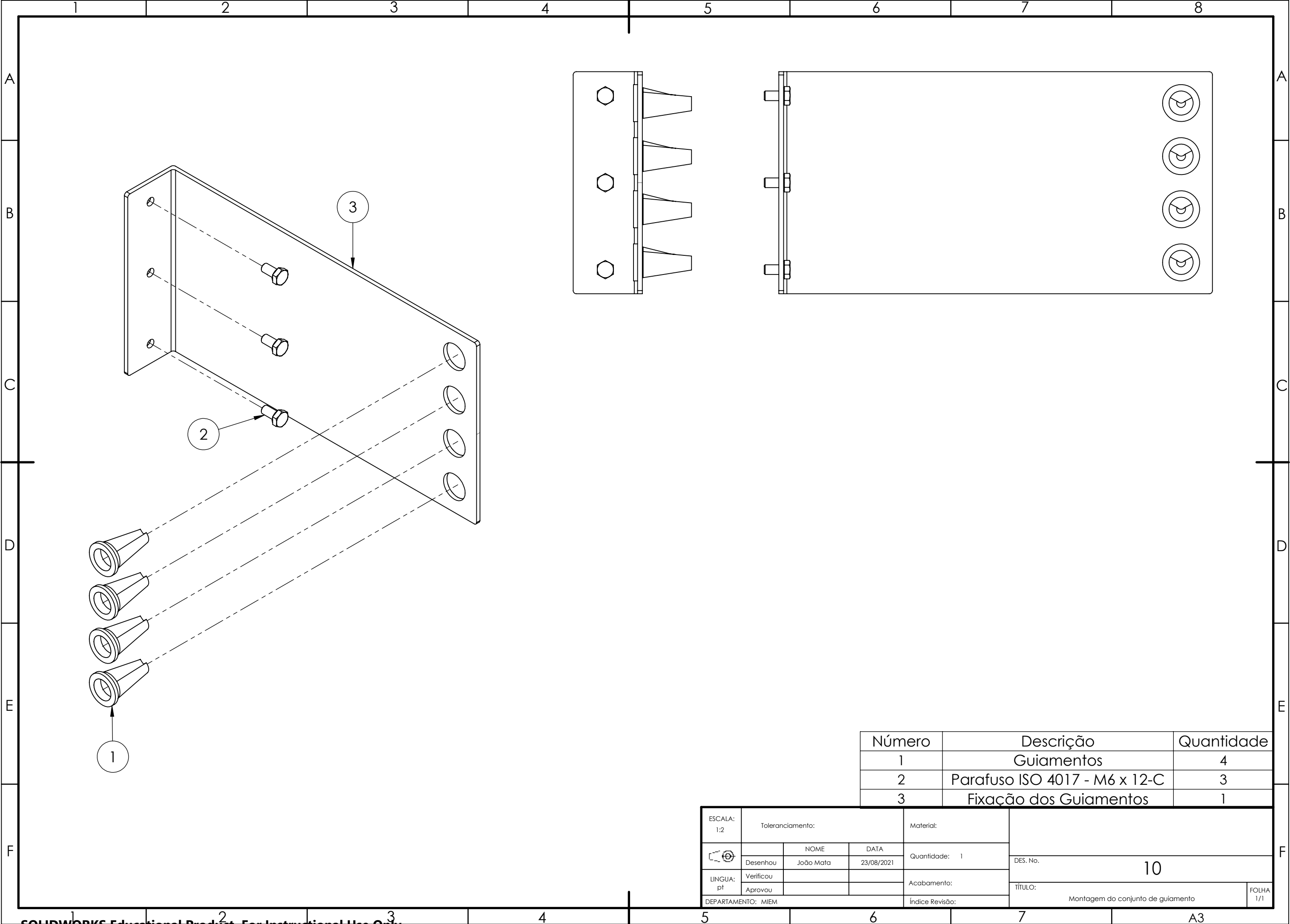
ESCALA: 2:1	Toleranciamento:			MATERIAL : ABS	DES. No. 7	
	Desenhou	NOME João Mata	DATA 18/08/2021	QUANTIDADE : 4		
LINGUA: pt	Verificou			ACABAMENTO:	TÍTULO: Guiamento	
	Aprovou					
DEPARTAMENTO: MIEM				INDICE REVISAO:	FOLHA 1/1	





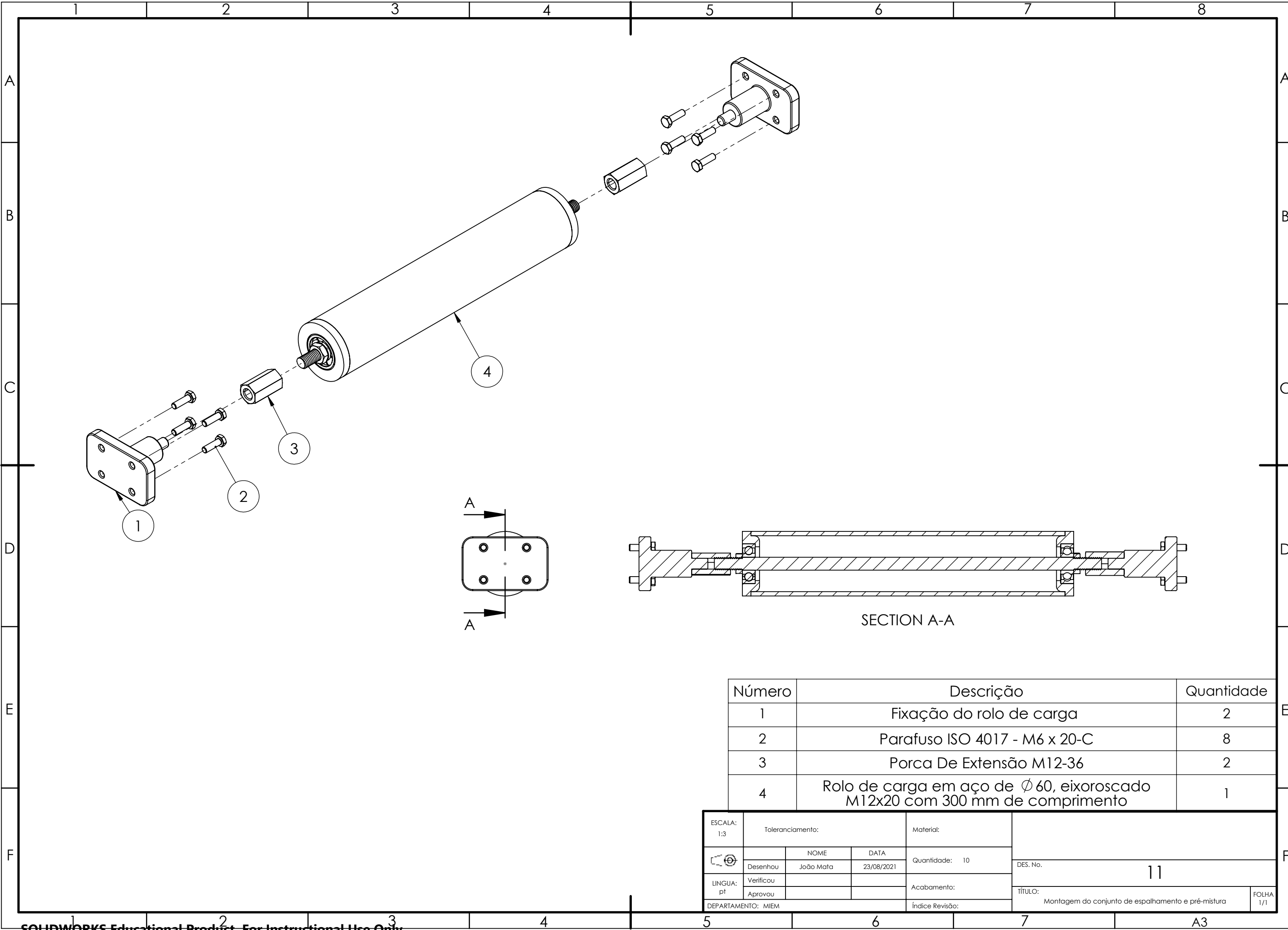
Número	Descrição	Quantidade
1	Fixação do conjunto do rolo do fio	1
2	Parafuso ISO 4017 - M6 x 20-C	4
3	Elemento de fixação e acoplamento do rolamento	1
4	Rolamento W 6201	1
5	Anilha customizada	1
6	Parafuso ISO 4014 - M8 x 40 x 22-C	1
7	Elemento de fixação e apoio do rolo do fio	1
8	Parafuso ISO 4014 - M6 x 30 x 18-C	4
9	Porca ISO - 4032 - M12 - W - C	3
10	Rolo	1
11	Varão M12x340	1
12	Elemento de fixação e apoio do rolo do fio oposto	1

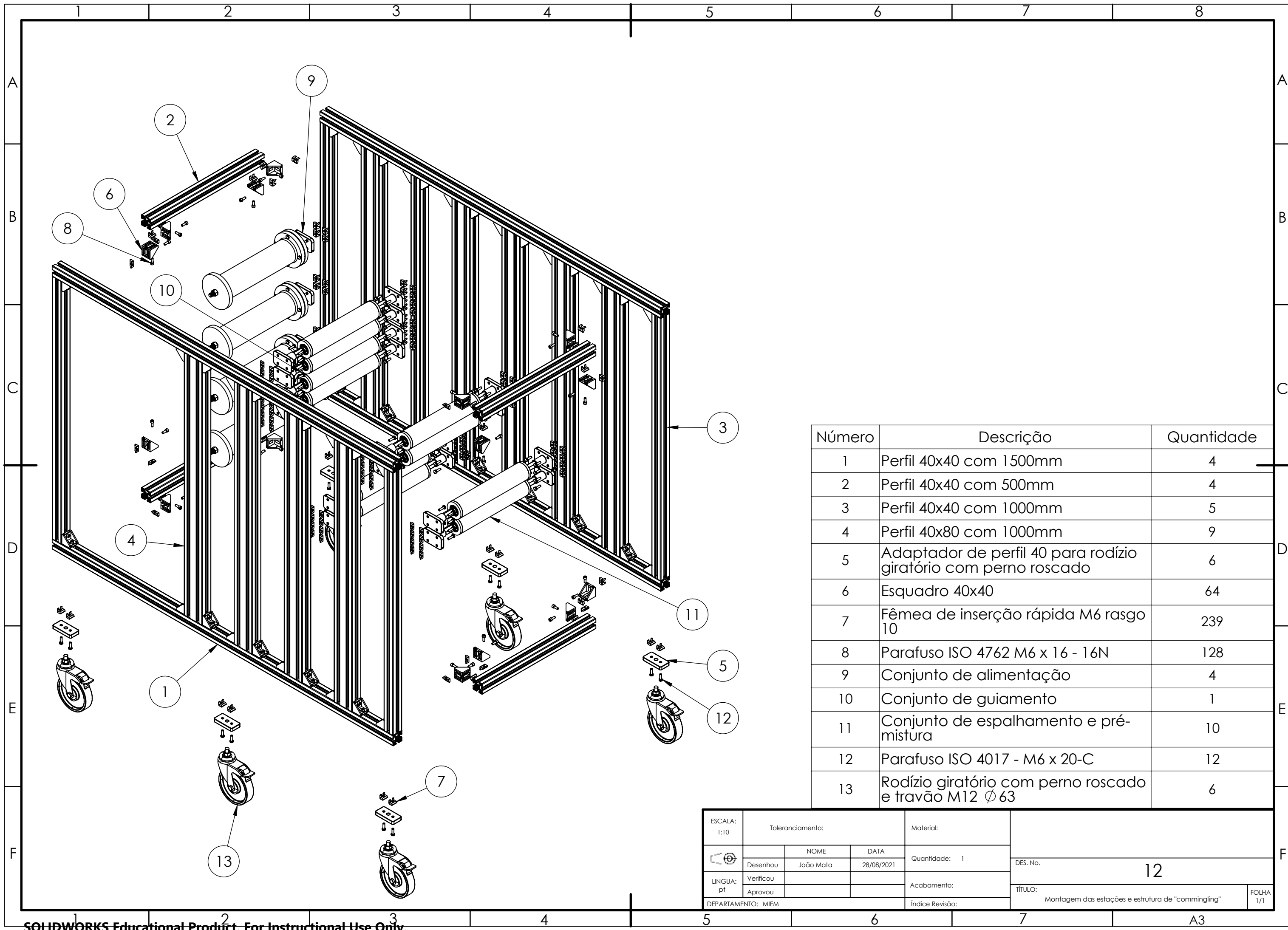
ESCALA: 1:5	Toleranciamento:		Material:	DES. No. 9	
	Desenhou	João Mata	23/08/2021		
LINGUA: pt	Verificou			Acabamento:	TÍTULO: Montagem do conjunto de alimentação
DEPARTAMENTO: MIEM	Aprovou			Índice Revisão:	
					FOLHA 1/1



Número	Descrição	Quantidade
1	Guiamentos	4
2	Parafuso ISO 4017 - M6 x 12-C	3
3	Fixação dos Guiamentos	1

ESCALA: 1:2	Toleranciamento:			Material:	DES. No. 10	
		NOME	DATA	Quantidade: 1		
LINGUA: pt	Desenhou	João Mata	23/08/2021	Acabamento:	TÍTULO: Montagem do conjunto de guiamento	
	Verificou					
DEPARTAMENTO: MIEM				Índice Revisão:	FOLHA 1/1	





Número	Descrição	Quantidade
1	Perfil 40x40 com 1500mm	4
2	Perfil 40x40 com 500mm	4
3	Perfil 40x40 com 1000mm	5
4	Perfil 40x80 com 1000mm	9
5	Adaptador de perfil 40 para rodízio giratório com perno roscado	6
6	Esquadro 40x40	64
7	Fêmea de inserção rápida M6 rasgo 10	239
8	Parafuso ISO 4762 M6 x 16 - 16N	128
9	Conjunto de alimentação	4
10	Conjunto de guiamento	1
11	Conjunto de espalhamento e pré-mistura	10
12	Parafuso ISO 4017 - M6 x 20-C	12
13	Rodízio giratório com perno roscado e travão M12 Ø 63	6

ESCALA: 1:10	Toleranciamento:		Material:	DES. No. 12	
	NOME	DATA	Quantidade: 1		
LINGUA: pt	Verificou		Acabamento:	TÍTULO: Montagem das estações e estrutura de "commingling"	
DEPARTAMENTO: MIEM	Aprovou		Índice Revisão:		
				FOLHA 1/1	