



TÉCNICO
LISBOA

Desenvolvimento de uma unidade móvel para a recuperação de vidro de embalagem

Ricardo Manuel Afonso Batista

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Eng. Manuel de Figueiredo Cravo Relvas Sardinha

Júri

Presidente: Prof. João Orlando Marques Gameiro Folgado

Orientador: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Vogal: Prof. Vitor Manuel Rodrigues Anes

Outubro 2020

Agradecimentos

Quero agradecer aos meus orientadores, Professor Luís Filipe Galvão dos Reis e Mestre Manuel de Figueiredo Cravo Relvas, pelo apoio e ajuda prestados.

Um agradecimento muito especial à minha família pelo suporte e força que me deram para que fosse possível aqui chegar.

O autor da dissertação e respetivos orientadores reconhecem e agradecem o financiamento do projeto MOBILE-PRO-U/ADIST, referencia 1802P.00306.

Resumo

Com a imposição de metas ambiciosas por parte da União Europeia para a reciclagem de vidro, a Sociedade Ponto Verde avançou com um projeto para conceber uma unidade de recuperação de vidro de embalagem presente nos resíduos provenientes das estações de tratamento mecânico, biológico e valorização energética.

Desenvolvimentos anteriores resultaram numa unidade móvel de recuperação que integra parte de um Diagrama de Recuperação de Vidro previamente testado e validado, com o intuito de ser utilizada por empresas, pelo que é essencial que esta unidade tenha um bom desempenho no que toca à sua capacidade de processamento de resíduos e custos de implementação.

Esta tese tem como objetivos a análise das limitações e pontos de melhoria da unidade móvel precedente, o desenvolvimento de uma nova unidade móvel que melhore as limitações identificadas, a verificação das novas estruturas de suporte quanto à segurança estrutural, e a produção de um protótipo em escala reduzida da nova unidade.

A nova unidade móvel é constituída por dois triadores óticos que separam os contaminantes do vidro por opacidade, diversas telas transportadoras que transferem os resíduos de um triador ótico para o outro e que realizam a extração dos produtos da triagem para o exterior. A unidade possui uma capacidade de processamento igual a 41900 toneladas por ano e apresenta dois modos de operação, uma em que os triadores óticos trabalham em série e outra em que estes trabalham em paralelo.

O protótipo foi produzido em PLA numa escala de 1:20, possuindo uma dimensão de 610 x 122 x 145 mm e possui encaixes deslizantes que ilustram o movimento das telas transportadoras de extração dos produtos da triagem entre duas posições características do seu funcionamento.

Palavras-chave: Unidade móvel; Recuperação de vidro; Prototipagem rápida; Fabrico aditivo.

Abstract

With the imposition of ambitious goals by the European Union for glass recycling, Sociedade Ponto Verde launched a project to design a unit for the recovery of packaging glass present in the waste of mechanical, biological and energetic valorisation treatment plants.

Previous developments have resulted in a mobile recovery unit that integrates part of a Glass Recovery Diagram previously tested and validated, to be adopted by companies, making it essential for this unit to have a good performance in terms of its waste processing capacity and implementation costs.

This thesis aims to analyse the limitations and improvement potential of the previous mobile unit, develop a new unit accordingly, verify the new support structures in regard to their structural safety, and produce a prototype of the new unit in a reduced scale.

The new mobile unit consists of two optical sorters that separate the contaminants from the glass by opacity, several conveyor belts that transfer the residues from one optical sorter to the other and that perform the extraction of the sorting products to the exterior. The unit has a processing capacity of 41900 tons per year and has two modes of operation, one in which the optical sorters work in series and the other in which they work in parallel.

The prototype was produced in PLA on a scale of 1:20, having a dimension of 610 x 122 x 145 mm and has sliding inserts that illustrate the movement of the conveyor belts that extract the sorting products between two characteristic positions of its operation.

Keywords: Mobile unit; Glass recovery; Rapid prototyping; Additive manufacturing.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de figuras	vi
Lista de tabelas	vii
Glossário	viii
Nomenclatura	viii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento, objetivo e relevância do tema	1
1.2. Estrutura do trabalho.....	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. Dados sobre Resíduos Sólidos Urbanos em Portugal	3
2.2. Enquadramento com a lei	3
2.3. Diagrama de recuperação de vidro	5
2.4. Unidade móvel de separação de vidro desenvolvida por Arrais	8
2.5. Introdução á prototipagem	10
2.6. Prototipagem rápida	11
3. Desenvolvimento da nova unidade móvel de recuperação	13
3.1. Análise do modelo de UMP anteriormente proposto	13
3.1.1. Análise da capacidade de processamento	13
3.1.2. Taxa de ocupação do RecGlass.....	15
3.1.3. Tela transportadora de alimentação.....	16
3.2. Desenvolvimento da nova UMP	17
3.2.1. Restrições do projeto	17
3.2.2. RecGlass	17
3.2.3. Triador ótico	20
3.2.4. Contentor intermodal	22
3.2.5. Montagem da UMP	22
3.2.6. Funcionamento da nova UMP.....	26
3.2.7. Estimativa de custos.....	31
3.3. Comparação dos modelos propostos para a UMP	31
4. Notas de cálculo	35
4.1. Carregamentos de projeto	35
4.2. Coeficiente de segurança	36

4.3. Estrutura de suporte das telas transportadoras de extração.....	36
4.3.1. Considerações iniciais	36
4.3.2. Cálculos para verificação da segurança.....	37
4.3.3. Ligações soldadas	46
4.3.4. Ligação aparafusada.....	48
4.4. Sistemas de guiamento linear.....	52
4.5. Telas transportadoras	53
5. Protótipo da UMP.....	57
5.1. Escala do protótipo	57
5.2. Ultimaker S5.....	59
5.3. Material de impressão	59
5.4. Considerações de impressão	60
5.5. Preparação do CAD	62
5.6. Impressão do protótipo.....	68
6. Conclusão.....	71
Bibliografia	73
A. Anexos	77
A.1. Características do coeficiente de segurança (Pugsley)	77
A.2. Especificações técnicas dos tubos quadrados (FERPINTA)	77
A.3. Informação técnica de parafusos métricos	78
A.4. Ficha técnica da tela transportadora KFG-P 2000 AS.....	79
A.5. Ficha técnica da tela transportadora GUF-P 2000 AS	80
A.6. Especificações técnicas do sistema de guiamento linear	81

Lista de figuras

Fig. 1: Representação esquemática do RecGlass.....	6
Fig. 2: Esquema de funcionamento de um triador ótico	7
Fig. 3: DRV desenvolvido por Nilmara Dias.....	8
Fig. 4: Modelo 3D da UMP desenvolvida por Arrais	9
Fig. 5: Telas transportadoras do triador ótico recolhidas para a posição de transporte.....	10
Fig. 6: Esquema de funcionamento de uma impressora FDM.....	12
Fig. 7: Posições da tela transportadora de alimentação.....	16
Fig. 8: DRV com os processos constituintes das SGRU e das UMP respetivamente.....	18
Fig. 9: Binder CLARITY Glass.....	20
Fig. 10: Contentor da Cleveland Containers	22
Fig. 11: Primeira iteração da montagem da UMP	23
Fig. 12: Queda dos produtos do primeiro estágio de triagem ótica	23
Fig. 13: AutoSort 4 da empresa DAIFUKU	24
Fig. 14: Pás presentes na superfície do tapete da KFG-P 2000 AS.....	25
Fig. 15: Funcionamento da tela transportadora com locomoção lateral	25
Fig. 16: A montagem final da UMP com todos os equipamentos constituintes.....	26
Fig. 17: UMP conectada com os equipamentos presentes numa SGRU	27
Fig. 18: Alimentação da UMP.....	27
Fig. 19: Processamento do TMBr ou EI pelo primeiro TO.	28
Fig. 20: Processamento do TMBr ou EI pelo segundo TO.	28
Fig. 21: Posicionamento da tela de extração do produto final do primeiro TO	29
Fig. 22: Alimentação da UMP durante a segunda passagem do TMBr ou EI pelo sistema	29
Fig. 23: Extração dos contaminantes e produto final	30
Fig. 24: UMP com as portas fechadas, preparada para o seu transporte rodoviário.	30
Fig. 25: Cargas que as estruturas de suporte devem suportar.....	35
Fig. 26: Esquema do suporte com elementos constituintes numerados	37
Fig. 27: Posição da tela para transporte rodoviário	37
Fig. 28: DCL do elemento 1 durante o carregamento 1.....	38
Fig. 29: Diagrama de esforços do elemento 1 durante o carregamento 1	39
Fig. 30: Esquema do perfil do tubo quadrado	40
Fig. 31: DCL do elemento 2 durante o carregamento 1.....	41
Fig. 32: Diagrama de esforços do elemento 2 durante o carregamento 1	41
Fig. 33: Posição da tela durante o processamento de TMBr e EI	43
Fig. 34: DCL do elemento 1 durante o carregamento 2.....	43
Fig. 35: Diagrama de esforços do elemento 1 durante o carregamento 2	44
Fig. 36: DCL do elemento 3 para os dois carregamentos	46
Fig. 37: Ligações soldadas da estrutura de suporte	46
Fig. 38: Duas configurações para a ligação soldada S1.....	47
Fig. 39: Ligação aparafusada com o sistema de guiamento linear.....	48
Fig. 40: Esquema dos esforços aplicados na ligação aparafusada.....	50
Fig. 41: Forças aplicadas num dos parafusos	51
Fig. 42: Esquema da KFG-P 2000 AS	53
Fig. 43: Esquema da GUF-P 2000 AS	55
Fig. 44: Ultimaker S5 do Lab2ProD	59
Fig. 45: Remoção do PVA de uma peça através da submersão em água.....	60
Fig. 46: Efeito de escada em superfícies oblíquas e curvas.....	61
Fig. 47: Resistência das orientações	61
Fig. 48: O perfil da viga que apoia o TO	62
Fig. 49: Visualização do dois CADs	63

Fig. 50: Material de suporte utilizado em duas impressões não otimizadas material base.....	64
Fig. 51: Componentes separados para impressão individual	64
Fig. 52: Encaixe quadrado	65
Fig. 53 Encaixe auto-centrante em triângulo	66
Fig. 54: Encaixe de espiga	66
Fig. 55: Pino de encaixe	67
Fig. 56: Encaixe amovível	67
Fig. 57: Encaixe deslizante	68
Fig. 58: Comparação de duas superfícies, a da esquerda após lixagem e a da direita antes deste processo	69
Fig. 59: O protótipo da UMP.....	69

Lista de tabelas

Tabela 1: Especificações técnicas para a retoma de resíduos de embalagens de vidro	4
Tabela 2: Constituição granulométrica dos TMBr e EI das várias SGRU.....	14
Tabela 3: Taxa de ocupação do RecGlass nas SGRU.....	15
Tabela 4: Custos dos equipamentos constituintes da UMP e o respetivo total	31
Tabela 5: Comparação de custos entre as duas alternativas	32
Tabela 6: Reações no elemento 1 durante o carregamento 1	39
Tabela 7: Reações no elemento 1 durante o carregamento 2.....	44
Tabela 8: Comparação de tensões entre as duas configurações.....	47
Tabela 9: Estimativa das dimensões médias das partículas e velocidade das telas z para cada SGRU	55
Tabela 10: Estimativa de velocidades das telas de extração para cada SGRU.....	56
Tabela 11: Escalas recomendadas segundo a norma NBR 8196/1983	57
Tabela 12: Dimensão do modelo para as escalas selecionadas	58
Tabela 13: Peças dos lotes de impressão com gramas de PLA e PVA usados e tempo de produção.....	70

Glossário

ANTRAM	-	Associação Nacional de Transportadores Públicos Rodoviários de Mercadorias
APA	-	Agência Portuguesa do Ambiente
DCL	-	Diagrama de corpo livre
DRV	-	Diagrama de recuperação de vidro
EI	-	Escórias de incineração
FFF	-	Fabrico com filamentos fundidos
IC	-	Índice de circularidade
PERSU	-	Planeamento Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos
RSU	-	Resíduos sólidos urbanos
SGRU	-	Sistema de gestão de resíduos urbanos
SPV	-	Sociedade Ponto Verde
TBMr	-	Rejeitados pesados de tratamento mecânico e biológico
TM	-	Tratamento Mecânico
TMB	-	Tratamento Mecânico e Biológico
TO	-	Triador Ótico
UMP	-	Unidade móvel de separação de vidro
VDE	-	Vidro de Embalagem
VE	-	Valorização Energética

Nomenclatura

A_d	-	Área de topo do parafuso
A_r	-	Área da raiz do parafuso
A_t	-	Área de tensão do parafuso
C	-	Constante elástica da ligação
C_p	-	Capacidade de processamento anual
d	-	Diâmetro do parafuso
d_m	-	Dimensão média das partículas
d_r	-	Diâmetro de raiz do parafuso
E	-	Módulo de Young
F'_i	-	Esforço direto
F''_i	-	Esforço indireto
F_i	-	Pré-carga da ligação
f_m	-	Coefficiente de atrito estático
K_b	-	Rigidez dos parafusos
K_i	-	Rigidez do membro da ligado

K_m	-	Rigidez composta dos membros da ligação
I	-	Momento de inércia
l	-	Comprimento da ligação
L	-	Comprimento do parafuso
l_d	-	Comprimento da ligação sem rosca
l_t	-	Comprimento da ligação com rosca
L_T	-	Comprimento da rosca do parafuso
\dot{m}	-	Caudal mássico
m_c	-	Massa da carga
$M_{x,y,z}$	-	Momento fletor aplicado segundo o eixo x , y ou z
N	-	Número de UMP
n_c	-	Segurança à cedência
n_l	-	Segurança à estática
n_{f2}	-	Segurança crítica de flambagem
n_o	-	Segurança de separação da ligação
n_s	-	Segurança de escorregamento
n_{seg}	-	Coefficiente de segurança
$N_{x,y,z}$	-	Força axial aplicada segundo o eixo x , y ou z
p	-	Passo da rosca
P	-	Força resultante normal ao plano de ligação
P_{cr}	-	Carga crítica de flambagem
P_S	-	Força resultante de corte
$P_{x,y,z}$	-	Carga aplicada segundo o eixo x , y ou z
Q	-	Primeiro momento de área
r	-	Distância do parafuso ao centro geométrico da ligação
S_p	-	Resistência dos parafusos
S_u	-	Tensão de rotura
S_y	-	Tensão de cedência
t_1	-	Espessura da chapa base da estrutura de suporte
t_2	-	Espessura da zona de ligação do carril do sistema de guiamento linear
t_n	-	Altura da porca
t_{oc}	-	Taxa de ocupação
t_w	-	Espessura da anilha
$T_{x,y,z}$	-	Momento torsor aplicado segundo o eixo x , y ou z
v_{max}	-	Velocidade máxima
V_t	-	Velocidade de transporte
$V_{x,y,z}$	-	Força de corte aplicada segundo o eixo x , y ou z

Letras gregas:

α	-	Ângulo de inclinação
τ	-	Tensão de corte
σ	-	Tensão normal
ρ	-	Densidade

Lista de programas

Solidworks 2019[®]

Ultimaker Cura 4.4[®]

1. Introdução

1.1. Enquadramento, objetivo e relevância do tema

O rápido crescimento económico a nível mundial tem aumentado a quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos, a deposição destes resíduos em aterro impede que sejam processados de forma a serem reintroduzidos na economia, o que leva à exploração desmoderada de mais recursos naturais.

Com o intuito de reaproveitar o vidro presente nos RSU, foi iniciado o projeto MOBILE-PRO-U pela Associação para o Desenvolvimento do Instituto Superior Técnico em parceria com a Maltha (empresa de reciclagem de vidro de embalagem), que tem como objetivo o desenvolvimento de uma unidade móvel de recuperação de vidro que realize a extração deste material dos RSU de uma forma economicamente viável para que possa ser adotada por empresas públicas e privadas.

Esta dissertação insere-se no âmbito deste projeto, dando continuação ao projeto de desenvolvimento da unidade móvel de recuperação de vidro desenvolvida por Arrais [1], integrando o diagrama de recuperação de vidro (DRV) desenvolvido por Dias [2], que descreve os processos e equipamentos necessários para a realização da separação do vidro de embalagem (VDE) dos RSU, com a finalidade de possibilitar a sua reciclagem.

O objetivo da dissertação consiste na análise da UMP proposta por Arrais quanto às suas limitações e o desenvolvimento de uma nova proposta para a UMP que procura diminuir os problemas inerentes da anterior.

Com o propósito de facilitar a comunicação de ideias e demonstração do funcionamento da unidade móvel de processamento com parceiros deste projeto, será também produzido um protótipo em escala reduzida, recorrendo à tecnologia de impressão 3D, Fabrico com Filamentos Fundidos (FFF).

1.2. Estrutura do trabalho

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre a produção de resíduos em Portugal, enquadramento legislativo e requisitos a cumprir para a reciclagem do vidro. Revisão do DRV, da UMP anteriormente proposta e de informação sobre prototipagem rápida.

Capítulo 3: Análise de limitações da UMP desenvolvida por Arrais seguido pelo desenvolvimento da nova UMP e comparação das duas alternativas.

Capítulo 4: Dimensionamento e verificação de estruturas de suporte e componentes da UMP com as respetivas notas de cálculo.

Capítulo 5: Desenvolvimento do protótipo da nova UMP, com recurso à tecnologia de impressão 3D FFF.

Capítulo 6: Conclusões finais e sugestões de continuação do projeto.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Dados sobre Resíduos Sólidos Urbanos em Portugal

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), em 2019 foram produzidas em Portugal 5,281 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), o que se traduz em 513 kg/(hab.ano), mais 1% quando comparado com o produzido em 2018, mantendo-se a tendência de crescimento dos anos prévios. Este valor encontra-se distante da meta definida pelo Planeamento Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) que corresponde a 410 kg/(hab.ano) para o ano de 2020. A distribuição destes RSU para os Sistemas de gestão de resíduos urbanos (SGRU), foi realizada da seguinte forma: 33% para aterro, 24% para Tratamento Mecânico e Biológico (TMB), 19% para Valorização Energética (VE), 11% Valorização Material, 9% Tratamento Mecânico (TM), 2% Valorização Orgânica. Ainda no que concerne aos destinos finais dos resíduos geridos pelos SGRU: 57,8% para aterro, 17,4% para VE, 13,1% para Reciclagem, 8,4% para Compostagem/Digestão anaeróbica e 3,3% para outras valorizações [3]. A constituição física média dos RSU em 2019, apresenta um teor de vidro de 7,05%, que segundo a APA, não variou significativamente desde 2011 [3].

Em 2019, foram recicladas 178941 toneladas de Vidro de Embalagem (VDE), valor que diminuiu bastante quando comparado com as 210422 toneladas de VDE reciclado em 2011. O VDE não reciclado apresenta um valor de cerca de 193000 toneladas, o que se traduz em 52% de todo o VDE, ou seja, apenas 48% de todo o VDE foi reciclado em 2019. O VDE não reciclado é dirigido para os diversos SGRU que não têm capacidade para efetuar a recuperação do VDE, o que resulta em Rejeitados pesados de Tratamento Mecânico e Biológico (TBMr) e Escórias de Incineração (EI) que são depositados em aterros [3].

2.2. Enquadramento com a lei

Segundo o Decreto Lei No 73/2011, a política e a legislação em matéria de resíduos devem respeitar a seguinte ordem de prioridades no que se refere às opções de prevenção e gestão de resíduos [4]:

- a) Prevenção e redução;
- b) Preparação para a reutilização;
- c) Reciclagem;
- d) Outros tipos de valorização (nomeadamente, TMB, TM e VE);
- e) Eliminação (Deposição em aterro).

O PERSU 2020, constitui o instrumento estratégico para a gestão de resíduos urbanos para o período de 2014-2020. Define a estratégia e medidas a serem implementadas para o cumprimento das metas nacionais. As metas nacionais de maior destaque para serem cumpridas até ao ano 2020 são as seguintes [5]:

- I. Redução mínima de produção de resíduos, por habitante, de 10% em peso, relativamente ao valor de 2012;
- II. Redução para 35% da quantidade total de RSU depositados em aterro, face aos quantitativos totais produzidos em 1995;
- III. Aumento mínimo global para 50% em peso, relativamente à preparação para a reutilização e reciclagem de resíduos urbanos, incluindo o papel, o cartão, o plástico, o vidro, o metal, a madeira e os resíduos urbanos biodegradáveis.

Relativamente ao vidro, que consiste no material de especial relevância para esta dissertação, o PERSU 2020 estabelece que em 2020, a taxa de recuperação de VDE deverá alcançar os 60% [5].

Os resíduos de embalagem de vidro têm de obedecer a especificações técnicas de teor de contaminantes para a sua retoma e posterior reciclagem. Estas especificações foram estabelecidas pela APA e encontram-se presentes na tabela 1:

Tabela 1: Especificações técnicas para a retoma de resíduos de embalagens de vidro [6]

Materiais		Teor (%)	
Produto	Casco de vidro	≥ 98	
Contaminantes	Infusíveis com dimensão ≤ 40 mm	≤ 0,05	≤ 2
	Infusíveis com dimensão > 40 mm	≤ 0,5	
	Metais ferrosos	≤ 0,75	
	Metais não ferrosos	≤ 0,2	
	Matéria orgânica não aderente e outros contaminantes	≤ 1	

Para além dos contaminantes presentes na tabela anterior, não são aceites os seguintes contaminantes [6]:

- Vidro hospitalar – ampolas e vidro proveniente de hospitais, laboratórios de análises, clínicas, etc.;
- Vidros especiais - aramados, para-brisas, cerâmicos, plastificados, écrans de televisão/computador, lâmpadas, espelhos, vitrocerâmicas, pirex, cristais de chumbo, vidro opala, e todos os demais vidros cuja composição química difere do VDE.

2.3. Diagrama de recuperação de vidro

O Diagrama de recuperação de vidro (DRV) foi desenvolvido por Nilmara Dias [2] no âmbito da sua dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, com a finalidade de realizar a extração do vidro contido no TMBr e EI.

De seguida, serão listados os vários equipamentos que constituem o DRV bem como uma descrição das suas funções:

Separador magnético: é um dispositivo que dispõe de um imã que efetua a extração dos contaminantes ferromagnéticos presentes no TMBr e EI.

Crivo de separação: faz a separação do TMBr por ordem granulométrica. O DRV usa um crivo de malha de 5,6 mm, eliminando o TMBr de granulação inferior a esta do caudal que irá continuar no sistema, pois a maioria do vidro encontra-se nas frações superiores a 5,6 mm e as pedras nas frações inferiores a 5,6 mm. Também tem a vantagem de otimizar o processamento do TMBr no equipamento de triagem ótica, pois neste processo tem uma redução de eficiência significativa para frações inferiores a 5 mm.

Posteriormente, o sistema ainda usa mais um crivo, este com uma malha de 16 mm para realizar a subdivisão do TMBr em duas frações, uma com dimensões entre 5,6 e 16 mm e a outra com dimensões superiores a 16 mm, com o intuito de processar o TMBr de fração superior a 16 mm no equipamento de separação de forma RecGlass (RG), pois este equipamento sofre uma redução de eficiência com alimentações inferiores a 16 mm.

RecGlass: desenvolvido no CERENA no IST, este equipamento remove contaminantes de geometria sub-esférica através de um processo de separação por forma. É constituído por uma tela transportadora inclinada.

O uso deste equipamento é vantajoso devido ao facto do índice de circularidade (IC) das partículas de vidro, presentes no TMBr, ser consideravelmente inferior ao das partículas contaminantes, eliminando estes do TMBr. Para o uso correto deste equipamento, a alimentação de TMBr tem de ser feita de uma forma uniforme ao longo de toda a largura da tela transportadora. Um modo de alcançar este efeito está no uso de um alimentador vibratório cuja função é homogeneizar a alimentação.

Nilmara Dias otimizou os parâmetros operacionais do RecGlass para o processamento de TMBr de modo a maximizar o teor em vidro no produto concentrado [2]. Jardim realizou ensaios semelhantes usando EI como alimentação do DRV, otimizando os parâmetros operacionais para este tipo de resíduo [7].

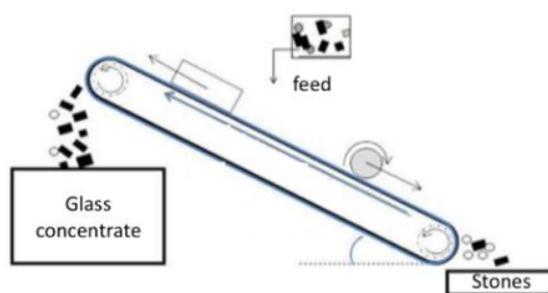


Fig. 1: Representação esquemática do RecGlass [2]

Aspirador de leves: remove contaminantes leves presentes em elevada concentração no TMBr. Estes aspiradores estão montados nas saídas dos alimentadores vibratórios, pois é neste ponto onde as partículas de resíduos que constituem o TMBr se encontram mais dispersas, maximizando assim, a aspiração de contaminantes leves.

Triador ótico: este equipamento é constituído por um conjunto de emissores luminosos alinhados ao longo da entrada de alimentação deste dispositivo, que emitem um feixe luminoso para um conjunto correspondente de sensores óticos, que por sua vez estão ligados a uma série de ejetores de ar comprimido.

Sendo o vidro um material transparente, este permite a passagem do feixe luminoso para o sensor ótico, assim como este feixe luminoso permanece sem ser interrompido, o sensor não aciona o ejetor de ar comprimido correspondente. No caso de um contaminante opaco, o feixe luminoso é interrompido, e quando este deixa de incidir sobre o sensor luminoso, este envia um sinal para o ejetor de ar correspondente para produzir um jato de ar que acerta no contaminante, projetando este para a conduta de material rejeitado.

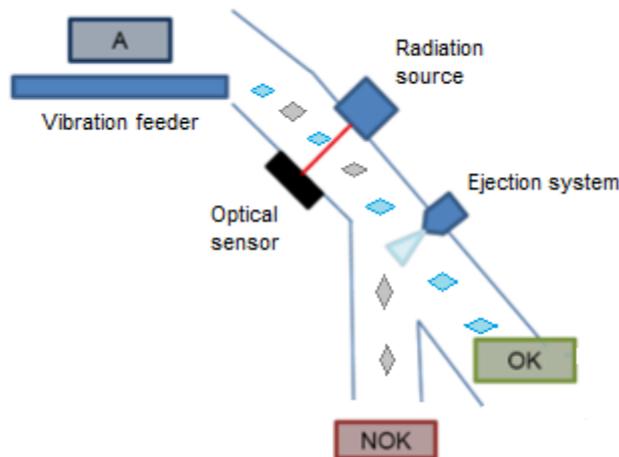


Fig. 2: Esquema de funcionamento de um triador ótico (NOK é o rejeitado, OK é o material transparente) [8]

Uma das principais limitações dos triadores óticos consiste na remoção de partículas de geometria sub-esférica, pois estes equipamentos funcionam segundo o princípio em que todos os contaminantes caem verticalmente, e as partículas com este tipo de geometria assumem trajetórias diferentes desta, o que leva a que a ejeção ou a detecção destes contaminantes não se realize. O tipo de contaminantes que apresenta esta geometria sub-esférica com maior frequência são as pedras [8]. Denota-se então a importância do RecGlass para remover este tipo de contaminante para o correto funcionamento do triador ótico.

O DRV está dividido em dois estágios, o primeiro destes é o pré-processamento, que inclui as operações de secagem, reduzindo assim o teor de humidade do TMBR, a separação ferromagnética, a remoção de partículas de granulometria inferior a 5,6 mm com um crivo de malha de 5,6 mm, e a separação do TMBR em 2 porções por via de um crivo com uma malha de 16 mm. A operação de secagem é de especial importância, pois uma secagem incompleta ou ineficiente vai dar origem a partículas aglomeradas que iram reduzir significativamente a eficácia das operações posteriores [2].

O processamento é o segundo estágio do DRV, onde o TMBR de fração entre 5,6 e 16 mm é submetido a duas passagens pelo RecGlass, e posteriormente juntamente com a fração superior a 16 mm, é sujeito a três passagens pelo triador ótico, com aspiração de leves nas entradas de cada um destes processos [2]. Este DRV está representado de forma ilustrativa na figura 3.

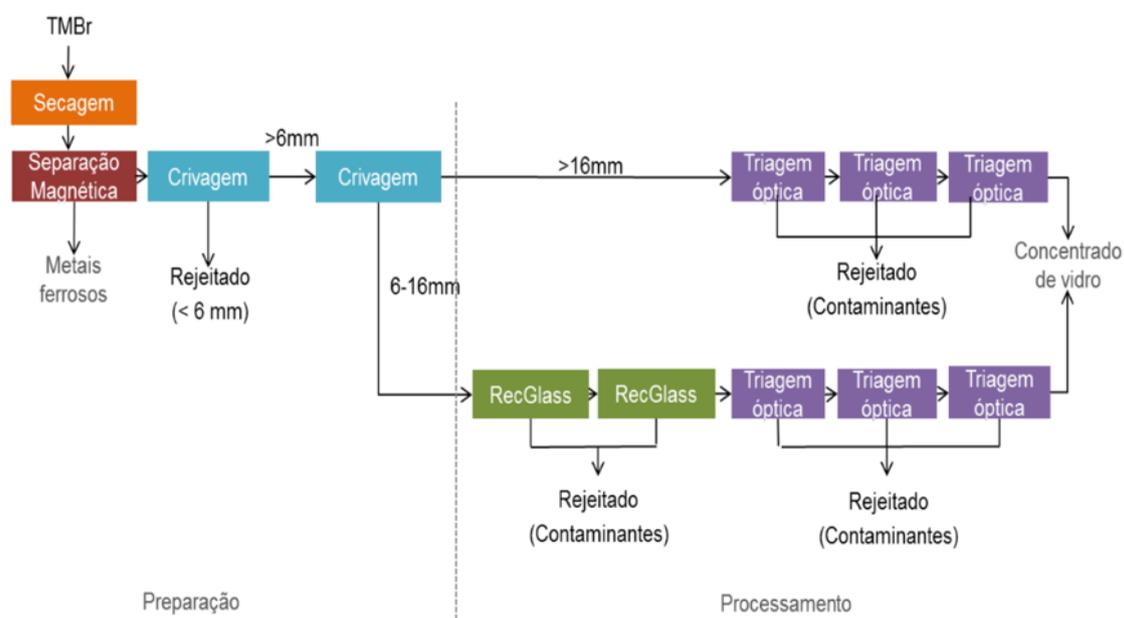


Fig. 3: DRV desenvolvido por Nilmara Dias [2]

2.4. Unidade móvel de separação de vidro desenvolvida por Arrais

A unidade móvel de separação de vidro (UMP), foi desenvolvida por João Arrais no âmbito da sua dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, em que efetuou a aplicação parcial do DRV desenvolvido por Nilmara Dias dentro do espaço limitado de um contentor ISO de 40 pés (aproximadamente 12 metros) com abertura lateral [1].

Esta UMP contém todos os equipamentos usados no estágio de processamento (triador ótico, RecGlass, e aspirador de leves), enquanto que todos os equipamentos que compõem o estágio de pré-processamento, ficariam da responsabilidade dos SGRU [1].

Esta decisão de apenas aplicar parte do DRV, baseou-se nas dimensões do contentor ISO de 40 pés, que impossibilitam a instalação de todos os equipamentos em simultâneo na UMP, que sendo de natureza industrial, não se encontram disponíveis no mercado com capacidades de processamento adequadas a pequenas escalas na maioria dos casos [1]. Arrais baseou-se ainda nas seguintes conclusões que levaram à definição final da UMP:

- Grande parte da alimentação considerada possui dimensão global inferior a 6 mm resultando na sua rejeição no sistema de crivagem, originando um elevado diferencial entre a capacidade da fase de pré-processamento e da fase de processamento [1];

- Elevado diferencial entre o custo dos equipamentos que constituem a fase de pré-processamento e a fase de processamento. O custo de um TO é uma ordem de grandeza superior ao custo dos demais equipamentos [1];
- Toda a maquinaria a implementar é de natureza industrial, embora alguns equipamentos possam ser adquiridos com as dimensões e capacidades de processamento adequadas ao caso pretendido, ainda que seja para aplicações em pequena escala. O TO, para além de ser o equipamento chave do DRV, é aquele que é menos comum e menos presente no mercado [1].

Na figura 4 encontra-se o modelo 3D da UMP, que inclui equipamentos exteriores como a tremonha e a tela transportadora de perfil em z que efetuam a alimentação da UMP, bem como os contentores de deposição de VDE e contaminantes que estão presentes nos SGRU.

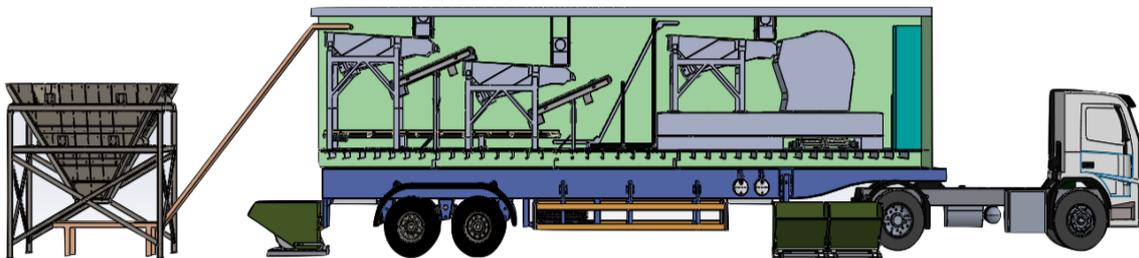


Fig. 4: Modelo 3D da UMP desenvolvida por Arrais [1]

O processamento de descontaminação desta UMP requer 3 passagens, com diferenças na primeira passagem entre as frações entre 6 e 16 mm e as frações superiores a 16 mm. Todo este processo será descrito a seguir:

- Primeira passagem das frações entre 6 e 16 mm: A pá carregadora abastece a tremonha com o TMBr ou EI que passará para a tela transportadora de alimentação, que fornece a UMP diretamente através do primeiro RecGlass. A passagem para o segundo RecGlass ocorre de forma contínua, com os produtos a passarem diretamente do primeiro para o segundo. Os contaminantes rejeitados são extraídos por intermédio de uma tela transportadora de dupla ação localizada diretamente por baixo dos RecGlass. As partículas que não foram rejeitadas, caem sobre uma tela transportadora de perfil em z e posteriormente passaram para o alimentador do triador ótico. Após a triagem, ambos os contaminantes e o concentrado de vidro são extraídos pelas telas transportadoras correspondentes localizadas por baixo do triador ótico. Este processo é acompanhado por três estágios de aspiração de leves, localizados nos alimentadores vibratórios dos equipamentos [1].

- Segunda e terceira passagem das frações entre 6 e 16 mm e todas as passagens das frações superiores a 16 mm: A tremonha é abastecida com o TMBr ou EI que passará para a tela transportadora de alimentação que desta vez está numa posição diferente à anterior que permite a alimentação da UMP diretamente para a tela transportadora de dupla ação. Esta transporta o TMBr para a tela transportadora de perfil em z que abastece o alimentador do triador ótico [1].

O produto final da terceira passagem corresponde ao concentrado de vidro, que segundo o DRV desenvolvido por Dias [2], deve cumprir os requisitos técnicos da APA presentes na tabela 1.

As telas transportadoras estão montadas sobre um sistema de guiamento linear (figura 5) que permite o posicionamento das suas saídas para fora do contentor quando a UMP está em operação, e da recolha das telas para o interior do contentor para o fecho das portas laterais do contentor para realizar o transporte da UMP para um novo SGRU [1].

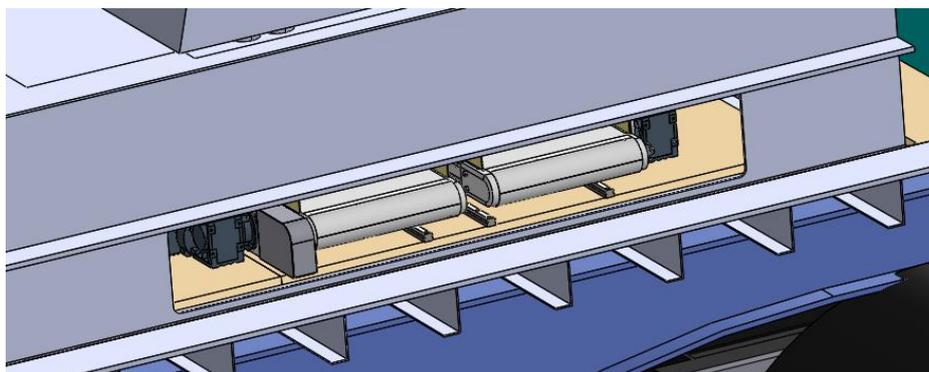


Fig. 5: Telas transportadoras do triador ótico recolhidas para a posição de transporte [1]

2.5. Introdução á prototipagem

Prototipagem é o processo de transferir ideias do âmbito conceptual para a realidade. É todo e qualquer objeto físico ou virtual que simula uma interação aproximada do produto para validar uma ideia ao longo de uma ou mais dimensões de interesse [9].

Dentro do âmbito de desenvolvimento de produto, a prototipagem é usada para quatro propósitos principais:

- Aprendizagem: Os protótipos são frequentemente usados para clarificar as questões de funcionamento e de verificação de que este atende às necessidades do projeto. Para esta finalidade, são efetuados testes sobre protótipos de componentes que serão integrados no projeto final. Quando usados para este propósito, os protótipos servem como ferramentas de aprendizagem [9].
- Comunicação: Os protótipos facilitam a comunicação de ideias com a administração, fornecedores, parceiros, outros membros da equipa de produção, clientes e investidores. Isto é o caso particularmente com protótipos físicos: uma representação visual, tátil e tridimensional de um produto é muito mais fácil de entender do que uma descrição verbal ou um esboço do produto [9].
- Integração: Protótipos são usados para garantir que os componentes e subsistemas do produto trabalham como esperado quando se encontram integrados no mesmo modelo. Protótipos físicos abrangentes são mais eficazes como ferramentas de integração em projetos de desenvolvimento de produto, porque exigem a montagem e interconexão de todas as peças e subsistemas que compõem o produto final. Se a combinação de qualquer um dos componentes do produto interferir com a função geral do produto, o problema poderá ser detetado através da integração física em um protótipo abrangente. Os protótipos abrangentes também ajudam a integrar as perspetivas das diferentes equipas de desenvolvimento de produto que trabalham no mesmo projeto, pois a montagem do protótipo força a coordenação entre estas equipas servindo como meio através do qual se chega a decisões compreensivas [9].
- Marcos: Em certos estágios do desenvolvimento do produto, particularmente estágios mais avançados, os protótipos são usados para demonstrar que o produto atingiu um nível desejado de funcionalidade. Estes protótipos fornecem metas tangíveis, demonstram progresso e servem para reforçar o cronograma. As empresas geralmente requerem um protótipo que demonstre certas funções antes de permitir que o projeto continue [9].

Embora a maioria dos protótipos possam cumprir estes quatro propósitos, alguns tipos de protótipos são mais apropriados que outros para alguns destes.

2.6. Prototipagem rápida

A prototipagem rápida é um grupo de tecnologias usadas para fabricar rapidamente um modelo em escala de uma peça ou montagem física usando dados tridimensionais de Computer Assisted Design (CAD). Este tipo de prototipagem é geralmente realizado recorrendo a

tecnologia de impressão 3D. A maioria destas tecnologias trabalham construindo um objeto através da deposição de material por camadas e permitem a criação de protótipos físicos de forma automatizada [9].

As peças resultantes costumam ser feitas de plástico, mas outros materiais estão disponíveis, incluindo cera, papel, cerâmica e metais [9].

Uma das tecnologias de impressão 3D mais populares é o Fabrico com filamentos fundidos (FFF), devido ao custo baixo de operação e de uso acessível [10], esta tecnologia é de particular relevância no âmbito desta dissertação.

O FFF consiste num filamento de material que é aquecido até ao estado líquido e extrudido através de um bocal de uma maneira controlada, o material condensa pouco tempo após a extrusão e é aplicado camada sobre camada até concluir a forma da peça final [11]. A figura 6 ilustra o funcionamento geral de uma impressora FDM.

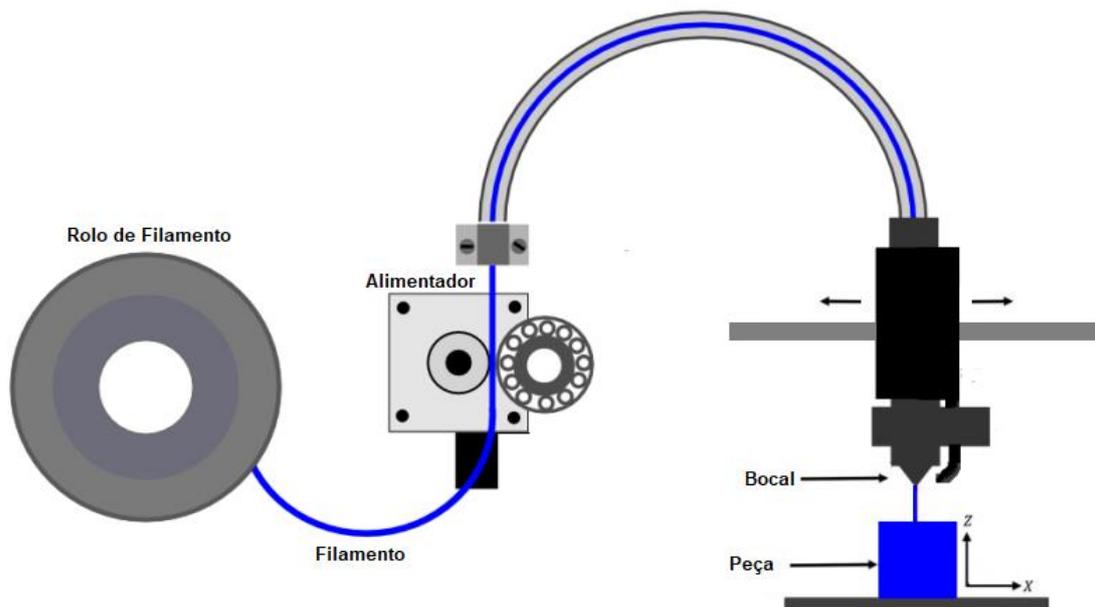


Fig. 6: Esquema de funcionamento de uma impressora FDM, adaptado de [11]

3. Desenvolvimento da nova unidade móvel de recuperação

3.1. Análise do modelo de UMP anteriormente proposto

Após o estudo da UMP anteriormente proposta, procedeu-se à análise e averiguação desta com o objetivo de identificar as suas limitações e possíveis pontos de melhoria, no sentido de produzir critérios para a conceptualização de uma nova proposta para a UMP que retifique as limitações identificadas.

3.1.1. Análise da capacidade de processamento

A capacidade de processamento da UMP é de especial importância, pois um valor elevado para este parâmetro implica um processamento mais rápido do TMB e EI o que permite à UMP usufruir da sua propriedade móvel com mais frequência, e por consequência, diminuir a quantidade de UMPs necessárias para o processamento da produção anual de TMB e EI das várias SGRU, o que simplifica o planeamento do sistema logístico da rede de UMPs, tendo em conta as distâncias das rotas e os fatores económicos e ambientais [12].

A UMP anteriormente proposta é constituída por um TO da marca Binder, modelo Clarity Glass, com uma capacidade de processamento de 16 t/h, o que corresponde ao valor do mesmo parâmetro por cada passagem na UMP pois este equipamento é o ponto de estrangulamento do sistema, tendo sido a capacidade de processamento do RecGlass ajustada para garantir a conformidade com este caudal.

Como já descrito na secção 2.4, a UMP requer que o fluxo de resíduos passe três vezes pelo sistema para se obter o concentrado de vidro final, logo a capacidade de processamento real da UMP proposta anteriormente é dada pela seguinte fórmula:

$$\dot{m} = \frac{(\text{caudal mássico do TO})}{(\text{número de passagens})} = \frac{16}{3} = 5,3 \text{ t/h} \quad (1)$$

Para determinar a eficácia desta capacidade de processamento, este valor terá de ser aplicado à produção anual de TMB e EI com dimensão granulométrica superior a 5,6 mm. No âmbito do projeto Mobile-Pro-U, foram obtidos diversos valores sobre os produtos das diversas SGRU, entre estes, a produção anual de TMB e EI bem como o teor (%) das frações superiores a 16 mm e 5,6 mm. Estes dados foram registados por Rocha [13], e estão representados na tabela 2.

Tabela 2: Constituição granulométrica dos TMBr e EI das várias SGRU [13]

	Produção anual de TMBr ou EI	Fração >16 mm		Fração >5,6 mm a <16 mm	
		ton/ano	%	ton/ano	%
Tratolixo	9714	0	0	9,07	881
Amarsul	5361 a)	62,7	3361	32,25	1729
	1335 b)	0,6	8	44,5	594
	2740 c)	77,26	2117	20,42	559
	4871 d)	40,48	1972	47,68	2322
	2860 e)	0,46	13	23,28	665
Ersuc	36942 f)	23,49	8678	52,58	19424
	7233 g)	0,27	20	41,75	3020
	33140 h)	21,22	7032	55,1	18260
	284 i)	1,25	4	65,73	186
Resitejo	22776	0	0	9,64	2195
Valorlis	2925 j)	55,87	1634	39,92	1167
	3575 k)	29,18	1043	62,14	2221
Valnor	6804	0	0	38,38	2611
Braval	3000	1,48	44	19,88	596
Valorsul	125023	5,36	6701	30,67	38344
Total	268583	-	32627	-	94774

a) Rejeitado do crivo de afinação de Setúbal b) Rejeitado da mesa densimétrica de afinação de Setúbal c) Rejeitado do separador de inertes do Seixal d) Rejeitado do crivo de afinação do Seixal e) Rejeitado da mesa densimétrica do Seixal f) rejeitado do Pulper de Aveiro g) rejeitado do desarenador de Aveiro h) rejeitado do Pulper de Coimbra i) rejeitado do hidrociclone de Coimbra j) fração grosseira de saída do Pulper k) fração fina de saída do Pulper

Assumindo que a UMP trabalha 247 dias por ano durante dois turnos de trabalho (16 horas), período que correspondente às horas de trabalho das SGRU usado por Bernardo [12] na sua dissertação, a UMP tem uma capacidade de processamento anual de:

$$C_p = \dot{m} \times 16 \left(\frac{h}{dia} \right) \times 247 \left(\frac{dia}{ano} \right) = 20946 \text{ t/ano} \quad (2)$$

Logo o número de unidades necessárias para processar o TMBr ou EI de fração superior a 5,6 mm é dado pela seguinte equação:

$$N = \frac{(Fração > 5,6 \text{ mm total})}{C_p} = 6,08 \rightarrow 7 \text{ UMP} \quad (3)$$

Nota-se que a capacidade de processamento desta UMP é inferior à produção anual de EI da Valorsul (45045 ton/ano), o que significa que será necessário mais que uma UMP para processar todo o EI de fração superior a 5,6 mm desta SGRU, neste caso, duas das unidades

terão de ficar permanentemente nesta SGRU, o que equivale a uma capacidade de processamento de 41892 ton/ano, sobrando 3153 toneladas para ser processado por outra UMP. Salienta-se então a importância do desenvolvimento de uma UMP com uma capacidade de processamento superior à UMP anteriormente proposta, solucionando este problema das unidades permanentes e diminuindo também o total de unidades necessárias.

3.1.2. Taxa de ocupação do RecGlass

Como foi explicado na secção 2.4, ambos os RecGlass presentes na UMP, são utilizados apenas na primeira passagem da fração entre 5,6 e 16 mm, estando este equipamento inativo em todas as outras passagens. Com o intuito de analisar este tempo em que os RecGlass estão inativos, calculou-se a taxa de ocupação deste equipamento, esta taxa apresenta o tempo de funcionamento do equipamento em função do tempo total de funcionamento da UMP.

O tempo em que os RecGlass estão inativos, equivale a uma taxa de ocupação máxima de 33% quando se trata dos SGRU cujos TMBR ou EI não apresentam partículas de dimensão superior a 16 mm, pois nestes casos todo o caudal a ser processado passa pelos RecGlass durante a primeira passagem de processamento, estando o RecGlass inativo nas duas passagens posteriores. Nos SGRU com partículas de dimensão superior a 16 mm, esta taxa será inferior a 33%, pois nem todo o TMBR ou EI será processado pelos RecGlass. A taxa de ocupação é calculada usando a seguinte fórmula (resultados para cada SGRU presentes na tabela 3):

$$t_{oc} = \frac{(Fração > 5,6 \text{ mm } a < 16 \text{ mm})}{(Fração > 5,6 \text{ mm}) \times 3} \times 100 \quad (4)$$

Tabela 3: Taxa de ocupação do RecGlass nas SGRU

SGRU	Taxa de ocupação (%)
Tratolixo	33,3
Amarsul	11,3 a)
	32,9 b)
	7 c)
	18 d)
	32,7 e)
Ersuc	23 f)
	33,1 g)
	24,1 h)
	32,7 i)
Resitejo	33,3
Valorlis	13,9 j)
	22,7 k)
Valnor	33,3
Braval	31
Valorsul	28,4

Como se pode observar na tabela 3, a taxa de ocupação apresenta um valor mínimo de 7% quando se trata do rejeitado do separador de inertes do Seixal (Amarsul), e um valor máximo de 33% em todas as SGRU sem partículas de dimensão superior a 16 mm.

Como a diferença do caudal de produção de TMBR ou EI das SGRU varia bastante (em alguns casos por duas ordens de grandeza), estes valores têm um peso maior para as SGRU com maior produção destes resíduos. Por esta razão calculou-se também a taxa de ocupação global:

$$t_{ocg} = \frac{(Fração > 5,6 \text{ mm } a < 16 \text{ mm total})}{(Fração > 5,6 \text{ mm total}) \times 3} \times 100 = \frac{94774}{127401 \times 3} \times 100 = 24,8 \% \quad (5)$$

Com uma taxa de ocupação global de 24,8% conclui-se que em média o RecGlass trabalha apenas durante esta proporção do tempo total de todo o processo. O TO, por comparação, tem uma taxa de ocupação de 100%, pois este equipamento é usado em todas as passagens e para todas as partículas de qualquer dimensão.

3.1.3. Tela transportadora de alimentação

A alimentação da UMP anteriormente proposta, efetua-se por intermédio de uma tela transportadora de perfil em z, que apresenta duas posições de funcionamento, a primeira posição corresponde à primeira passagem das frações entre 5,6 e 16 mm que alimenta a UMP através do primeiro RecGlass, a segunda posição corresponde às restantes passagens de todas as frações de TMBR ou EI. A primeira e segunda posição estão ambas ilustradas na figura 7 e identificadas pelas alíneas a) e b) correspondentemente.

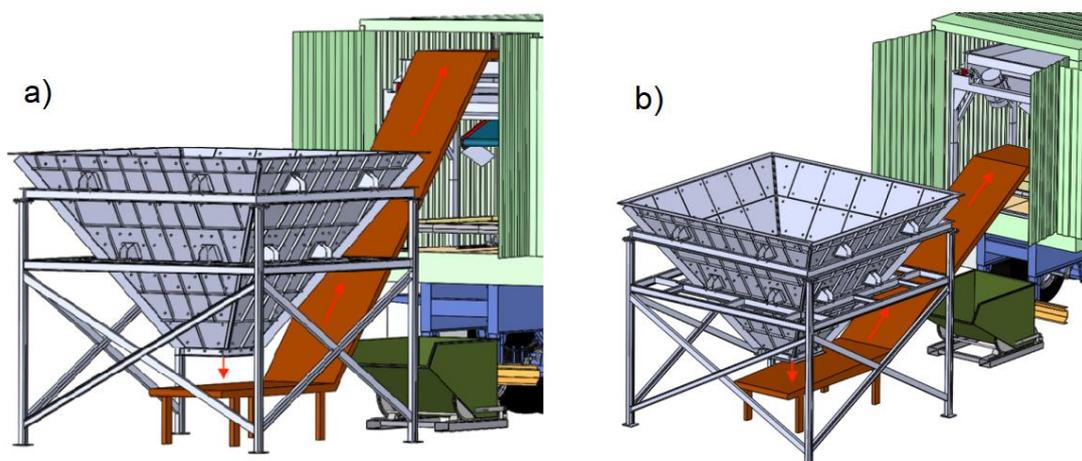


Fig. 7: Posições da tela transportadora de alimentação [1]

Esta mudança de posicionamento implica que esta tela transportadora terá de ser configurada para a segunda posição ou, caso não for possível, a substituição desta por outra com a segunda posição já pré-definida, ambos estes cenários são morosos. Para reconfigurar a posição da tela transportadora será necessário o recuo desta para fora da UMP, o que implica também o reposicionamento da tremonha para facilitar esta mudança, e o ajuste de parafusos nas dobras da tela e na própria estrutura de apoio desta. Para evitar estes procedimentos, sugere-se que qualquer mudança no ciclo de processamento entre passagens diferentes, seja facilitada por algum mecanismo instalado dentro da própria UMP.

Além do que foi anteriormente referido, observa-se ainda na figura 7 que o contentor de rejeitados da fração entre 5,6 e 16 mm usado durante a primeira passagem, está localizado diretamente por baixo da tela transportadora de alimentação, o que dificulta a sua extração.

3.2. Desenvolvimento da nova UMP

Após a análise da UMP anteriormente proposta, procedeu-se ao desenvolvimento do conceito da nova UMP, tendo como objetivo principal a maximização da capacidade de processamento. Para este efeito, começou-se pelo estudo e reconhecimento das restrições definidas pelo grupo de projeto Mobile-Pro-U.

3.2.1. Restrições do projeto

- I. Os equipamentos constituintes da UMP devem ser instalados num contentor intermodal padrão ISSO de 40 pés;
- II. Todos os equipamentos e componentes devem estar presentes no mercado e devidamente normalizados;
- III. A aplicação dos equipamentos no contentor deve ser realizada de forma a que estes não se movimentem enquanto a UMP estiver em movimento, permitindo assim o seu transporte rodoviário.

3.2.2. RecGlass

Com o objetivo de maximizar a capacidade de processamento, pôs-se em questão a inclusão deste equipamento na UMP, tendo como alternativa a instalação do RecGlass nas SGRU juntamente com os outros equipamentos de pré-processamento constituintes do DRV, listando-se agora os argumentos principais a favor desta mudança:

1. Como foi verificado na secção 3.1.2. através da taxa de ocupação global, o RecGlass trabalha em média apenas 24,8% do tempo total de processamento da UMP;
2. O RecGlass é constituído apenas por uma tela transportadora inclinada, correspondendo assim ao equipamento mais barato de todo o DRV, o que facilita a sua integração nos SGRU pois este não apresenta um aumento significativo nos custos da instalação do estágio de pré-processamento do DRV nos SGRU;
3. Metade do espaço disponível dentro do contentor de 40 pés, é ocupado pelos dois RecGlass, espaço que poderia ser aproveitado para a instalação de pelo menos mais um TO, equipamento nuclear da UMP que ao contrário do RecGlass, trabalha durante todas as passagens de TMBr e EI, e cujo custo deste equipamento é de pelo menos uma ordem de grandeza superior ao custo de qualquer outro equipamento constituinte do DRV.

Esta proposta para o RecGlass foi devidamente apresentada e discutida com membros do projeto Mobile-Pro-U, prosseguindo-se com o desenvolvimento de uma UMP sem este equipamento. A Figura 8 ilustra o novo DRV, separando os processos que serão realizados nas SGRU e na UMP respetivamente:

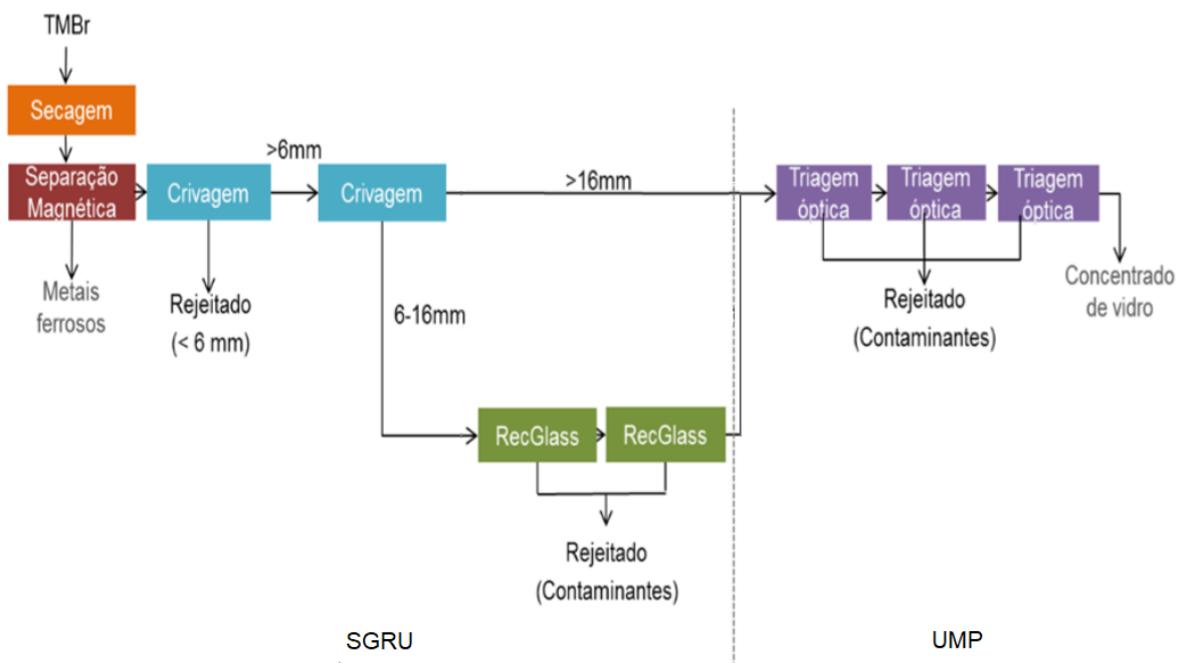


Fig. 8: DRV com os processos constituintes das SGRU e das UMP respetivamente

Ao contrário dos outros equipamentos do DRV, o RecGlass não está disponível no mercado como um todo, por esta razão, o dimensionamento da tela transportadora terá de respeitar certos parâmetros operacionais ótimos estabelecidos por Dias [2] e por Jardim [7] quando se trata de TMBr ou EI respetivamente, os quais são os seguintes:

- A altura de queda ideal dos resíduos entre a saída do alimentador vibratório e a tela transportadora é 190 mm diretamente para o centro desta última;
- O comprimento útil da tela transportadora é igual a 1540 mm. O rolamento de partículas para fora do RecGlass pode ocorrer para partículas com um baixo IC imediatamente após a queda e parar ao fim de uma certa distância percorrida, enquanto que algumas partículas de elevado IC podem não iniciar o rolamento imediatamente após a queda. Por esta razão, usa-se o mesmo comprimento usado por Dias [2] e Jardim [7];
- A largura útil da tela depende da largura da saída do alimentador vibratório, devendo exceder a largura deste último por 175 mm. Este excesso previne o efeito de parede, ou seja, evita a acumulação das partículas nas paredes laterais da tela transportadora após a queda, o que pode prevenir com que certas partículas com IC elevado, rolem para fora do RecGlass para serem removidas do caudal;
- O ângulo de inclinação ideal da tela transportadora depende do tipo de resíduos a serem processados. Dias [2] define um ângulo de 21° para TMBr, enquanto que Jardim [7] define um ângulo de 25° para EI;
- Para remover contaminantes leves, o caudal de TMBr e EI deve ser exposto a aspiradores de leves na saída dos alimentadores vibratórios que fornecem o RecGlass.

Dias [2] e Jardim [7], concluíram que a velocidade do tapete da tela transportadora não altera significativamente a remoção de contaminantes do concentrado de vidro, usando assim a velocidade máxima da tela transportadora (0,13 m/s) nos ensaios com o RecGlass. Segundo esta conclusão, a instalação do RecGlass nas SGRU irá permitir que este trabalhe em máximo potencial de processamento, pois ao contrário do RecGlass presente na UMP anteriormente proposta, com este não se tem a preocupação de ajustar a velocidade do tapete da tela transportadora de forma a garantir a conformidade com o caudal admissível do TO.

Com a informação anterior procedeu-se ao cálculo da estimativa da capacidade de processamento de dois RecGlass montados em série em velocidade máxima de processamento. A largura das telas transportadoras depende da largura da saída dos alimentadores vibratórios que assumiu-se terem as mesmas dimensões que as presentes na UMP anteriormente proposta, o que corresponde a uma largura útil de 1547 mm para a tela, usou-se também o mesmo modelo de tela transportadora, uma GL-HE da marca MTF Technik, com uma velocidade máxima de 0,26 m/s [1]. Sendo a densidade média do VDE igual a 2500 kg/(m³) e assumindo que a altura média

das partículas de fração entre 5,6 e 16 mm é igual a 10,8 mm (média das dimensões), a capacidade de processamento é dada pela seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= v_{max} \times l \times h \times 3600 \times \rho = \\ &= 0,26 \times 1,547 \times 0,0108 \times 3600 \times 2500 = 39095,9 \text{ kg/h} \approx 39 \text{ t/h} \end{aligned} \quad (6)$$

Assumindo 247 dias e dois turnos de trabalho (16 horas), a capacidade de processamento anual é de:

$$C_p = 39 \times 16 \times 247 = 154128 \text{ t/ano} \quad (7)$$

Esta capacidade de processamento anual é extremamente alta quando comparada com a produção anual de TMBR ou EI de fração entre 5,6 e 16 mm de qualquer SGRU presente na tabela 2, até mesmo se em vez de duas RecGlass montadas em série, se considerar apenas uma com reprocessamento na mesma, efetivamente reduzido a capacidade de processamento para metade (77064 ton/ano). Consequentemente conclui-se que um RecGlass é mais que suficiente para qualquer SGRU, existindo a possibilidade de reduzir a largura da tela transportadora, ou a utilização de um modelo mais lento de forma a reduzir ainda mais os custos da instalação do RecGlass nas SGRU.

3.2.3. Triador ótico

O TO é um equipamento indispensável para a UMP, não só porque o processamento do TMBR e EI no TO é o último passo para a obtenção do concentrado de vidro como definido no DRV, mas também devido ao facto do custo de um TO ser de pelo menos uma ordem de grandeza superior ao custo de qualquer outro equipamento constituinte do DRV, o que consequentemente inviabiliza a implementação do DRV nos SGRU, segundo Dias [2].

O TO seleccionado por Arrais [1] foi o Binder CLARITY Glass da empresa Binder+co, presente na figura 9, com uma largura de triagem de 1400 mm tem uma capacidade de triagem de 16 t/h.



Fig. 9: Binder CLARITY Glass [14]

O Binder CLARITY Glass ainda pode ser obtido com outras 2 larguras de triagem, 1000 mm e 700 mm, com capacidades de triagem de 12 t/h e 8 t/h respectivamente. Qualquer uma destas dimensões não permite a montagem de 3 equipamentos em série ao longo do comprimento do contentor de 40 pés, nem a montagem de 2 equipamentos ao longo da largura do mesmo. De modo a solucionar estas limitações dimensionais, realizou-se uma pesquisa no mercado com o intuito de encontrar um TO mais apropriado, o que resultou em resultados negativos, todos os TO com a função de processar RSU presentes no mercado dispõem de dimensões muito semelhantes ao Binder CLARITY Glass, impossibilitando então a instalação de 3 destes equipamentos de forma a tornar possível o processamento do TMBr e EI em apenas uma passagem pela UMP, visto que são necessárias 3 passagens pelo TO para se obter o produto final segundo o DRV.

Com a incapacidade de solucionar a limitação anterior, prosseguiu-se á escolha de um TO que possua vantagens sobre o Binder CLARITY Glass, foi considerado o ECOGLASS da empresa PICVISA, e o MSort AF da empresa Allgaier. Ambos estes TO têm uma capacidade de triagem máxima de 15 t/h [15 e 16], sendo esta inferior à da CLARITY Glass que é de 16 t/h [14]. Considerando o que foi anteriormente referido, considerou-se que manter o Binder CLARITY Glass é a melhor das opções.

Durante a análise do DRV desenvolvido por Dias [2], é possível notar que nos ensaios de otimização do DRV, foram usados TO da marca Sesotec, modelo SPEKTRUM, este modelo está desatualizado, já não estando disponível no mercado. As versões mais recentes deste modelo identificam-se sob os nomes de SPEKTRUM BASIC, SPEKTRUM SCOPE e SPEKTRUM FLASH [17]. Visto que foi empregue um modelo de TO obsoleto nos ensaios do DRV, foi conseqüentemente colocada a questão para a possibilidade de serem necessários menos de três estágios de processamento do TMBr e EI pelo CLARITY Glass, como descrito no DRV. É plausível que este último, que consistindo em tecnologia de triagem ótica atualizada, tenha um melhor desempenho para a remoção de contaminantes do que o modelo SPEKTRUM.

No âmbito de desenvolvimento desta dissertação, não foi possível testar experimentalmente um CLARITY Glass, por conseguinte não foi possível verificar a hipótese anteriormente colocada, mas numa fase mais avançada do projeto Mobile-Pro-U, o desempenho da UMP será testada, sendo possível chegar a uma conclusão sobre o número de estágios de processamento no TO necessários para se obter um concentrado de vidro que obedeça aos requisitos estabelecidos pela APA (tabela 1). O desenvolvimento da nova UMP será então realizado assumindo os três estágios de triagem ótica, com a viabilidade de ser facilmente adaptada para a possibilidade de serem necessários menos de três estágios deste processo.

3.2.4. Contentor intermodal

Todos os equipamentos constituintes da UMP são instalados dentro de um contentor intermodal de 40 pés com abertura traseira e lateral da Cleveland Containers (modelo 40ft Side Opening High Cube), com comprimento de 12190 mm, largura de 2431 mm, e altura de 2896 mm [18], ilustrado na figura 10.

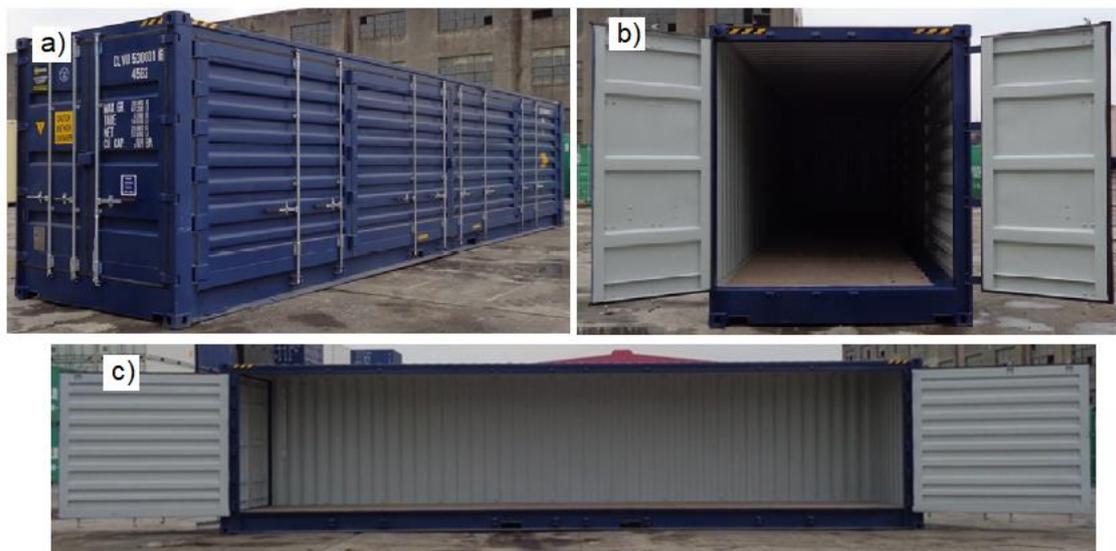


Fig. 10: Contentor da Cleveland Containers, a) entradas fechadas, b) entrada traseira aberta, c) entrada lateral aberta [18]

3.2.5. Montagem da UMP

A montagem dos diversos equipamentos constituintes da UMP, foi realizada com recurso ao software de modelação 3D SOLIDWORKS 2019, onde os modelos CAD destes componentes foram integrados no contentor da Cleveland Containers, de forma a conceptualizar o funcionamento destes em conjunto. Os modelos CAD dos equipamentos foram fornecidos pelos respetivos fabricantes.

A primeira iteração da montagem da UMP, reuniu dois TO CLARITY Glass, duas campânulas de aspiração de leves diretamente por cima da saída dos alimentadores vibratórios de cada TO, duas telas transportadoras de perfil em z, modelo KFG-P 2000 AS, e três telas transportadoras, modelo GUF-P 2000 AS, ambas da empresa MK Technology Group [19]. A figura 11 ilustra o modelo de CAD deste conjunto.

As telas transportadoras de perfil em z efetuam o transporte do TMBr e EI processado no primeiro TO para o segundo, apresentando pás ao longo do comprimento do tapete para possibilitar o transporte ao longo da secção inclinada da tela que dispõe um ângulo de 60°.

A largura máxima disponível para estas telas transportadoras é de 700 mm, e tendo em conta que a largura da entrada do alimentador vibratório do TO é de 1372 mm, foi necessário recorrer a duas destas telas montadas em paralelo com uma largura de 600 mm.

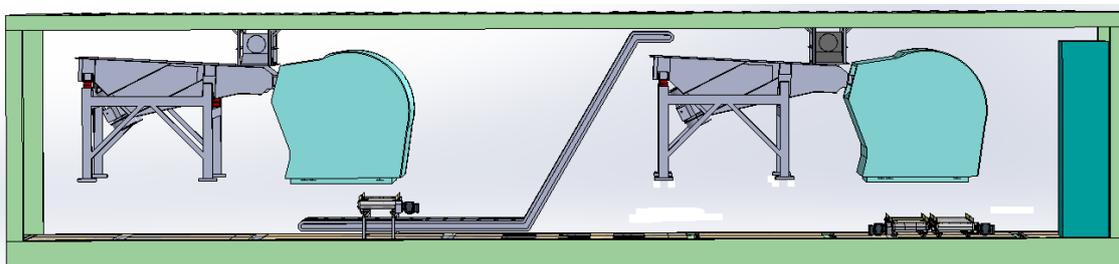


Fig. 11: Primeira iteração da montagem da UMP; Telas de perfil em z (modelo KFG-P 2000 AS) montadas paralelamente, e telas para a extração dos produtos da triagem ótica (modelo GUF-P 2000 AS) montadas debaixo dos TO

As telas transportadoras de modelo GUF-P 2000 AS, encontram-se instaladas diretamente por baixo das saídas dos TO para realizar a extração de contaminantes e do produto processado para o exterior do contentor através da lateral aberta do contentor, para que tal aconteça, a saída destas telas deve localizar-se fora do contentor durante o processamento de TMBr e EI, e dentro deste quando se pretende fechar as portas laterais para permitir o transporte rodoviário da unidade móvel. Para resolver estas duas situações, estas telas encontram-se montadas sobre um sistema de guiamento linear que permite o movimento e fixação nas posições de processamento e transporte.

Após o primeiro estágio de processamento no primeiro TO, o produto deste processo terá de cair sobre a tela transportadora de perfil z de forma a ser transportado para o segundo TO, enquanto que os contaminantes triados caem sobre a tela com saída para fora do contentor para executar a extração destes. Para este efeito, foi desenvolvida uma estrutura de apoio na qual esta tela se encontra montada de forma a manter-se elevada sobre a tela de perfil em z.

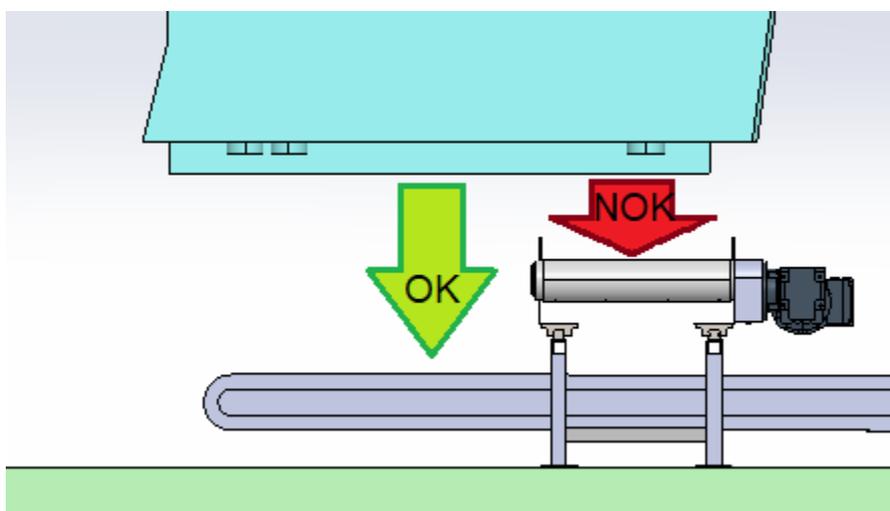


Fig. 12: Queda dos produtos do primeiro estágio de triagem ótica (OK é o concentrado de vidro, NOK são os contaminantes)

Esta primeira iteração da UMP já está capacitada para realizar os dois primeiros estágios de triagem ótica em série de forma automatizada, estando assim preparada para a possibilidade de só serem necessárias duas passagens pelos TO como foi discutido na secção 3.2.3. Todavia, a UMP deve ter a capacidade para realizar 3 triagens óticas como descrito no DRV, o que não é resolvido com a reintrodução do TMBr e EI na UMP, visto que esta ação levaria a que estes fossem processados 4 vezes pelo TO. Para evitar uma triagem ótica desnecessária, os TO terão de trabalhar em paralelo durante a segunda passagem do TMBr e EI pela UMP, sendo assim, o TO mais próximo da entrada traseira do contentor será alimentado da mesma forma que na primeira passagem, mas o segundo TO passará a ser alimentado diretamente pela entrada lateral do contentor.

Neste cenário, a extração do concentrado de vidro produzido pelo primeiro TO tem de ser resolvida, visto que este não deve ser transportado novamente para o segundo TO por via da tela de perfil em z, o que iria interferir com o processamento neste TO. De forma a resolver esta situação foram ponderadas duas soluções:

- O concentrado de vidro é ejetado do TO para a tela transportadora de perfil em z, e antes de chegar à secção inclinada deste, o caudal é redirecionado para uma saída lateral por meio de um braço desviador mecânico, caindo sobre uma tela transportadora que realiza a extração para fora do contentor. O AutoSort 4 da empresa DAIFUKU é um exemplo de um braço desviador disponível no mercado (figura 13). Esta opção é inviabilizada pelo facto de o tapete da tela transportadora de perfil em z não ter uma superfície plana devido às pás presentes ao longo do seu comprimento (figura 14);



Fig. 13: AutoSort 4 da empresa DAIFUKU [20]



Fig. 14: Pás presentes na superfície do tapete da KFG-P 2000 AS [19]

- O concentrado de vidro é ejetado do TO e cai numa tela transportadora que efetua a extração do concentrado de vidro, que se encontra montada sobre a estrutura de apoio idêntica à que foi anteriormente desenvolvida, que por sua vez se encontra montada sobre um sistema de guiamento linear que permite o movimento transversal desta estrutura e a sua fixação entre as duas posições distintas para a primeira e segunda passagens do TMBr e EI (figura 15). A tela transportadora de perfil em z apresenta-se inativa durante todo este processo. Esta constitui a opção adotada.

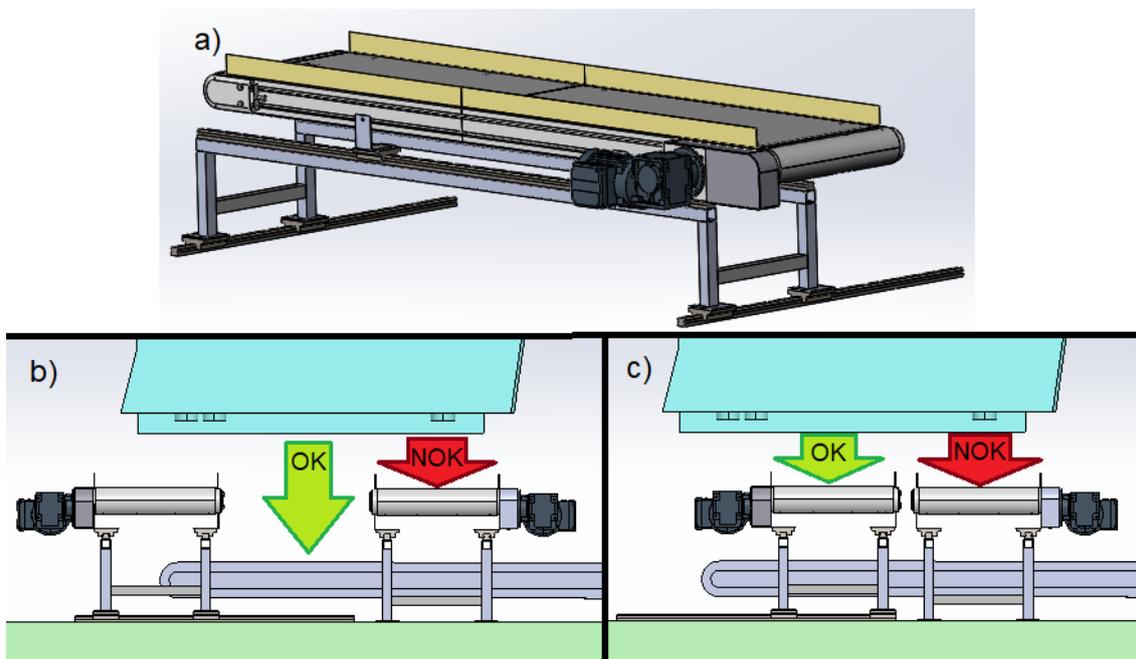


Fig. 15: Funcionamento da tela transportadora com locomoção lateral: a) Tela transportadora montada sobre uma estrutura de elevação e sobre dois sistemas de guiamento linear que permitem o deslocamento em duas direções; b) Posição da tela durante a primeira passagem do TMBr e EI pela UMP; c) Posição da tela durante a segunda passagem do TMBr e EI pela UMP (OK é o concentrado de vidro, NOK são os contaminantes)

Tendo alcançado a solução anterior, já está garantido o processamento do TMBr e EI por três estágios de triagem ótica, chegando-se assim ao estado final da UMP. A figura 16 apresenta o modelo CAD completo da UMP, incluindo as estruturas de suporte dos TO e tela transportadora de perfil em z.

Como os TMBr e EI não podem ser processados de forma contínua, tem de se ter o cuidado de não haver a mistura entre os produtos da primeira passagem e os da segunda passagem, ou seja, entre cada um destes dois estágios de processamento, tem de se garantir que o contentor de deposição do produto final, encontra-se vazio.

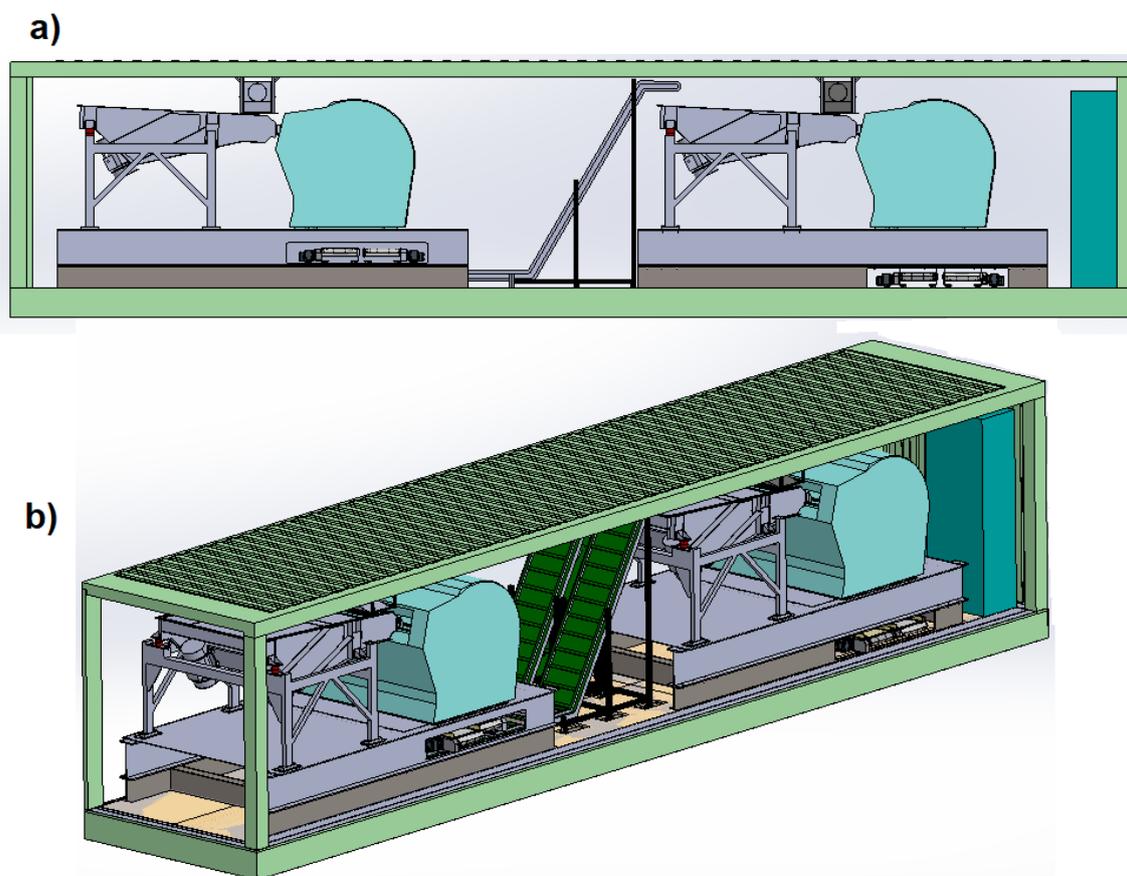


Fig. 16: A montagem final da UMP com todos os equipamentos constituintes: a) vista lateral; b) vista isométrica.

3.2.6. Funcionamento da nova UMP

UMP é transportada sobre um semirreboque até uma SGRU onde, após a sua chegada, serão abertas as portas traseira e lateral do contentor, e de seguida são instalados os equipamentos presentes nas SGRU, ilustrados na figura 17.

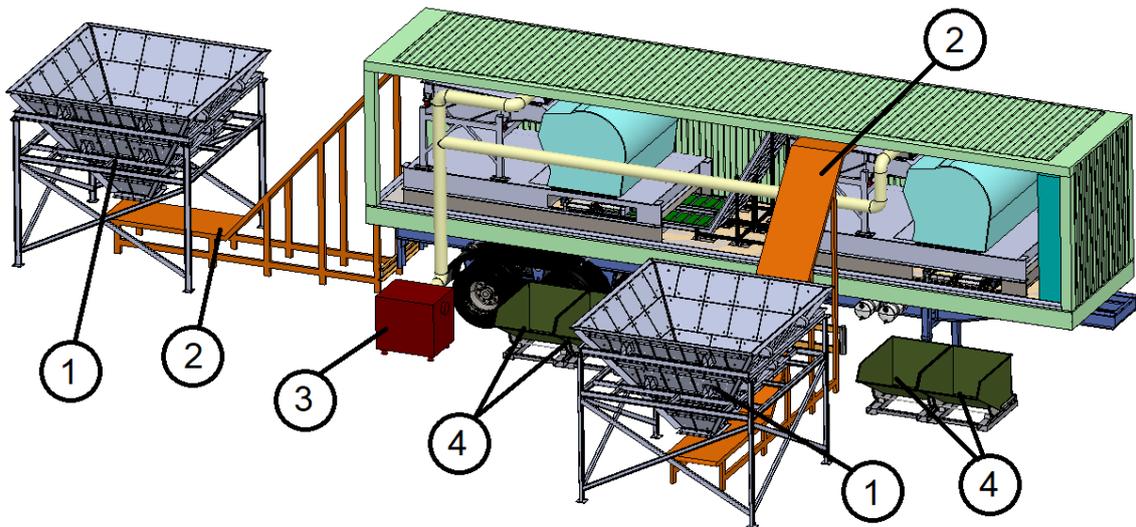


Fig. 17: UMP conectada com os equipamentos presentes numa SGRU: duas Tremonhas (1); duas Telas transportadoras de alimentação (2); Sistema de aspiração (3); quatro Contentores de deposição para os contaminantes e o concentrado de vidro (4).

Após a instalação destes equipamentos, a UMP está preparada para realizar a primeira passagem. Uma pá carregadora efetua a deposição do TMBR ou EI na tremonha ligada à tela transportadora que efetua o transporte do material pela entrada traseira da UMP, alimentado diretamente o primeiro TO (figura 18).

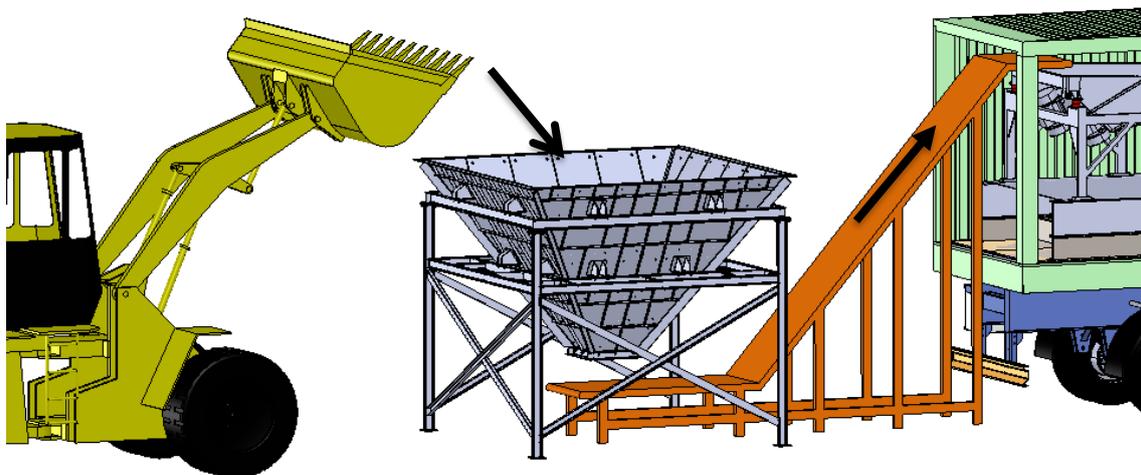


Fig. 18: Alimentação da UMP

O TMBR ou EI passam por um estágio de aspiração de leves à entrada do primeiro TO e seguidamente são processados por este último. Após a triagem, os contaminantes são extraídos para fora do contentor, enquanto que o concentrado de vidro cai sobre a tela transportadora de perfil em z que efetua o transporte deste para o segundo TO. Note-se que na imagem 19 b), a tela transportadora da esquerda está inativa.

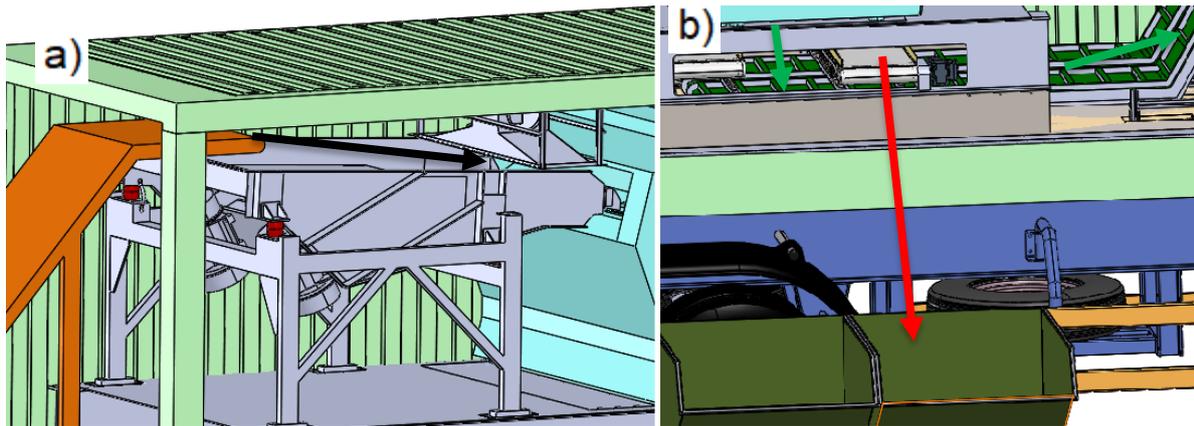


Fig. 19: Processamento do TMBr ou EI pelo primeiro TO; a) abastecimento do alimentador vibratório e aspiração de leves; b) contaminantes (a vermelho) são extraídos para fora da UMP enquanto que o concentrado de vidro (a verde) é transportado pela tela de perfil em z para o próximo TO.

O segundo TO é alimentado pela tela de perfil em z, o processamento neste é feito como explicado anteriormente, com a diferença de ambos os contaminantes e o concentrado de vidro serem extraídos após a conclusão deste processo, com este último passo, conclui-se a primeira passagem pela UMP (figura 20).

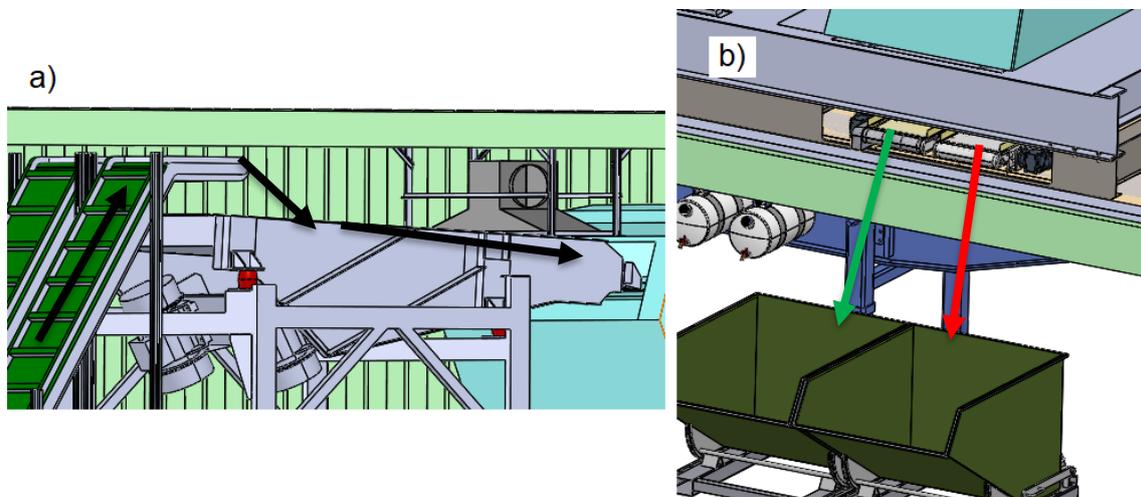


Fig. 20: Processamento do TMBr ou EI pelo segundo TO; a) abastecimento do alimentador vibratório e aspiração de leves; b) contaminantes (a vermelho) e concentrado de vidro (a verde) são extraídos para fora da UMP.

Antes de se iniciar a segunda passagem do TMBr ou EI pela UMP, tem de se garantir que o contentor de concentrado de vidro se encontra vazio para que não haja a mistura entre os produtos das duas passagens distintas. Também terá de ser feito o posicionamento da tela transportadora que realiza a extração do concentrado de vidro do primeiro TO (figura 21).

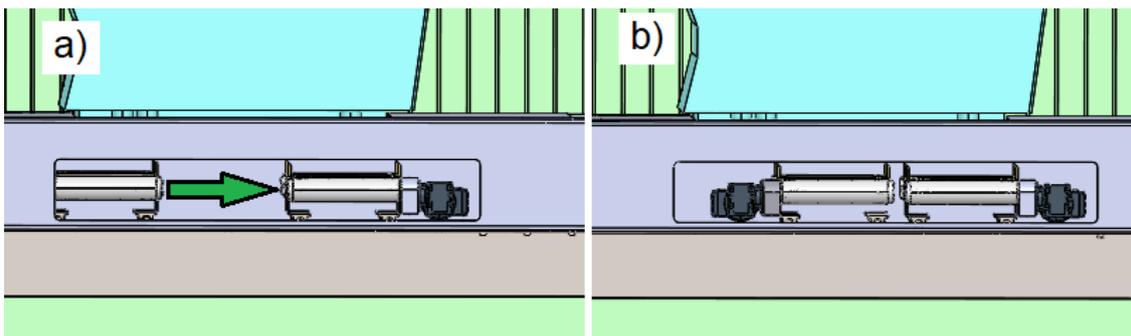


Fig. 21: Posicionamento da tela de extração do produto final do primeiro TO

Na segunda passagem, ambas as tremonhas são abastecidas de TMBr ou EI que depositam estes nas telas de alimentação que se apresentam ligadas ao respetivo TO (figura 22). Nesta passagem, os TO trabalham em paralelo. A tela de perfil em z encontra-se inativa durante todo este processo.

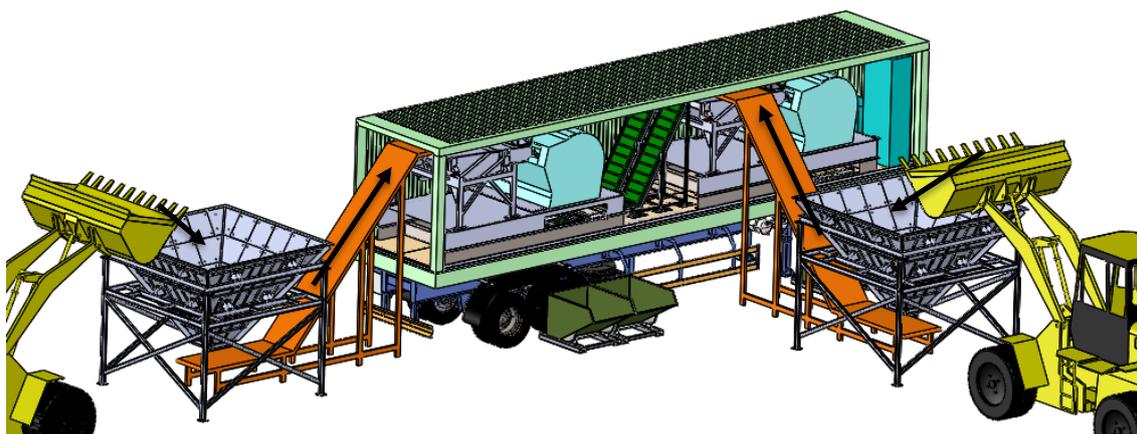


Fig. 22: Alimentação da UMP durante a segunda passagem do TMBr ou EI pelo sistema

O TMBr ou EI passam por um estágio de aspiração de leves e seguidamente são processados pelo respetivo TO. Após a triagem, ambos os contaminantes e o concentrado de VDE, são extraídos para fora do contentor (figura 23). O produto final da segunda passagem deve corresponder ao VDE que obedece aos requisitos estabelecidos pela APA (tabela 1).

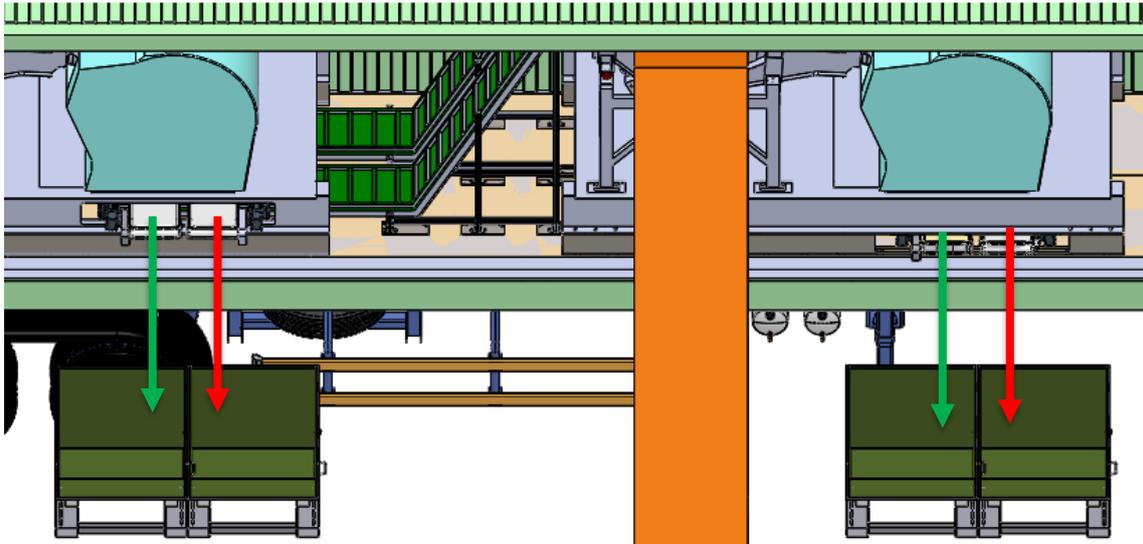


Fig. 23: Extração dos contaminantes e produto final; contaminantes (a vermelho) e o VDE (a verde).

Com todo o processo completo, as telas transportadoras que extraem os produtos para fora do contentor são recolhidas para dentro da UMP, as portas traseiras e laterais são fechadas, e finalmente, a UMP está preparada para o seu transporte rodoviário, de forma a que seja transportada para uma nova SGRU (figura 24).

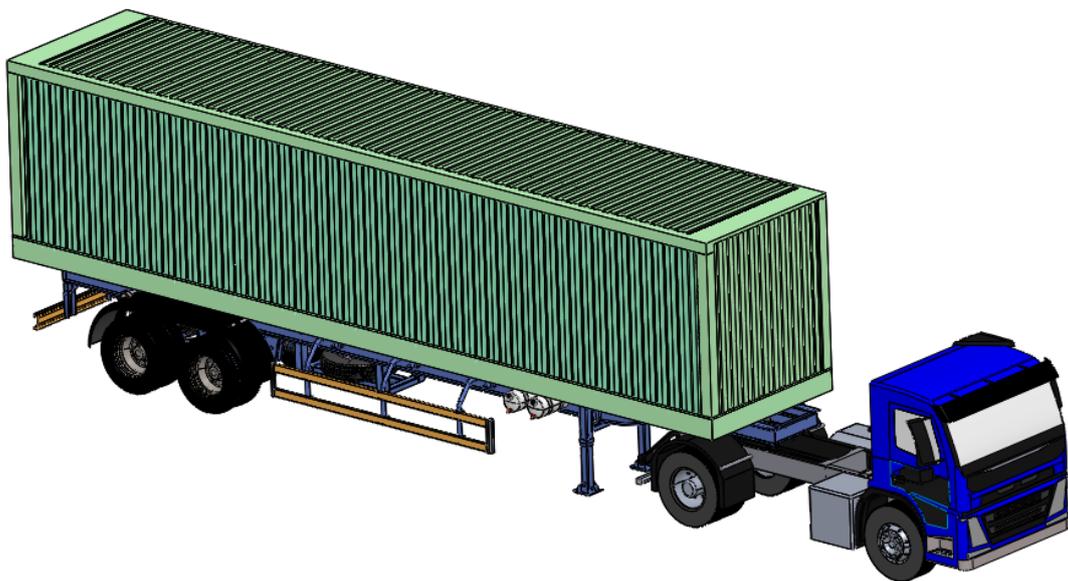


Fig. 24: UMP com as portas fechadas, preparada para o seu transporte rodoviário.

3.2.7. Estimativa de custos

Os equipamentos que constituem a UMP são produtos disponíveis no mercado, pelo que o custo destes foram fornecidos pelo respetivo fabricante. O preço do semirreboque e do veículo trator são apenas valores de referência, iguais aos que foram usados por Arrais [1] para que se possa realizar uma comparação de preços equitativa. A tabela 4 apresenta os custos dos equipamentos presentes na UMP bem como o custo total desta.

Tabela 4: Custos dos equipamentos constituintes da UMP e o respetivo total

Equipamento	Preço por unidade	Quantidade	Total parcial
Triador ótico CLARITY Glass	215 000 €	2	430 000 €
Veículo trator	100 000 €	1	100 000 €
Semirreboque	23 000 €	1	23 000 €
Contentor ISO Cleveland Containers	11 000 €	1	11 000 €
Tela de perfil z KFG-P 2000 – MK Group	4 300 €	2	8 600 €
Tela de extração GUF-P 2000 – MK Group	2 400 €	4	9 600 €
Sistemas de guiamento linear - Hepco	1 100 €	1	1 100 €
Campânula de aspiração	600 €	2	1 200 €
Total			584 500 €

Como se pode observar a partir da tabela, os dois TO da Binder, modelo CLARITY Glass, representam cerca de 73,6% do custo total da UMP, indicando que devido ao elevado custo destes equipamentos, fica inviabilizada a implementação destes nas SGRU, tal como foi concluído por Dias [2].

3.3. Comparação dos modelos propostos para a UMP

Tendo-se concluído o desenvolvimento da nova proposta para a UMP, procedeu-se à comparação desta com a UMP anteriormente proposta, tendo como principal parâmetro, a capacidade que estes possuem para realizar o processamento do caudal anual de TMBr e EI produzido pelas diversas SGRU e o custo de implementação das soluções.

O processamento na nova UMP consiste em duas passagens do TMBR ou EI, na primeira os TO trabalham em série enquanto que na segunda estes trabalham em paralelo. A capacidade de processamento dos TO CLARITY Glass é de 16 t/h, o que significa que a primeira passagem pela UMP aceita um caudal de 16 t/h, em contrapartida a segunda passagem aceita um caudal de 32 t/h. Com a informação anterior pode-se deduzir que a UMP leva uma hora e meia a processar 16 t. A equação 8 calcula a capacidade de processamento da nova UMP.

$$\dot{m} = \frac{16}{1,5} = 10,6 \text{ t/h} \quad (8)$$

Assumindo que a UMP trabalha 247 dias por ano durante dois turnos de trabalho (16 horas), cada UMP teria uma capacidade de processamento anual de:

$$C_p = \dot{m} \times 16 \left(\frac{\text{h}}{\text{dia}} \right) \times 247 \left(\frac{\text{dia}}{\text{ano}} \right) = 41891 \text{ t/ano} \quad (9)$$

Tal como a UMP anteriormente proposta, a capacidade de processamento da nova UMP é inferior à produção anual de EI da Valorsul (45045 ton/ano). Uma das novas UMP teria de ficar permanentemente nesta SGRU, sobrando 3154 toneladas para ser processado por uma segunda UMP. Em contrapartida, a UMP anteriormente proposta necessita de mais uma unidade para processar este caudal (como foi visto na seção 3.1.1.).

O número estimado de unidades necessárias para processar todo o caudal de produção anual de TMBR ou EI de fração superior a 5,6 mm, das instalações analisadas no projeto Mobile-Pro-U é obtida da seguinte forma:

$$N = \frac{(\text{Fração} > 5,6 \text{ mm total})}{C_p} = \frac{127401}{41891} = 3,04 \rightarrow 4 \text{ UMP} \quad (10)$$

Apesar do custo acrescido da nova UMP, a diferença entre as capacidades de processamento das duas UMP implica um número diferente de unidades necessárias para processar o caudal anual de TMBR e EI, pelo que será importante comparar os custos totais para a produção da rede de UMP. Estes resultados estão presentes na seguinte tabela:

Tabela 5: Comparação de custos entre as duas alternativas

Unidade	Custo unitário	Quantidade	Custo total
UMP anteriormente proposta	412 700 €	7	2 888 900 €
Nova UMP	584 500 €	4	2 338 000 €

Com os resultados presentes na tabela anterior, conclui-se que apesar do custo unitário da nova UMP ser superior, são necessárias menos três unidades para formar a rede Mobile-Pro-U devido ao incremento na capacidade de processamento de resíduos, o que resulta numa redução de custo total estimado em 550 900 €.

Na situação em que um dos TO se encontra inoperacional por motivos de danificação ou manutenção, o processamento de TMBR e EI na UMP nova continua a ser exequível, dado que a unidade possui dois modos de processamento, em série e em paralelo, sendo que este último permite que os TO trabalhem independentemente um do outro, o que constitui uma vantagem sobre a UMP anteriormente proposta.

4. Notas de cálculo

4.1. Carregamentos de projeto

A Associação Nacional de Transportadores Públicos Rodoviários de Mercadorias (ANTRAM), estabelece requisitos para a imobilização de cargas para o transporte rodoviário, fundamentados na norma europeia EN 12195-1 que tem como tema, “Restrição de carga em veículos rodoviários – Segurança – Parte 1: cálculo das forças de imobilização” [21]. Segundo a norma EN 12195-1, as estruturas de suporte devem ser projetadas para suportar 80% do peso da carga na direção dianteira do veículo, e 50% do peso da carga na direção lateral e retaguarda do veículo (Figura 25).

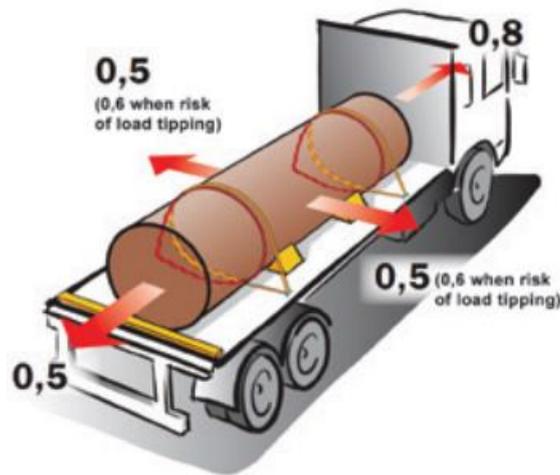


Fig. 25: Cargas que as estruturas de suporte devem suportar [21]

Estes requisitos estabelecem o primeiro conjunto de esforços que serão aplicados nas estruturas de suporte para realizar o cálculo de forças de reação e tensões resultantes. Os esforços aplicados serão representados por P_x na direção dianteira, P_y na direção lateral e P_z na direção vertical:

$$P_z = m \times g \quad (11)$$

$$P_x = 0,8 \times P_z \quad (12)$$

$$P_y = 0,5 \times P_z \quad (13)$$

Onde m é a massa do equipamento, e g é a aceleração gravítica.

Além dos esforços anteriormente referidos, serão também considerados um segundo conjunto de esforços que representam o carregamento aplicado nas estruturas de suporte enquanto a UMP estiver em funcionamento. Será considerado um esforço de 30% do peso total do equipamento juntamente com a carga de TMBR ou EI nas direções longitudinais e laterais (x e y respetivamente). Este método foi usado por Arrais [1].

$$P_z = (m + m_c) \times g \quad (14)$$

$$P_x = 0,3 \times P_z \quad (15)$$

$$P_y = 0,3 \times P_z \quad (16)$$

Onde m_c é a massa do TMBr ou EI presentes no equipamento.

4.2. Coeficiente de segurança

O coeficiente de segurança é uma ferramenta teórica empregada no desenvolvimento de estruturas, é uma medida da incerteza do projeto relativamente a cargas inesperadas, custos económicos de uma falha, qualidade dos materiais, riscos para seres humanos e a exatidão da análise. Para o cálculo deste coeficiente foi usado o método de Pugsley, no qual o coeficiente de segurança é calculado com a seguinte expressão [22]:

$$n_{seg} = N_1 \times N_2 = 1,6 \times 1,2 = 1,92 \quad (17)$$

Os valores dos dois fatores que constituem a expressão anterior foram retirados da tabela presente no anexo A.1. e são funções do nível de incerteza das condições apresentadas a seguir:

$$N_1 = f(A, B, C); \quad N_2 = f(D, E)$$

- A. Qualidade dos materiais: Muito Bom
- B. Controlo sobre a carga aplicada: Bom
- C. Precisão da análise estrutural: Razoável
- D. Perigo para pessoas: Não sério
- E. Impacto económico: Muito sério

4.3. Estrutura de suporte das telas transportadoras de extração

4.3.1. Considerações iniciais

Procedeu-se à análise da estrutura de suporte desenvolvida para suportar as telas transportadoras sobre a tela de perfil em z, que efetuam a extração dos produtos processados pelo TO mais próximo da entrada traseira do contentor.

Esta estrutura é composta por vigas de perfil quadrado com 28 mm de largura e 1,5 mm de espessura, conectados entre si por ligações soldadas do tipo junta de topo. Estes elementos

estruturais foram selecionados através do catálogo de produtos laminados da empresa FERPINTA (ver anexo A.2). São produzidos em aço S235JR (Norma EN 10025-2), cujas propriedades relevantes são as seguintes [23]:

- Módulo de Young: $E = 210 \text{ GPa}$
- Massa volúmica: $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$
- Tensão de cedência: $S_y = 235 \text{ MPa}$
- Tensão de rotura: $S_u = 360 \text{ MPa}$

Como se pode observar na figura 26, a estrutura de suporte é constituída por 3 elementos com diferentes dimensões e considerações no que diz respeito ao seu tipo de apoio:

- Elementos 1: viga bi-encastada, com um comprimento de 1700 mm;
- Elementos 2: viga cantilever, com um comprimento de 260 mm;
- Elementos 3: Barra apoiada dos dois lados, com um comprimento de 290 mm.

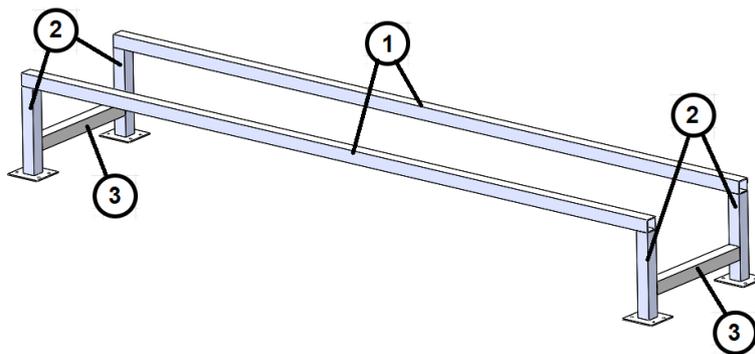


Fig. 26: Esquema do suporte com elementos constituintes numerados

4.3.2. Cálculos para verificação da segurança

Como explicado na secção 4.1, a estrutura de suporte será analisada quanto aos seus esforços e tensões com a aplicação das forças correspondentes das posições de transporte rodoviário e durante o funcionamento da UMP, começando pela primeira (figura 27). As forças serão aplicadas na zona de contacto dos 4 pés da tela com a viga.

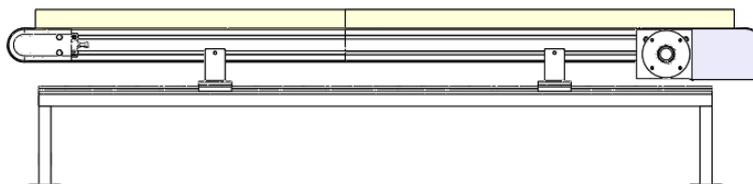


Fig. 27: Posição da tela para transporte rodoviário

O carregamento 1 é imposto pelo peso próprio da tela transportadora cuja massa é igual a 50 Kg [19], o que se traduz nos seguintes esforços (equações 11 a 13):

$$P_z = \frac{50}{4} \times 9,81 = 122,7 \text{ N} \quad (18)$$

$$P_x = 0,8 \times P_z = 98,1 \text{ N} \quad (19)$$

$$P_y = 0,5 \times P_z = 61,3 \text{ N} \quad (20)$$

Estas forças estão aplicadas nos pontos B e C da viga bi-encastada nos pontos A e D (elemento 1), representados no diagrama de corpo livre (DCL) na figura 28:

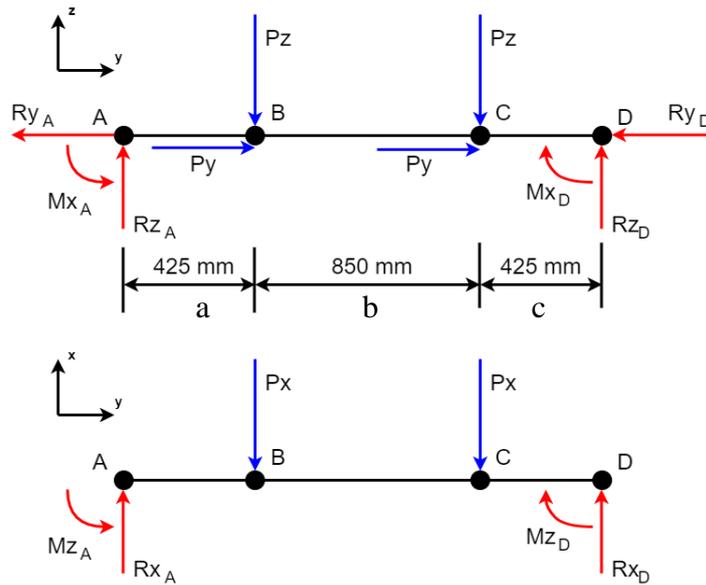


Fig. 28: DCL do elemento 1 durante o carregamento 1

Para o cálculo das reações apresentadas, foram aplicadas as equações de equilíbrio estático de uma viga bi-encastada, dadas por:

$$M_{xA} = \frac{P_z \times a \times (b+c)^2}{(a+b+c)^2} + \frac{P_z \times (a+b) \times c^2}{(a+b+c)^2} \quad (21)$$

$$M_{xD} = \frac{P_z \times (b+c) \times a^2}{(a+b+c)^2} + \frac{P_z \times c \times (a+b)^2}{(a+b+c)^2} \quad (22)$$

$$V_{zA} = \frac{P_z \times (b+c)^2 \times (3 \times a + b + c)}{(a+b+c)^3} + \frac{P_z \times c^2 \times (3 \times (a+b) + c)}{(a+b+c)^3} \quad (23)$$

$$V_{zD} = \frac{P_z \times a^2 \times (3 \times (b+c) + a)}{(a+b+c)^3} + \frac{P_z \times (a+b)^2 \times (3 \times c + (a+b))}{(a+b+c)^3} \quad (24)$$

$$N_{yA} = \frac{P_y \times (b+c)}{a+b+c} + \frac{P_y \times c}{a+b+c} \quad (25)$$

$$N_{yD} = \frac{P_y \times a}{a+b+c} + \frac{P_y \times (a+b)}{a+b+c} \quad (26)$$

$$M_{zA} = \frac{P_x \times a \times (b+c)^2}{(a+b+c)^2} + \frac{P_x \times (a+b) \times c^2}{(a+b+c)^2} \quad (27)$$

$$M_{zD} = \frac{P_x \times (b+c) \times a^2}{(a+b+c)^2} + \frac{P_x \times c \times (a+b)^2}{(a+b+c)^2} \quad (28)$$

$$V_{zA} = \frac{P_x \times (b+c)^2 \times (3 \times a + b + c)}{(a+b+c)^3} + \frac{P_x \times c^2 \times (3 \times (a+b) + c)}{(a+b+c)^3} \quad (29)$$

$$V_{zD} = \frac{P_x \times a^2 \times (3 \times (b+c) + a)}{(a+b+c)^3} + \frac{P_x \times (a+b)^2 \times (3 \times c + (a+b))}{(a+b+c)^3} \quad (30)$$

Resolvendo as equações anteriores aplicando os valores das forças aplicadas anteriormente obtidas e as distâncias entre cada ponto apresentadas na figura 28, os resultados das forças de reação nos pontos A e D estão presentes na tabela 6:

Tabela 6: Reações no elemento 1 durante o carregamento 1

	Mx (Nm)	Vz (N)	Ny (N)	Mz (Nm)	Vx (N)
Ponto A	39,1	122,6	-61,3	31,3	98,1
Ponto D	-39,1	122,6	-61,3	-31,3	98,1

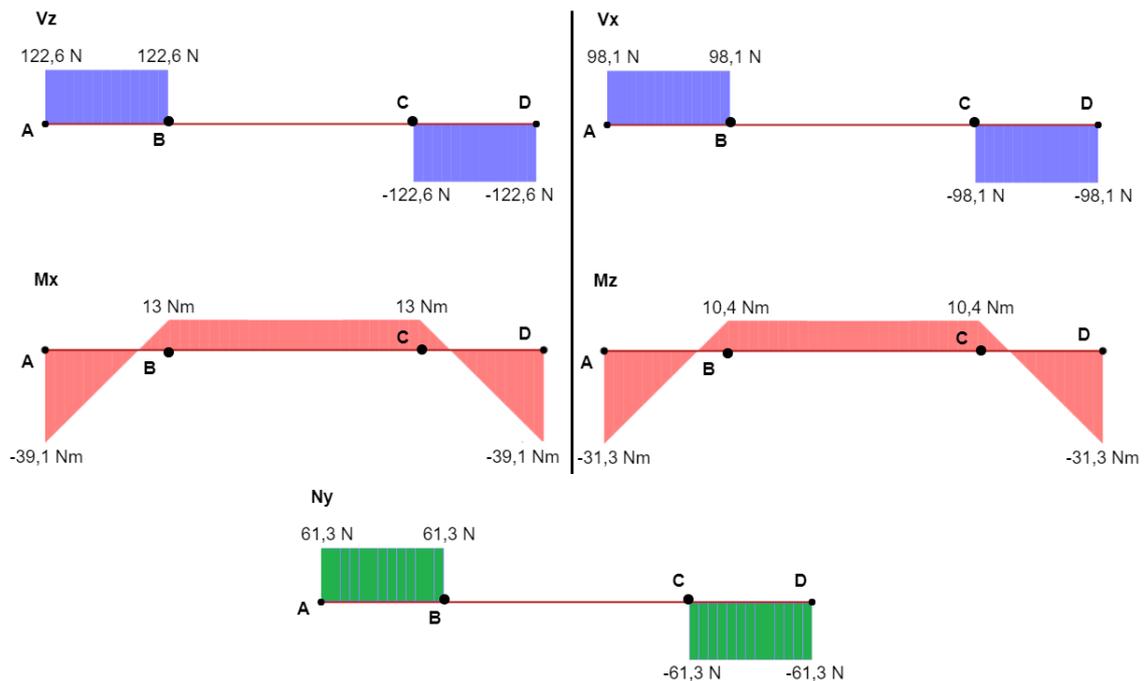


Fig. 29: Diagrama de esforços do elemento 1 durante o carregamento 1

Observa-se na figura 29 que os esforços são máximos nos pontos de apoio A e D onde a magnitude dos mesmos é equivalente, sendo assim escolheu-se o ponto D para realizar os cálculos das tensões resultantes dos esforços cujas equações são dadas por:

- Tensão resultante da força axial segundo o eixo y:

$$\sigma_{NyD} = \frac{N_{yD}}{A} = -0,39 \text{ MPa} \quad (31)$$

Com: $A = 1,59 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

- Tensões resultantes dos momentos de flexão segundo os eixos x e z:

$$\sigma_{MxD} = \frac{M_{xD} \times B/2}{I} = -29,31 \text{ MPa} \quad (32)$$

$$\sigma_{MzD} = \frac{M_{zD} \times B/2}{I} = -23,45 \text{ MPa} \quad (33)$$

Com: $I = 1,867 \times 10^{-8} \text{ m}^4$; $B = 0,028 \text{ m}$

- Tensões resultantes das forças de corte segundo os eixos x e z:

$$\tau_{VxD} = \frac{V_{xD} \times Q}{I \times 2t} = 1,39 \text{ MPa} \quad (34)$$

$$\tau_{VzD} = \frac{V_{zD} \times Q}{I \times 2t} = 1,73 \text{ MPa} \quad (35)$$

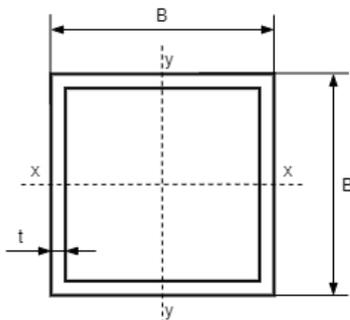


Fig. 30: Esquema do perfil do tubo quadrado

Com: $t = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$; Q é o primeiro momento de área da secção do tubo quadrado, calculada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} Q &= \left(\frac{B}{2} - \frac{t}{2}\right) \times B \times t + 2 \times \left(\frac{B}{2} - t\right) \times t \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{B}{2} - t\right) = \\ &= 7,908 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (36)$$

- Tensão de von Mises:

$$\sigma_{VMD} = \sqrt{(\sigma_{NyD} + \sigma_{MxD} + \sigma_{MzD})^2 + 3 \times (\tau_{VxD}^2 + \tau_{VzD}^2)} = 53,28 \text{ MPa} \quad (37)$$

- Verificação da segurança:

$$n_1 = \frac{S_y}{\sigma_{VMD}} = 4,41 > n_{seg} \quad (38)$$

As reações calculadas do ponto D presentes na tabela 6, passarão agora a ser aplicadas na extremidade livre da viga cantilever apoiada no ponto E (elemento 2), representados no DCL na figura 29:

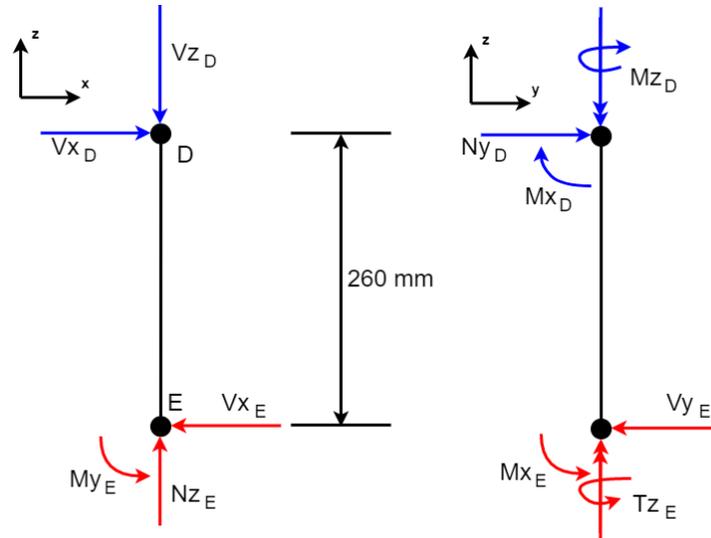


Fig. 31: DCL do elemento 2 durante o carregamento 1

Para o cálculo das reações apresentadas no ponto E desta viga cantilever foram usadas as seguintes expressões:

$$N_{zE} = -V_{zD} = -122,6 \text{ N} \quad (39)$$

$$V_{xE} = -V_{xD} = -98,1 \text{ N} \quad (40)$$

$$V_{yE} = -N_{yD} = -61,3 \text{ N} \quad (41)$$

$$T_{zE} = -M_{zD} = 31,3 \text{ N} \quad (42)$$

$$M_{yE} = V_{xD} \times L_2 = 25,5 \text{ Nm} \quad (43)$$

$$M_{xE} = -M_{xD} - N_{yD} \times L_2 = 55 \text{ Nm} \quad (44)$$

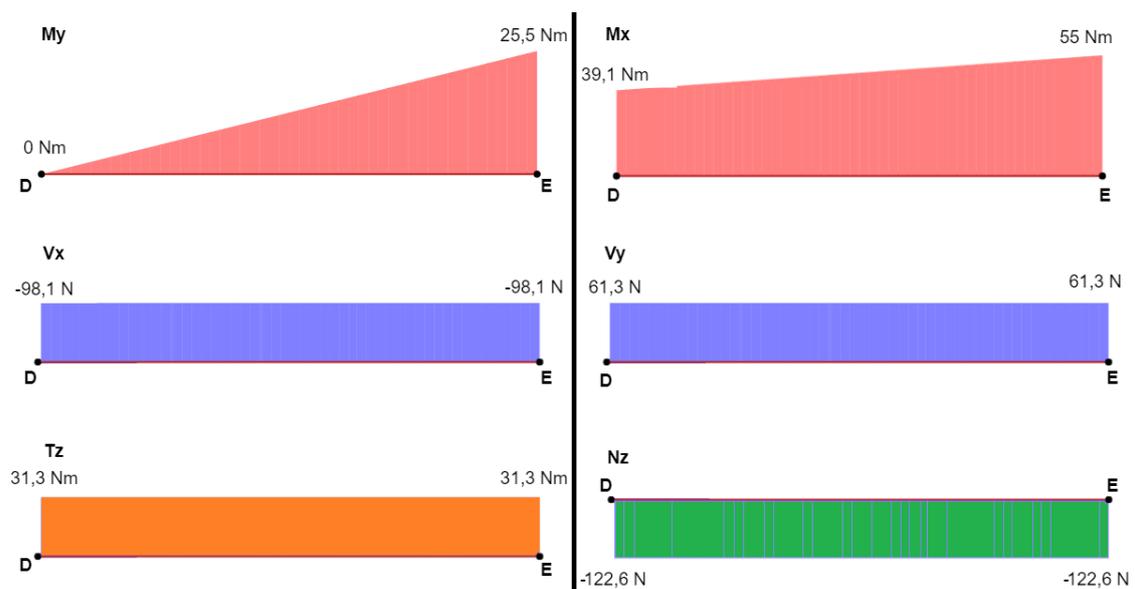


Fig. 32: Diagrama de esforços do elemento 2 durante o carregamento 1

Observa-se na figura 32 que os esforços são máximos no ponto E, que corresponde ao único ponto encastrado, o que está em conformidade como é o caso com qualquer viga cantilever. As equações das tensões resultantes neste elemento são dadas por:

- Tensão resultante da força axial segundo o eixo z:

$$\sigma_{NzE} = \frac{N_{zE}}{A} = -0,77 \text{ MPa} \quad (45)$$

- Tensões resultantes dos momentos de flexão segundo os eixos x e y:

$$\sigma_{MyE} = \frac{M_{yE} \times B/2}{I} = 19,13 \text{ MPa} \quad (46)$$

$$\sigma_{MxE} = \frac{M_{xE} \times B/2}{I} = 41,26 \text{ MPa} \quad (47)$$

- Tensões resultantes das forças de corte segundo os eixos x e y:

$$\tau_{VxE} = \frac{V_{xE} \times Q}{I \times 2t} = -1,39 \text{ MPa} \quad (48)$$

$$\tau_{VyE} = \frac{V_{yE} \times Q}{I \times 2t} = -0,87 \text{ MPa} \quad (49)$$

- Tensão resultante do momento de torção segundo o eixo z:

$$\tau_{TzE} = \frac{T_{zE}}{2 \times t \times A_m} = 14,04 \text{ MPa} \quad (50)$$

Com: $A_m = 7,426 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

- Tensão de von Mises:

$$\sigma_{VME} = \sqrt{(-\sigma_{NzE} + \sigma_{MyE} + \sigma_{MxE})^2 + 3 \times (\tau_{VxE}^2 + \tau_{VyE}^2 + \tau_{TzE}^2)} = 65,88 \text{ MPa} \quad (51)$$

- Verificação da segurança:

$$n_2 = \frac{S_Y}{\sigma_{VME}} = 3,57 > n_{seg} \quad (52)$$

Dado que o elemento 2 trata-se de uma viga cantilever sob uma força de compressão, deve se calcular e verificar a carga crítica de flambagem:

$$P_{cr2} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_f^2} = 160142 \text{ N} \quad (53)$$

$$n_{f2} = \frac{P_{cr2}}{N_{zE}} = 1306 \gg n_{seg} \quad (54)$$

Com: $L_f = 2 \times L_2 = 0,520 \text{ m}$ (valido para vigas cantilever)

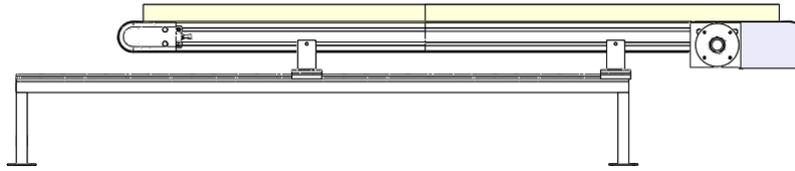


Fig. 33: Posição da tela durante o processamento de TMBr e EI

O carregamento 2 corresponde à situação em que a tela transportadora tem a sua saída no exterior da UMP, realizando a extração dos produtos triados (figura 33). A carga que é imposta na estrutura de suporte inclui a massa dos produtos sobre a tela. O peso considerado para estes produtos vai ser aquele que corresponde ao pior dos casos, ou seja, assume-se que estes possuem a dimensão máxima observada das partículas presentes no TMBr e EI, que segundo Dias [2], corresponde a uma dimensão de 22 mm, sendo que as partículas de dimensões superiores são praticamente inexistentes. Sendo o comprimento destas telas de 1900 mm com uma largura útil de 390 mm, a massa da carga sobre a tela bem como os esforços resultantes são dados por (equações 14 a 16 para os esforços):

$$m_c = 2500 \times 1,9 \times 0,022 \times 0,39 \approx 41 \text{ Kg} \quad (55)$$

$$P_z = (50 + 41) \times 9,81 = 223,9 \text{ N} \quad (56)$$

$$P_x = 0,3 \times P_z = 67,2 \text{ N} \quad (57)$$

$$P_y = 0,3 \times P_z = 67,2 \text{ N} \quad (58)$$

Estas forças estão aplicadas nos pontos F e D do elemento 1 representados no DCL na figura 34:

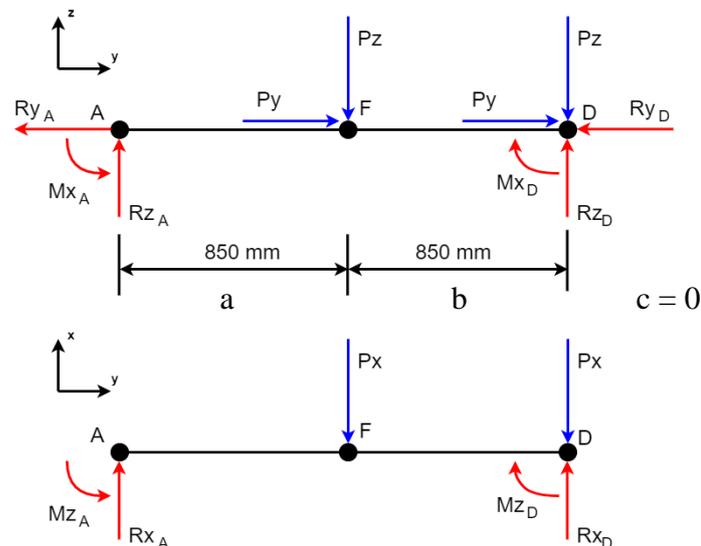


Fig. 34: DCL do elemento 1 durante o carregamento 2

Resolvendo as equações 18 a 27 aplicando os valores das forças do carregamento 2 obtidas anteriormente e as distâncias entre cada ponto apresentadas na figura 34, obtêm-se os resultados das forças de reação nos pontos A e D:

Tabela 7: Reações no elemento 1 durante o carregamento 2

	Mx (Nm)	Vz (N)	Ny (N)	Mz (Nm)	Vx (N)
Ponto A	47,6	111,9	-33,6	14,3	33,6
Ponto D	-47,6	335,8	-100,7	-14,3	100,7

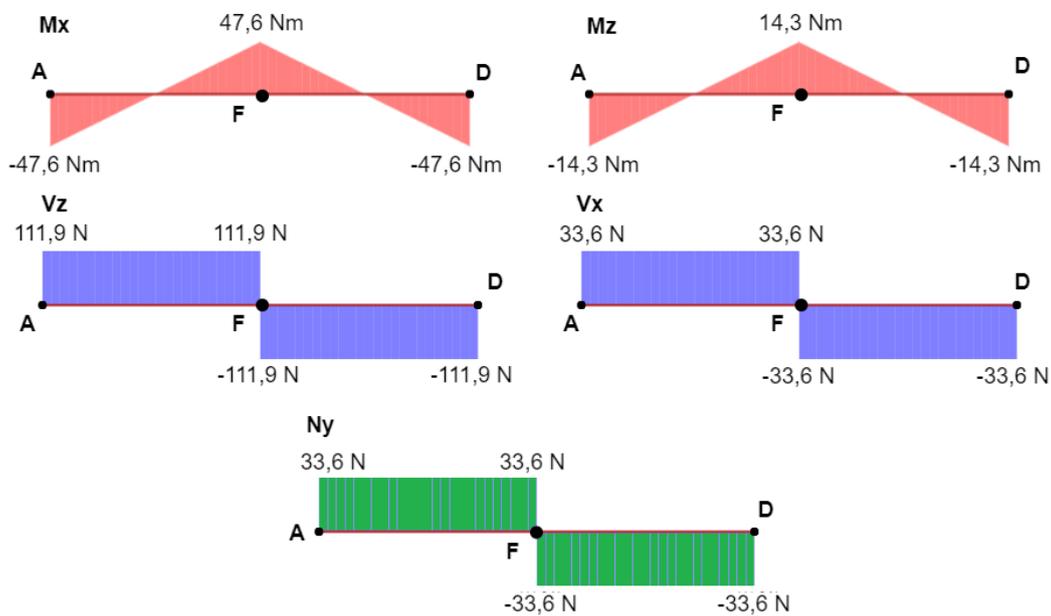


Fig. 35: Diagrama de esforços do elemento 1 durante o carregamento 2

A diferença de esforços entre os pontos A e D não estão representados no diagrama de esforços (figura 35) devido ao facto da força aplicada no ponto D ser anulada no mesmo ponto devido à reação deste. Apesar disto, os valores presentes na tabela 7, obtidos através das equações de equilíbrio estático de uma viga bi-encastrada serão considerados para o cálculo das tensões resultantes no ponto D, sendo este o ponto de carga máxima. Proceder-se agora com o cálculo destas tensões recorrendo às equações 28 a 33:

- Tensão resultante da força axial segundo o eixo y:

$$\sigma_{NyD} = -0,63 \text{ MPa}$$
- Tensões resultantes dos momentos de flexão segundo os eixos x e z:

$$\sigma_{MxD} = -35,67 \text{ MPa} ; \sigma_{MzD} = -10,7 \text{ MPa}$$

- Tensões resultantes das forças de corte segundo os eixos x e z:

$$\tau_{VxD} = 1,42 \text{ MPa} ; \tau_{VzD} = 4,74 \text{ MPa}$$

- Tensão de von Mises:

$$\sigma_{VMD} = 47,78 \text{ MPa}$$

- Verificação da segurança:

$$n_1 = \frac{S_Y}{\sigma_{VMD}} = 4,92 > n_{seg} \quad (59)$$

A análise do elemento 2 para o carregamento 2, é realizada com o mesmo procedimento usado no carregamento anterior, sendo os diagramas de esforços e de corpo livre idênticos só alterando os valores absolutos das reações e tensões, sendo assim, estes não serão apresentados. Procede-se com o cálculo das reações no ponto E, recorrendo às equações 36 a 41:

$$N_{zE} = -335,79 \text{ N}$$

$$V_{xE} = -100,74 \text{ N}$$

$$V_{yE} = -100,74 \text{ N}$$

$$T_{zE} = 14,27 \text{ N}$$

$$M_{yE} = 26,19 \text{ Nm}$$

$$M_{xE} = 73,76 \text{ Nm}$$

Voltando a utilizar as equações 42 a 47, obtêm-se as tensões resultantes dos esforços anteriores:

- Tensão resultante da força axial segundo o eixo z:

$$\sigma_{NzE} = -2,11 \text{ MPa}$$

- Tensões resultantes dos momentos de flexão segundo os eixos x e y:

$$\sigma_{MyE} = 19,64 \text{ MPa} ; \sigma_{MxE} = 55,31 \text{ MPa}$$

- Tensões resultantes das forças de corte segundo os eixos x e y:

$$\tau_{VxE} = -1,42 \text{ MPa} ; \tau_{VyE} = -1,42 \text{ MPa}$$

- Tensão resultante do momento de torção segundo o eixo z:

$$\tau_{TzE} = 6,41 \text{ MPa}$$

- Tensão de von Mises:

$$\sigma_{VME} = 77,94 \text{ MPa}$$

- Verificação da segurança:

$$n_2 = \frac{S_Y}{\sigma_{VME}} = 3,02 > n_{seg} \quad (60)$$

- Segurança para a carga crítica de flambagem:

$$n_{f2} = \frac{P_{cr2}}{N_{zE}} = 477 \gg n_{seg} \quad (61)$$

O elemento 3 tem o comportamento de uma barra, na qual os esforços axiais são nulos devido a que todas as forças axiais aplicadas, apresentam o mesmo sentido (figura 36).



Fig. 36: DCL do elemento 3 para os dois carregamentos

4.3.3. Ligações soldadas

Todos os elementos da estrutura de suporte estão conectados entre si por ligações soldadas de topo retas de penetração total. Este tipo de ligação é normalmente realizado recorrendo a entalhes na zona de ligação para facilitar a penetração da soldadura, contudo os elementos da estrutura possuem uma espessura de parede de 1,5 mm, dimensão muito pequena pelo que não haverá dificuldade na penetração da solda na totalidade desta espessura.

A resistência de uma soldadura de topo com penetração total deve ser considerada igual à resistência da parte mais fraca das peças unidas [24], que neste caso, corresponde ao perfil de tubo quadrado dos elementos. A figura 37 apresenta as ligações soldadas da estrutura de suporte.

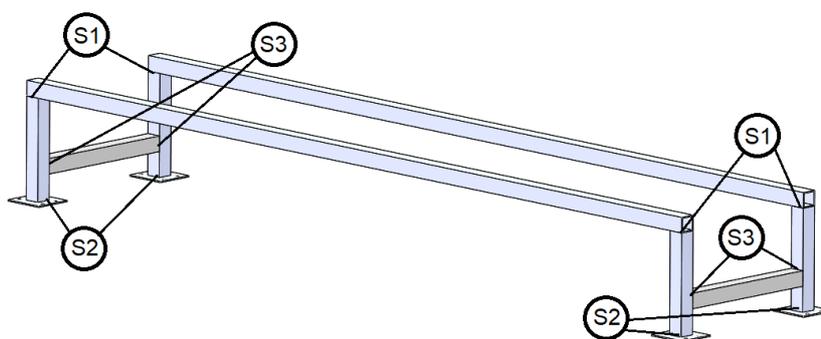


Fig. 37: Ligações soldadas da estrutura de suporte

Para a ligação S1, foram ponderadas duas configurações diferentes, a primeira tem a sua secção alinhada com o elemento 1 (figura 38 a), enquanto que a segunda está alinhada com a secção do elemento 2 (figura 38 b). No primeiro caso, os esforços aplicados na ligação são os mesmos aplicados no ponto D (calculado na secção anterior), e por consequência também terá as mesmas tensões resultantes. No segundo caso, devido à orientação da secção desta ligação relativamente à secção do elemento 1, N_{yD} passa a comportar-se como uma força de corte, M_{zD} aplica um momento torsor, e V_{zD} trata-se de um esforço axial.

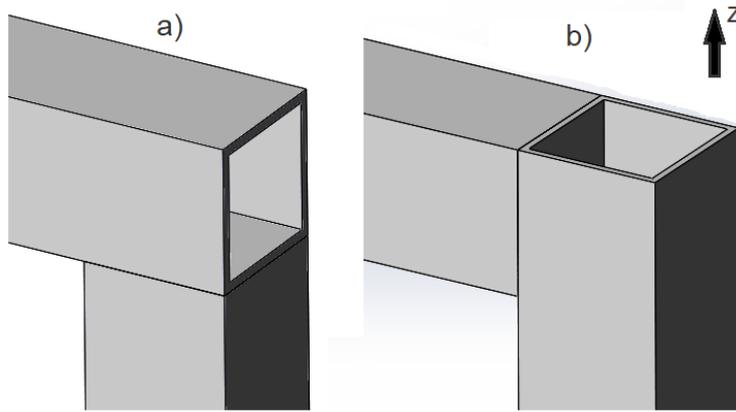


Fig. 38: Duas configurações para a ligação soldada S1

As tensões resultantes destes esforços nesta configuração da ligação soldada S1 durante o carregamento 1, são dadas por:

$$\sigma_{VzD} = \frac{V_{zD}}{A} = 0,77 \text{ MPa} \quad (62)$$

$$\tau_{NyD} = \frac{N_{yD} \times Q}{I \times 2t} = -0,87 \text{ MPa} \quad (63)$$

$$\tau_{MzD} = \frac{M_{zD}}{2 \times t \times A_m} = -14,04 \text{ MPa} \quad (64)$$

Tensão de von Mises resultante:

$$\sigma_{VM1} = \sqrt{(\sigma_{MxD} + \sigma_{VzD})^2 + 3 \times (\tau_{MzD}^2 + \tau_{NyD}^2 + \tau_{VxD}^2)} = 38,78 \text{ MPa} \quad (65)$$

O procedimento anterior é aplicado ao segundo carregamento, obtendo-se:

$$\sigma_{VzD} = 2,11 \text{ MPa}$$

$$\tau_{NyD} = -1,42 \text{ MPa}$$

$$\tau_{MzD} = -6,41 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{VM2} = 39,53 \text{ MPa}$$

Tabela 8: Comparação de tensões entre as duas configurações

	σ_{VM1}	σ_{VM2}
Configuração a)	38,78 MPa	39,53 MPa
Configuração b)	53,28 MPa	47,78 MPa

Conclui-se através da tabela 8, que a configuração a) resulta em uma tensão de von Mises mais baixa, sendo esta a configuração escolhida.

Segundo o código AISC, a tensão na ligação soldada não deve exceder mais de 40% da tensão de cedência mais fraca dos materiais da ligação. Esta segurança é verificada a seguir:

$$\sigma_{M\acute{a}x} = 0,4 \times S_Y = 94 \text{ MPa} \quad (66)$$

Comparando a tensão máxima da configuração a), verifica-se esta condição:

$$39,53 \text{ MPa} < \sigma_{M\acute{a}x} = 94 \text{ MPa}$$

Os esforços aplicados na ligação S2, correspondem aos que foram calculados para o ponto E na secção anterior. Sendo estes esforços máximos no carregamento 2, verifica-se a segurança desta ligação:

$$73,76 \text{ MPa} < \sigma_{M\acute{a}x} = 94 \text{ MPa}$$

4.3.4. Ligação aparafusada

A estrutura de suporte da tela transportadora que realiza a extração do VDE processado no TO com entrada para a traseira da UMP durante a segunda passagem, encontra-se ligada aos carris do sistema de guiamento linear através de uma ligação aparafusada (figura 39).

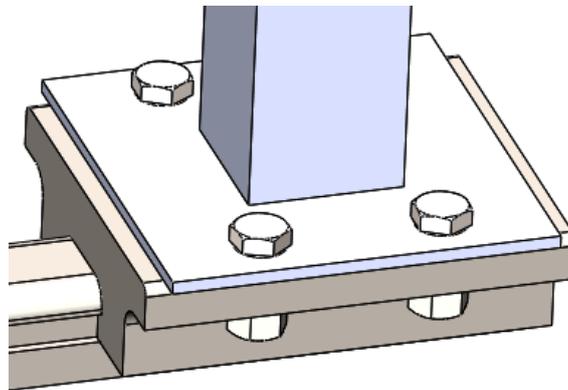


Fig. 39: Ligação aparafusada com o sistema de guiamento linear

Esta ligação é constituída por 4 parafusos M6 da classe de resistência 4.6 com 8 anilhas M6 e 4 porcas M6 (anexo A.3), possuindo as seguintes características:

- Passo da rosca: $p = 1$;
- Diâmetro do parafuso: $d = 6 \text{ mm}$;
- Comprimento do parafuso: $L = 20 \text{ mm}$;
- Comprimento da rosca do parafuso: $L_T = 20 \text{ mm}$;
- Área da raiz do parafuso: $A_r = 17,9 \text{ mm}^2$;
- Área de tensão do parafuso: $A_t = 20,1 \text{ mm}^2$;
- Espessura da anilha: $t_w = 1,6 \text{ mm}$;
- Altura da porca: $t_n = 5 \text{ mm}$;
- Espessura da chapa base da estrutura de suporte: $t_1 = 2,5 \text{ mm}$;
- Espessuras da zona de ligação do carril (cone de pressão de 30°): $t_2 = 5,75 \text{ mm}$;
 $t_3 = 3,25 \text{ mm}$;

Para além destes parâmetros geométricos, existem outros que têm de ser calculados com o intuito de verificar a segurança desta ligação. Procede-se então com o cálculo destes, que são dados pelas seguintes equações:

- Comprimento da ligação:

$$l = t_1 + t_2 + 2 \times t_w = 14,7 \text{ mm} \quad (67)$$

- Comprimento da ligação sem rosca:

$$l_d = L - L_T = 0 \text{ mm} \quad (68)$$

- Comprimento da ligação com rosca:

$$l_t = l - l_d = 14,7 \text{ mm} \quad (69)$$

- Área de topo do parafuso:

$$A_d = \frac{\pi d^2}{4} = 128,3 \text{ mm}^2 \quad (70)$$

- Diâmetro de raiz do parafuso:

$$d_r = \sqrt{\frac{4 \times A_r}{\pi}} = 4,8 \text{ mm} \quad (71)$$

Com os parâmetros geométricos todos calculados, procede-se com o cálculo dos parâmetros de rigidez da ligação:

- Rigidez dos parafusos:

$$K_b = \frac{A_d \times A_t \times E_b}{A_d \times l_t + A_t \times l_d} = 0,29 \text{ GN/m} \quad (72)$$

- Rigidez de cada membro a ser ligado, para um ângulo de 30° do cone de pressão:

$$K_i = \frac{0,5774 \times \pi \times E_i \times d}{\ln \frac{(1,155 \times l_i + D - d)(D + d)}{(1,155 \times l_i + D + d)(D - d)}} \quad (73)$$

$$K_1 = 4,59 \text{ GN/m} \quad K_2 = 2,85 \text{ GN/m} \quad K_3 = 7,55 \text{ GN/m}$$

- Rigidez composta dos membros da ligação:

$$K_m = \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} \right)^{-1} = 1,43 \text{ GN/m} \quad (74)$$

- Constante elástica da ligação:

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} = 0,21 \quad (75)$$

Para o cálculo da pré-carga da ligação, considera-se que esta trata-se de uma ligação amovível para facilitar operações de manutenção. A pré-carga é dada por:

$$F_i = 0,75 \times S_p \times A_t = 3391,88 \text{ N} \quad (76)$$

Com: $S_p = 225 \text{ MPa}$

Os esforços que atuam nesta ligação, correspondem às reações para os carregamentos 1 e 2 calculadas na secção 4.3.2. Na figura 40 estão representados os esforços aplicados na chapa base da estrutura de suporte.

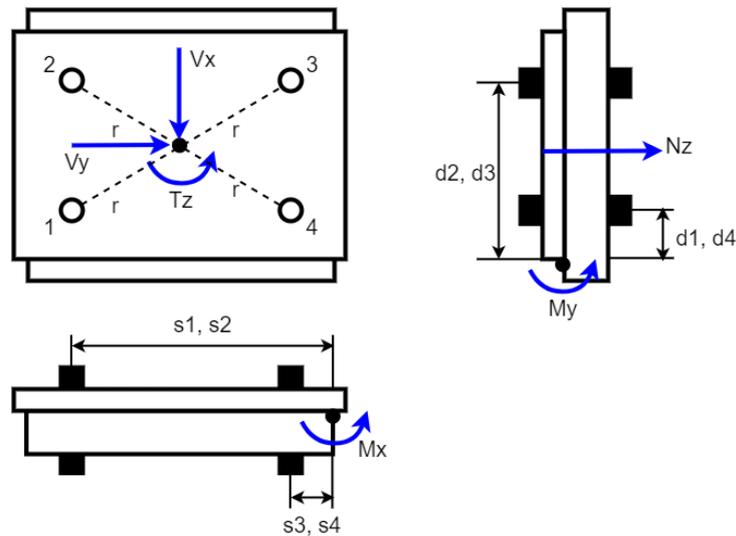


Fig. 40: Esquema dos esforços aplicados na ligação aparafusada

As dimensões representadas na figura 40 são:

$$d_1 = d_4 = 20 \text{ mm} \quad d_2 = d_3 = 55 \text{ mm}$$

$$s_1 = s_2 = 66,5 \text{ mm} \quad s_3 = s_4 = 6,5 \text{ mm}$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{s_1 - s_3}{2}\right)^2} = 34,7 \text{ mm} \quad (77)$$

Procede-se agora ao cálculo dos esforços aplicados pelo carregamento 1 tendo em consideração que os parafusos estão sujeitos a esforços indiretos resultantes dos momentos fletores e torsões.

- Esforços diretos:

$$F'_1 = \frac{N_z}{4} = -30,66 \text{ N} \quad (78)$$

$$F'_2 = \frac{V_x}{4} = 24,53 \text{ N} \quad (79)$$

$$F'_3 = \frac{V_y}{4} = -61,31 \text{ N} \quad (80)$$

- Esforços indiretos:

$$\sum d_i^2 = 2 \times d_1^2 + 2 \times d_2^2 = 6,85 \times 10^{-3} \text{ mm}^2 \quad (81)$$

$$\sum s_i^2 = 2 \times s_1^2 + 2 \times s_3^2 = 8,93 \times 10^{-3} \text{ mm}^2 \quad (82)$$

$$\sum r_i^2 = 4 \times r^2 = 4,83 \times 10^{-3} \text{ mm}^2 \quad (83)$$

$$F''_1 = \frac{M_y \times d_{max}}{\sum d_i^2} = 204,79 \text{ N} \quad (84)$$

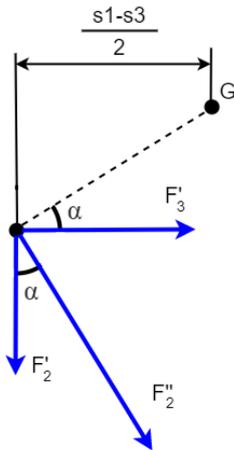
Com: $d_{max} = d_2 = 55 \text{ mm}$

$$F''_2 = \frac{T_z \times r}{\sum r_i^2} = 225,08 \text{ N} \quad (85)$$

$$F''_3 = \frac{M_x \times s_{max}}{\sum s_i^2} = 409,83 \text{ N} \quad (86)$$

Com: $s_{max} = s_2 = 66,5 \text{ mm}$

Procede-se agora com o cálculo da força resultante de corte (P_S), e da força resultante normal ao plano da ligação (P), recorrendo à figura 41:



$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{(s_1 - s_3)/2}{r} \right) = 30,26^\circ \quad (87)$$

$$P = F'_1 + F''_1 + F''_3 = 583,97 \text{ N} \quad (88)$$

$$P_S = \sqrt{(F'_2 + F''_2 \times \cos \alpha)^2 + (F'_3 + F''_2 \times \sin \alpha)^2} = 256,23 \text{ N} \quad (89)$$

Fig. 41: Forças aplicadas num dos parafusos

Após o cálculo das forças aplicadas em cada parafuso, segue-se a verificação da ligação quanto às suas seguranças:

- Segurança à cedência:

$$n_c = \frac{S_p \times A_t}{C \times P + F_i} = 1,29 \quad (90)$$

- Segurança á estática:

$$n_l = \frac{S_p \times A_t - F_i}{C \times P} = 9,43 \quad (91)$$

- Segurança de escorregamento:

$$n_s = \frac{F_i - (1-C) \times P}{\frac{P_s}{f_m}} = 5,71 \quad (92)$$

Com: $f_m = 0,5$ (coeficiente de atrito estático entre duas superfícies em aço)

- Segurança de separação da ligação:

$$n_o = \frac{F_i}{P \times (1-C)} = 7,31 \quad (93)$$

A segurança também foi verificada para o carregamento 2, usando o mesmo procedimento usada para o carregamento 1, pelo que será apenas apresentado os resultados finais dos esforços e valores de segurança:

- Esforços diretos:

$$F'_1 = -83,95 \text{ N} \quad F'_2 = 25,18 \text{ N} \quad F'_3 = -100,74 \text{ N}$$

- Esforços indiretos:

$$F''_1 = 210,3 \text{ N} \quad F''_2 = 102,72 \text{ N} \quad F''_3 = 549,35 \text{ N}$$

- Força resultante de corte (P_s), e força resultante normal (P):

$$P = 675,7 \text{ N} \quad P_s = 127,92 \text{ N}$$

- Verificação das seguranças:

$$n_c = 1,28 \quad n_l = 8,15 \quad n_s = 11,16 \quad n_o = 6,32$$

4.4. Sistemas de guiamento linear

Os sistemas de guiamento linear foram selecionados do catálogo disponível online da empresa HepcoMotion [25].

Para os sistemas de guiamento lineares que realizam a translação das telas transportadoras entre as posições de transporte rodoviário e de processamento, escolheu-se o modelo HLGS15CF, que tem capacidade de suportar por carril, 6,5 KN e 9,3 KN de carga

dinâmica e estática correspondentemente, o que é muito superior à carga aplicada durante o carregamento 2 calculado na secção 4.3.2. ($P_z = 223,2 N$).

A HepcoMotion também disponibiliza carris para cargas mais leves (Compact Miniature Series), mas estes têm dimensões de ligação incompatíveis com as dimensões de perfil do elemento 2 (tubo quadrado 28x28 mm).

Para a seleção do sistema de guiamento linear que efetua o movimento transversal da tela transportadora de extração do produto final do TO com entrada para a traseira da UMP durante a segunda passagem de processamento, além da carga a suportar terá de se ter em consideração as reações máximas de flexão e torção resultantes dos dois carregamentos estudados na secção 4.3.2, pois os carris possuem limites para este tipo de esforços, representados por M , M_v e M_s . Verifica-se que o modelo HLGS20CF, tem a capacidade de suportar estes binários, como se apresenta a seguir:

$$T_z \text{ máx} = 31,3 Nm < M_v = 59 Nm$$

$$M_y \text{ máx} = 26,2 Nm < M = 59 Nm$$

$$M_x \text{ máx} = 73,8 Nm < M_v = 128 Nm$$

O peso total que estes carris suportam, tal como os carris anteriores, é muito reduzido, sendo que a carga adicional da estrutura de suporte apenas acrescenta 6 kg, não constituindo uma diferença significativa.

4.5. Telas transportadoras

As telas transportadoras de perfil em z são do modelo KFG-P 2000 AS da MK Technology Group [19]. Na figura 42 está esquematizado este equipamento, com comprimentos $L_1=2200$ mm, $L_2 =2400$ mm e $L_3=400$ mm, largura $B=600$ mm o que implica uma largura útil de 590 mm, e um ângulo de inclinação $\alpha = 60^\circ$.

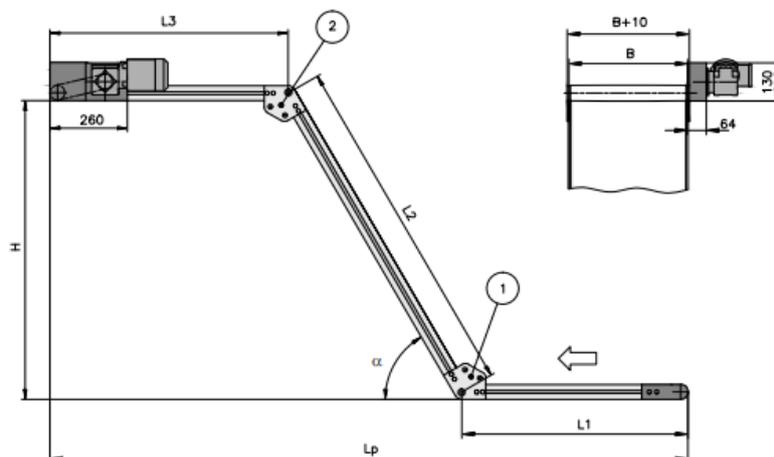


Fig. 42:Esquema da KFG-P 2000 AS [19]

Este modelo de tela transportadora tem uma carga máxima distribuída de 25 Kg/m. Para verificar esta condição, assume-se o caso em que todas as partículas sobre a tela possuem a dimensão máxima observada por Dias [2], de 22 mm e aplica-se a densidade média dos TMBR de 1400 Kg/m³:

$$P = \rho \times l \times h = 1400 \times 0,59 \times 0,022 = 18,17 \text{ Kg/m} < P_{adm} = 25 \text{ Kg/m} \quad (94)$$

Duas destas telas realizam a alimentação de um dos TO durante a primeira passagem de TMBR e EI, pelo que a velocidade de transporte de cada uma das telas deve estar coordenada com metade da capacidade de processamento do TO de 8 t/h. No entanto, esta velocidade depende da dimensão média das partículas constituintes do TMBR ou EI da respetiva SGRU, sendo assim pode ser calculada uma estimativa para esta velocidade recorrendo aos valores presentes na tabela 2.

Assumindo que a dimensão máxima das partículas é de 22 mm, e assumindo que as frações entre 5,6 e 16 mm, e entre 16 e 22 mm, possuem uma distribuição uniforme das dimensões das partículas constituintes, a estimativa da velocidade da tela para cada SGRU é dada pelas seguintes equações:

- Dimensão média das partículas da SGRU:

$$d_m = \frac{d_1 \times f_1 + d_2 \times f_2}{f_t} \quad (95)$$

Com: $d_1 = 10,8 \text{ mm}$ (dimensão média da fração entre 5,6 e 16 mm)

$d_2 = 19 \text{ mm}$ (dimensão média da fração entre 16 e 22 mm)

f_1 toneladas da fração entre 5,6 e 16 mm presentes na SGRU

f_2 toneladas da fração entre 16 e 22 mm presentes na SGRU

f_t toneladas da fração superior a 5,6 mm presente na SGRU

- Velocidade de transporte da tela transportadora de perfil em z:

$$V_t = \frac{\dot{Q}}{2 \times l \times d_m} \quad (96)$$

Com: $\dot{Q} = 1,78 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (capacidade de processamento do TO para VDE)

$l = 0,59 \text{ m}$ (largura da tela transportadora)

Utilizando estas equações com os valores da tabela 2, e tendo em consideração a velocidade máxima de transporte de 0,25 m/s da tela, obtêm-se a estimativa da velocidade:

Tabela 9: Estimativa das dimensões médias das partículas e velocidade das telas z para cada SGRU

	d_m (mm)	V_t (m/s)
Tratolixo	10,8	0,139
Amarsul	16,21 a)	0,093
	10,91 b)	0,138
	17,29 c)	0,087
	14,57 d)	0,103
	10,96 e)	0,137
Ersuc	13,33 f)	0,113
	10,85 g)	0,139
	13,08 h)	0,115
	10,95 i)	0,138
Resitejo	10,8	0,139
Valorlis	15,58 j)	0,097
	13,42 k)	0,112
Valnor	10,8	0,139
Braval	11,37	0,133
Valorsul	12,02	0,125

As telas transportadoras que realizam a extração dos produtos dos TO são do modelo GUF-P 2000 AS, com 1900 mm de comprimento, 400 mm de largura e 390 mm de largura útil (figura 43). Este modelo de tela transportadora tem a mesma carga máxima distribuída que as telas anteriores, 25 Kg/m. Procedeu-se de seguida á verificação deste limite, usando a densidade do VDE de 2500 Kg/m³:

$$P = 2500 \times 0,39 \times 0,022 = 21,45 \text{ Kg/m} < P_{adm} = 25 \text{ Kg/m} \quad (97)$$

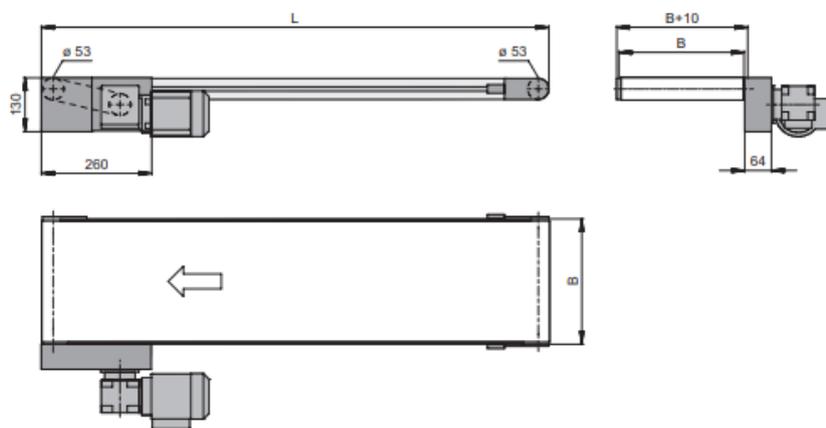


Fig. 43: Esquema da GUF-P 2000 AS [19]

Estas telas transportadoras, ao contrário das anteriores, não realizam a alimentação de nenhum equipamento da UMP, pelo que a não será de tal maneira necessariamente importante ter o cuidado de regular a velocidade destas pelas diversas SGRU. No entanto, procedeu-se ao cálculo destas para evitar o uso de velocidades demasiado elevadas para o que é necessário, e velocidades demasiado baixas o que pode resultar na acumulação de material na tela.

Segundo Dias [2], em média 10% do caudal processado no TO é rejeitado como contaminante (principalmente durante a primeira triagem), pelo que as velocidades indicadas para as telas de extração dos contaminantes e concentrado de vidro são respetivamente:

$$V_{tc} = \frac{\dot{Q}}{l \times d_m} \times 0,1 \quad (98)$$

$$V_{tv} = \frac{\dot{Q}}{l \times d_m} \times 0,9 \quad (99)$$

Com: $l = 0,039 \text{ m}$

Tendo em consideração a velocidade máxima de transporte de 1,3 m/s desta tela, os resultados obtidos para as diversas SGRU estão presentes na tabela 10:

Tabela 10: Estimativa de velocidades das telas de extração para cada SGRU

	V_{tc} (m/s)	V_{tv} (m/s)
Tratolixo	0,028	0,251
Amarsul	0,019 a)	0,167
	0,028 b)	0,249
	0,017 c)	0,157
	0,021 d)	0,186
	0,027 e)	0,247
Ersuc	0,023 f)	0,203
	0,028 g)	0,250
	0,023 h)	0,207
	0,028 i)	0,248
Resitejo	0,028	0,251
Valorlis	0,019 j)	0,174
	0,022 k)	0,202
Valnor	0,028	0,251
Braval	0,027	0,239
Valorsul	0,025	0,226

5. Protótipo da UMP

A transmissão de ideias é bastante mais compreensível por intermédio físico do que em virtual, assim sendo, determinou-se importante a produção de um modelo físico em escala reduzida para facilitar a comunicação do funcionamento básico da nova UMP.

Para a realização deste modelo foi escolhida a tecnologia de impressão 3D Fabrico com filamentos fundidos (FFF), tecnologia estabelecida comercialmente e amplamente utilizada em prototipagem rápida.

5.1. Escala do protótipo

A escala adotada foi selecionada de entre as escalas recomendadas segundo a norma técnica NBR 8196/1983 (tabela 11).

Tabela 11: Escalas recomendadas segundo a norma NBR 8196/1983 [26]

CATEGORIA	ESCALAS RECOMENDADAS		
Escala de ampliação	20 : 1	50 : 1	10 : 1
	2 : 1	5 : 1	
Escala natural	1 : 1		
Escala de redução	1 : 2	1 : 5	1 : 10
	1 : 20	1 : 50	1 : 100
	1 : 200	1 : 500	1 : 1 000
	1 : 2 000	1 : 5 000	1 : 10 000

Atendendo que as dimensões exteriores do contentor da Cleveland Containers são, 12192 mm de comprimento, 2438 mm de largura e 2896 mm de altura, compara-se de seguida a dimensão do modelo do contentor nas escalas 1:10, 1:20 e 1:50.

Tabela 12: Dimensão do modelo para as escalas selecionadas

Escala	Dimensões do modelo		
	Comprimento mm	Largura mm	Altura mm
1:10	1219	244	290
1:20	610	122	145
1:50	244	49	58

É de prever que certos componentes no interior da UMP apresentem perfis demasiado pequenos para que possam ser produzidos com precisão e segurança estrutural (para o manuseamento com segurança), pois a tecnologia FFF tem limites no que toca á dimensão mínima das peças, pelo que certos detalhes dos componentes no modelo CAD terão de ser adaptados, aumentando ligeiramente as suas dimensões.

Tendo o anterior em consideração, e com as dimensões presentes na tabela anterior, conclui-se imediatamente que a escala 1:50 é excessivamente pequena. Os componentes da UMP nesta escala têm dimensões demasiado pequenas o que dificulta a sua visualização. Os elementos estruturais finos terão de possuir dimensões muito mais elevadas do que na realidade para garantir a sua impressão correta.

Por outro lado, a escala 1:10 é excessivamente grande, não só seria necessária uma grande quantidade de material de impressão para a produzir, como o tempo de impressão seria de tal forma elevado que certos componentes demorariam vários dias até serem concluídos. Também existem limitações no que diz respeito ao volume de construção máximo disponível nas máquinas de impressão presentes no Laboratório para Desenvolvimento do Produto (Lab2ProD) no IST, sendo que o volume máximo disponível é de 330 x 240 x 300 mm da impressora Ultimaker S5, o que aponta para a necessidade de imprimir o contentor e até certos equipamentos como a tela de perfil em z em vários segmentos, o que dificulta a integração destes entre si. É de notar que nem nesta escala se consegue evitar o aumento de dimensões de certos elementos da UMP de forma a garantir a sua impressão correta, como são exemplo, as vigas que constituem o suporte dos triadores óticos que possuem 6 mm de espessura, o que se traduz em 0,6 mm para esta escala.

Foi selecionada a escala 1:20 para a produção do protótipo da UMP, esta apresenta dimensões aceitáveis para uma boa representação dos diversos equipamentos constituintes. As dimensões do contentor continuam a exceder a dimensão máxima do volume de construção disponível (330 mm), pelo que o contentor terá de ser imprimido em pelo menos duas partes.

5.2. Ultimaker S5

Para a impressão da UMP foi selecionada a impressora Ultimaker S5, que possui as seguintes características de maior relevância [27]:

- Extrusão dupla para a impressão do material base juntamente com o material de suporte;
- Volume de construção de 330 x 240 x 300 mm;
- Núcleos de impressão alteráveis para adaptação a diferentes materiais de impressão;
- Resolução de camada mínima de 60 μm ;

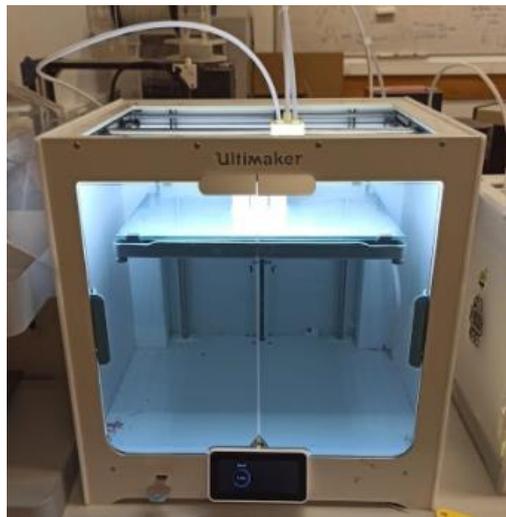


Fig. 44: Ultimaker S5 do Lab2ProD

Para realizar a transição do modelo CAD para o código G (linguagem de programação usada para controlar a impressão), usou-se o Software Ultimaker Cura 4.4, esta aplicação aceita ficheiros do tipo STL, que serve como intermédio para a comunicação entre os softwares de CAD e máquinas de fabrico aditivo numa linguagem comum entre estes.

5.3. Material de impressão

O material base selecionado para a impressão foi o termoplástico biodegradável PLA, este é pouco dúctil pelo que é necessário especial cuidado com incompatibilidades geométricas nas conexões entre componentes. Por outro lado, dispõe de uma temperatura de impressão relativamente baixa o que reduz as tensões resultantes do arrefecimento da peça que podem induzir deformações na superfície (warping), o que faz com que este material seja amplamente usado em modelos onde o acabamento superficial é um fator importante [28].

Como as peças impressas são produzidas camada sobre camada, é necessária uma camada anterior para a deposição da próxima. A impressão FFF permite ângulos de saliência

até aos 45° de inclinação, aproximadamente, mas para saliências maiores ou até mesmo retas, será necessário utilizar um material de suporte que é removido da peça final.

Para material de suporte, é frequentemente usado o material base da peça final ou um material mais frágil que este, realizando-se a remoção deste suporte manualmente. Esta opção não é a indicada para o tipo de peças que se pretende imprimir, pois estas peças possuem muitos cantos de difícil acesso, dificultando a remoção de material manualmente. Por esta razão foi escolhido o PVA como material de suporte, sendo este compatível com PLA e solúvel em água, facilitando a sua remoção da peça. A figura 45 ilustra o processo de remoção do PVA de uma peça. O período necessário para dissolver totalmente o PVA depende da quantidade de material usado, mas geralmente, cinco horas é suficiente para este efeito.



Fig. 45: Remoção do PVA de uma peça através da submersão em água [29]

5.4. Considerações de impressão

Existem limitações inerentes ao processo de FFF, pelo que se procedeu ao estudo e reconhecimento destas de forma a adaptar o CAD para a impressão e evitar erros durante o processo.

O aumento da altura de camada influencia a velocidade de impressão, necessitando de menos camadas para terminar a peça, também influencia as suas propriedades mecânicas, pois na interface entre cada camada existe uma concentração de tensões que resulta do arrefecimento do material depositado. Como as peças serão submersas em água, de forma a remover o PVA de suporte, também é importante ter em consideração a influência da altura de camada na absorção de água pelo PLA, que ocorre através da difusão de água nas falhas microscópicas entre as fibras poliméricas. Peças com alturas de camada de aproximadamente 0,2 mm têm boas propriedades mecânicas e uma baixa absorção de água [30].

As superfícies da peça com ângulos de inclinação entre os 0° e 90° sofrem do efeito de escada, que resulta da forma como as camadas são depositadas para formar superfícies inclinadas. Quanto maior for a altura da camada, maior será a rugosidade devido a este efeito (figura 46) [31].

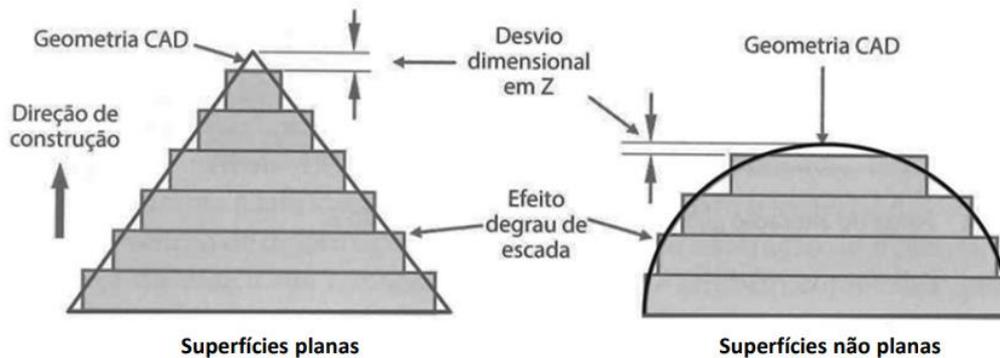


Fig. 46: Efeito de escada em superfícies oblíquas e curvas [32]

Para as impressões dos componentes da UMP foi utilizado uma altura de camada de 0,2 mm, permitindo uma boa velocidade de impressão com boas propriedades mecânicas. A rugosidade nas superfícies inclinadas não é um fator de principal importância, após a impressão estas superfícies serão lixadas, melhorando o seu aspeto visual.

Devido à orientação das camadas, as peças produzidas possuem propriedades inerentemente anisotrópicas, sendo muito mais resistentes em direções paralelas à superfície das camadas do que na direção perpendicular a esta (figura 47). Para componentes finos e longos é então mais apropriado orientar as camadas ao longo do comprimento da peça [33].

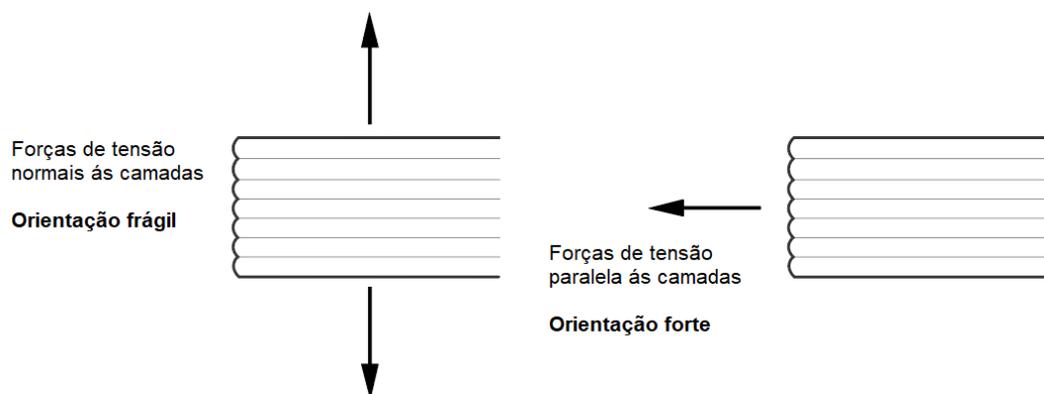


Fig. 47: Resistência das orientações [34]

No que toca a limitações geométricas desta tecnologia, é aconselhável que todos os perfis produzidos tenham no mínimo uma dimensão de 2 mm, perfis mais pequenos que este limite tendem a apresentar uma estrutura com arestas mal definidas e com baixa resistência mecânica. Para encaixes móveis, deve se deixar uma folga de 0,5 mm entre as peças. Estas limitações foram verificadas e concluídas com a produção de peças teste.

5.5. Preparação do CAD

Após o estudo das limitações da tecnologia de impressão FFF, conclui-se que não será possível utilizar o CAD da UMP diretamente para a produção das peças, visto que este apresenta componentes e detalhes com espessuras muito pequenas, que depois de ser aplicada a escala de redução 1:20, estas são reduzidas para dimensões demasiado pequenas que impossibilitam a sua impressão.

Devido a estas limitações, o CAD foi adaptado para tornar possível a sua impressão, aumentando certas dimensões e removendo alguns detalhes demasiado pequenos. O perfil das vigas que constituem a estrutura de suporte dos TO são um exemplo das modificações realizadas, estas vigas possuem uma espessura de 6 mm, aplicando a escala 1:20, a espessura passa a ser 0,3 mm, um perfil desta dimensão não será possível imprimir com alguma integridade física, modificando-se então para uma espessura de 2 mm (ver figura 48).

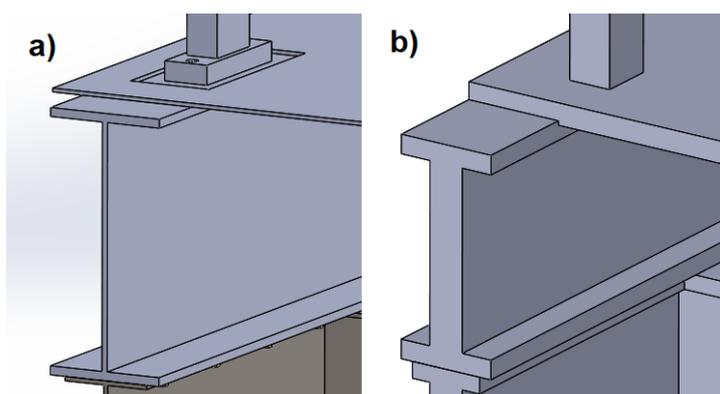


Fig. 48: O perfil da viga que apoia o TO: a) CAD original; b) CAD adaptado para impressão

Para facilitar a visualização dos equipamentos no interior da UMP, resolveu-se não incluir o teto e a parede lateral do contentor, mantendo-se as vigas que suportam o teto para servirem de referência para a comparação de dimensões dos equipamentos com as do contentor. A figura 49 apresenta o CAD original e a adaptação para impressão. Nota-se que alguns detalhes foram eliminados, particularmente dos alimentadores dos TO.

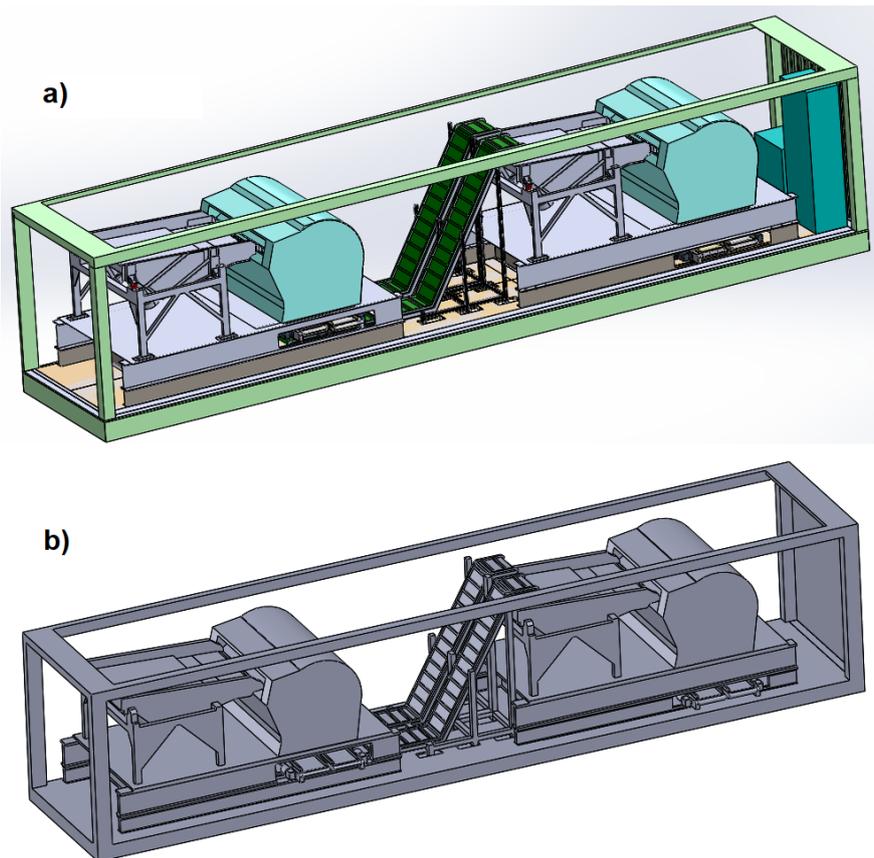


Fig. 49: Visualização dos dois CADs; a) CAD original; b) CAD adaptado

Com o CAD adaptado para impressão completo, procedeu-se á divisão do modelo por partes que serão impressas separadamente. Este processo tem como objetivo a redução de material de suporte necessário e respeitar os limites do volume de construção disponível. A dimensão máxima do volume de construção da Ultimaker S5 é de 330 mm, sendo que o contentor tem um comprimento de 610 mm, verifica-se então a necessidade de dividir o modelo do contentor em duas partes.

Além do contentor, também foram considerados outros componentes, a tela transportadora de perfil em z localiza-se entre as duas metades do contentor que serão separadas, pelo que decidiu-se imprimir este separadamente.

As telas de extração dos produtos triados também serão impressos á parte, pois pretende-se que estes sejam montados sobre um sistema de guiamento linear que permita o deslizamento destas. Para que as telas possam ser montadas na base do contentor, torna-se necessário imprimir o conjunto da estrutura de suporte do TO, permitindo que as telas sejam montadas por baixo deste.

Após uma análise das peças anteriores no software Ultimaker Cura 4.4, observou-se que as duas metades do contentor utilizam muito material de suporte para a construção das vigas

que suportam o teto (figura 50 a), resolveu-se então separar as vigas de cada metade para que sejam impressas separadamente, anulando a utilidade do material de suporte.

O conjunto estrutura de suporte mais alimentador vibratório e TO também utiliza muito material de suporte (figura 50 b), notou-se que separando estes componentes material de suporte era reduzido de forma significativa.

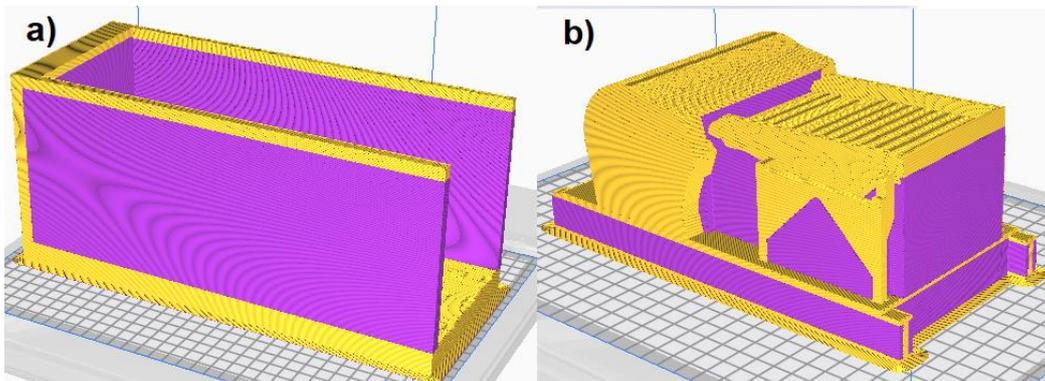


Fig. 50: Material de suporte utilizado em duas impressões não otimizadas (amarelo: material base; roxo: material de suporte).

Com as considerações anteriores, finaliza-se a separação do modelo CAD do protótipo, otimizado para reduzir o material de suporte necessário e por consequente o tempo de impressão total. A figura 51 ilustra todos os componentes que serão impressos como peças individuais.

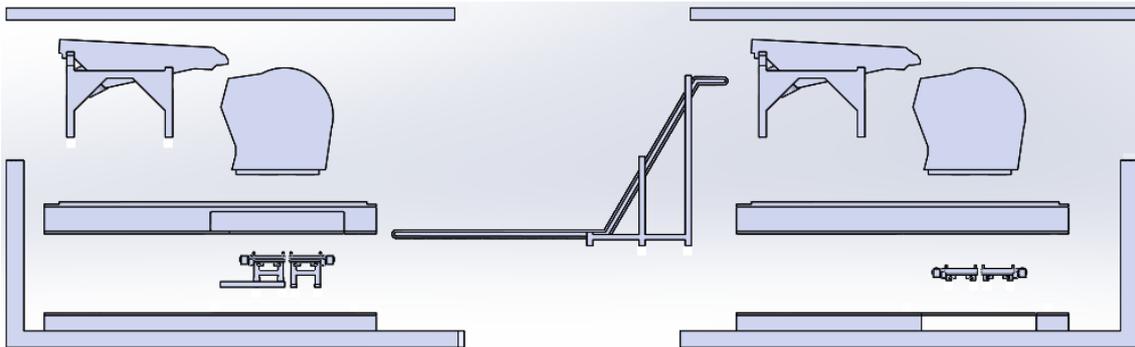


Fig. 51: Componentes separados para impressão individual

No sentido de assegurar que as peças se mantenham unidas após a sua impressão, procedeu-se ao desenvolvimento de diversas conexões e a verificação destas por intermédio de pequenas peças teste, de forma a evitar situações em que os encaixes entre as peças apresentem grandes incompatibilidades geométricas, conduzindo a desperdício de material e tempo de impressão. Todas as peças teste foram impressas com a mesma orientação de camadas que os encaixes nas peças do modelo da UMP, de forma a obter um resultado mais próximo da realidade.

A impressão FFF tem a capacidade de imprimir encaixes móveis ao serem aplicadas folgas de 0,5 mm entre as superfícies do encaixe, como neste caso pretende-se obter um encaixe justo para garantir a união das duas peças, experimentou-se um encaixe quadrado com uma folga de 0,25 mm, que verifica a condição anterior (figura 52).

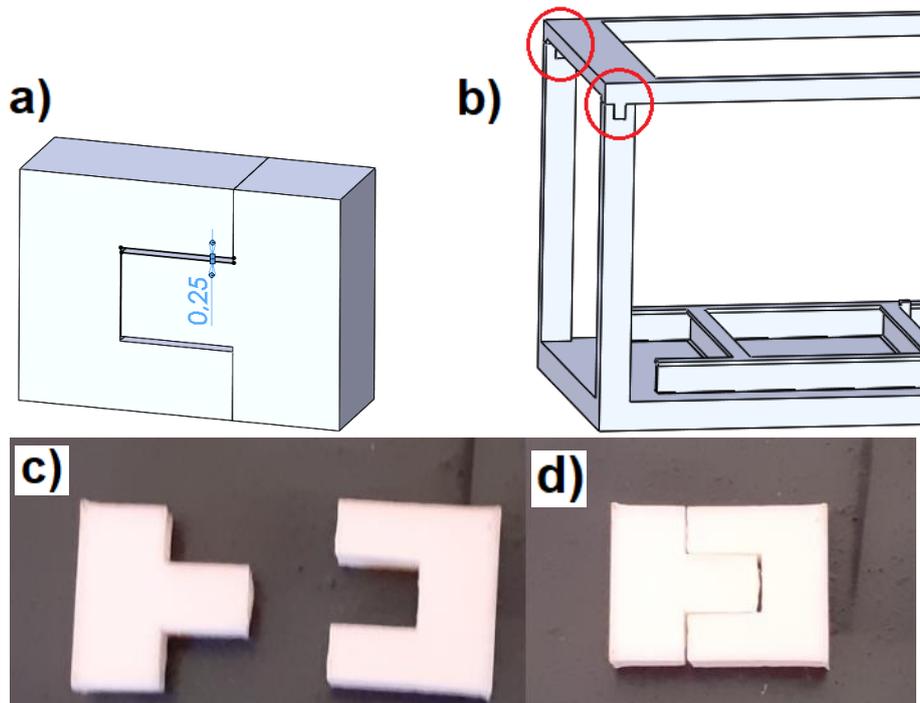


Fig. 52: Encaixe quadrado: a) CAD do encaixe teste (com uma folga de 0,25 mm); b) localização do encaixe no CAD da UMP; c) Encaixe após impressão; d) União do encaixe teste.

Para a conexão entre as peças de topo do contentor, utilizou-se um encaixe auto-centrante em triângulo por se tratar de peças longas e finas, sendo suscetíveis a pequenos desvios resultantes de uma velocidade de arrefecimento diferente entre a superfície encostada à plataforma de construção e as superfícies expostas ao ar. A interface deste encaixe é grande, permitindo uma boa aderência caso a aplicação de adesivo seja necessária. A figura 53 ilustra este encaixe.

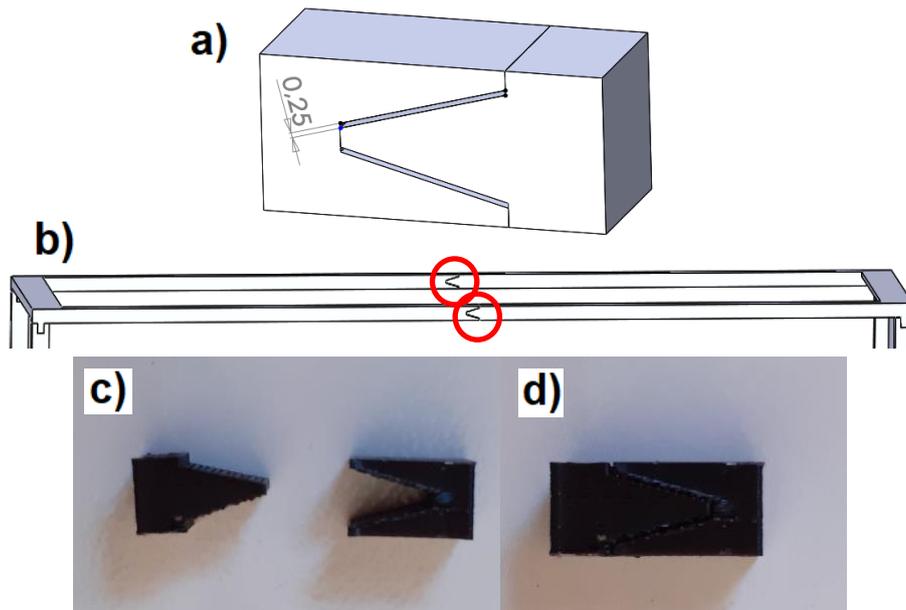


Fig. 53 Encaixe auto-centrante em triângulo: a) CAD do encaixe teste (com uma folga de 0,25 mm); b) localização do encaixe no CAD da UMP; c) Encaixe após impressão; d) União do encaixe teste.

O encaixe das bases deve impedir que estas se desloquem lateralmente ou se afastem, pelo que se utilizou um entalhe de espiga (figura 54). Devido ao perfil inclinado na interface de união, foram realizados três testes para encontrar uma folga que resulte num encaixe justo, atingindo uma folga de 0,4 mm.

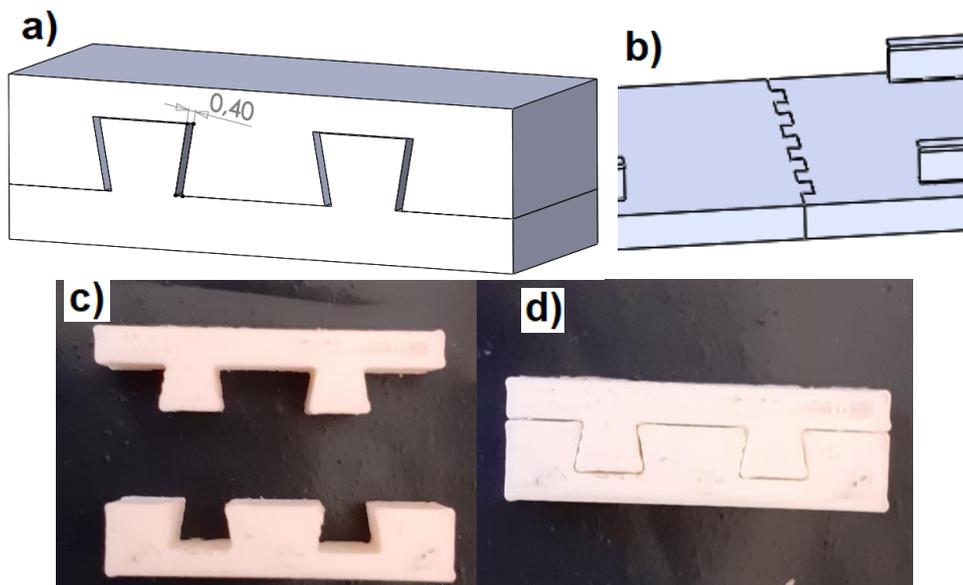


Fig. 54: Encaixe de espiga: a) CAD do encaixe teste (com uma folga de 0,4 mm); b) localização do encaixe no CAD da UMP; c) Encaixe após impressão; d) União do encaixe teste.

Verificou-se um encaixe de pino quadrado para realizar a união entre diversos componentes (figura 55), este possui uma folga de 0,25 mm para garantir uma conexão justa. Foram utilizados pinos para encaixar os sistemas de guiamento linear à base do contentor, a tela de perfil em z à base do contentor, e o alimentador vibratório à estrutura de suporte do TO.

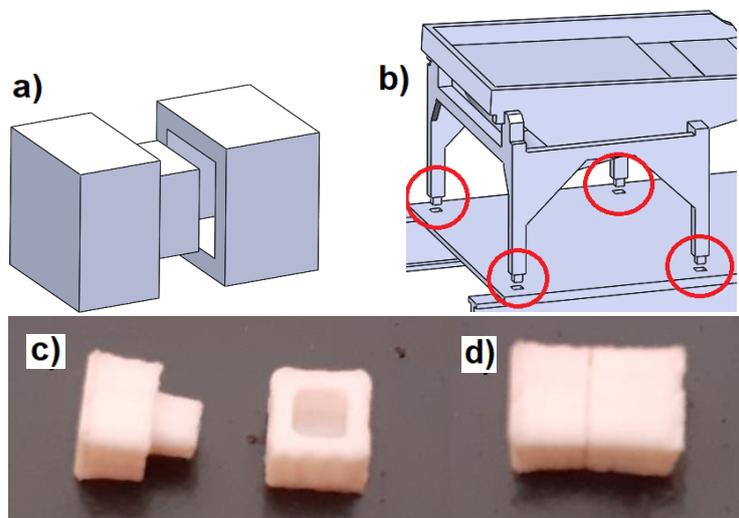


Fig. 55: Pino de encaixe: a) CAD do encaixe teste; b) uma das localizações do encaixe no CAD da UMP; c) Encaixe após impressão; d) União do encaixe teste.

A estrutura de suporte do TO juntamente com o TO, são componentes que bloqueiam a visão para as telas transportadoras e os sistemas guiamento linear, por esta razão os encaixes destes componentes utilizam uma folga de 0,5 mm, o que proporciona uma desmontagem sem esforços para facilitar a visualização dos componentes que se situam por baixo destes.

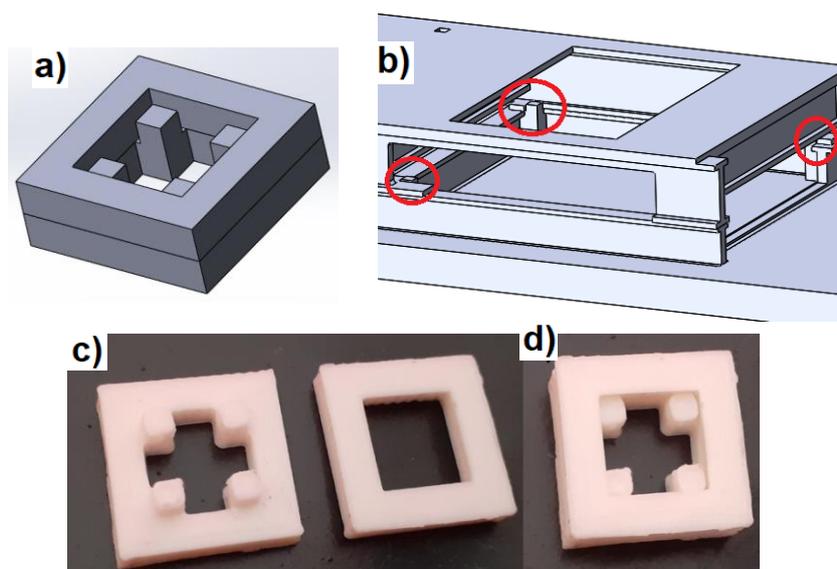


Fig. 56: Encaixe amovível: a) CAD do encaixe teste; b) uma das localizações do encaixe no CAD da UMP; c) Encaixe após impressão; d) União do encaixe teste.

As dimensões da escala reduzida não permitem uma representação à escala dos sistemas de guiamento linear, por esta razão a representação destes foi realizada de uma forma funcional, ou seja, dimensionou-se conexões deslizantes para exibir o funcionamento destes componentes juntamente com as telas transportadoras. Devido ao espaço reduzido disponível para a realização desta conexão, foram realizadas 3 impressões teste até se alcançarem dimensões que permitiam o deslizamento entre as duas peças (figura 57).

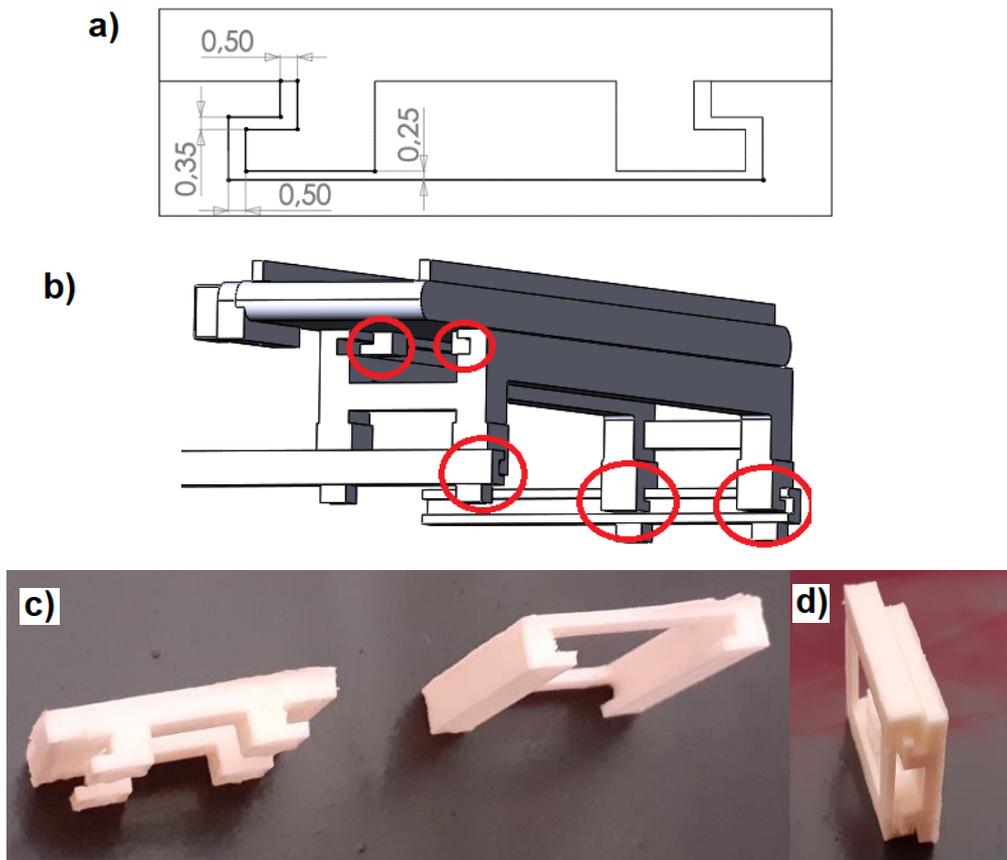


Fig. 57: Encaixe deslizante: a) CAD do encaixe teste; b) uma das localizações do encaixe no CAD da UMP; c) Encaixe após impressão; d) União do encaixe teste.

5.6. Impressão do protótipo

Com todas as conexões testadas e verificadas, a impressão dos componentes da UMP tem em consideração orientações de impressão que minimizassem a quantidade de material de suporte necessário, e a orientação de os perfis longos e finos com a mesma direção que as camadas de impressão de forma a melhorar as propriedades mecânicas destes.

Algumas incompatibilidades geométricas foram verificadas nas ligações por pino, o excesso de material foi removido por limagem, possibilitando o encaixe destes. Para reduzir o impacto visual provocado pelo efeito de escada em certas superfícies, utilizou-se lixas com granulação fina em água, a figura 58 compara duas superfícies antes e após este processo.

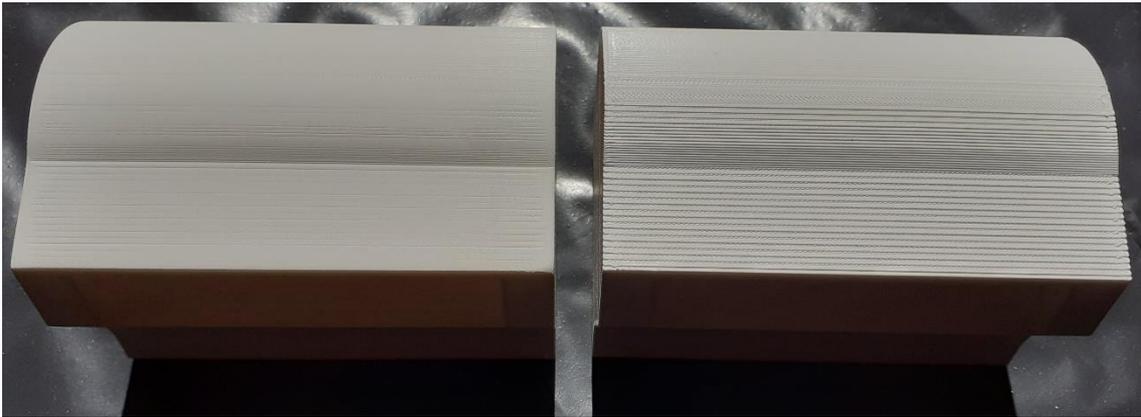


Fig. 58: Comparação de duas superfícies, a da esquerda após lixagem e a da direita antes deste processo

Com todos os encaixes verificados e corrigidos, procedeu-se à montagem da UMP, apresentada na figura 59 antes e depois da montagem de todos os componentes constituintes.



Fig. 59: O protótipo da UMP: a) Componentes separados; b) UMP montada

As peças do protótipo foram impressas por lotes constituídas no máximo por duas peças, com a exceção das telas transportadoras de extração dos produtos de triagem e os carris dos sistemas de guiamento, dado que se tratem de peças com dimensões reduzidas, sendo estas incluídas todas no mesmo lote de produção.

Tabela 13: Peças dos lotes de impressão com gramas de PLA e PVA usados e tempo de produção

Lote	PLA (g)	PVA (g)	Tempo (horas:minutos)
Base traseira	223	16	18h:34m
Base frontal	255	16	20h:24m
Topo traseiro	37	1	3h:10m
Topo frontal	36	0	3h:05m
Telas transportadoras de extração e sistemas de guiamento linear	49	17	7h:31m
Suporte do TO traseiro e alimentador vibratório	139	63	21h:43m
Suporte do TO frontal e TO	243	43	22h:42m
Alimentador vibratório e TO	219	55	22h:01m
Tela transportadora de perfil em z	84	58	19h:13m
TOTAL	1285	269	138h:23m

6. Conclusão

No presente capítulo, apresentam-se as conclusões e resultados obtidos durante as etapas de análise da UMP previamente desenvolvida, conceptualização e desenvolvimento da nova proposta para a UMP, e produção do protótipo em escala reduzida, realizadas no âmbito desta dissertação.

Com a análise da UMP anteriormente proposta, identificou-se vários pontos de melhoria que serviram como bases para o desenvolvimento de uma nova proposta para a UMP que procura melhorar os problemas inerentes da anterior:

- Tendo em consideração a capacidade de processamento anual de uma unidade (20946 ton/ano), são necessárias sete UMP para processar todo o caudal de TMBr e EI produzido anualmente por parte das SGRU consideradas pelo projeto Mobile-Pro-U (127401 ton/ano). Observou-se também que o processamento da produção anual de EI da Valorsul (45045 ton/ano) requer três destas unidades, o que resulta numa situação em que duas das unidades terão de permanecer nesta SGRU, tornando a irrelevante a propriedade móvel destas unidades. O desenvolvimento de uma UMP com uma capacidade de processamento superior a esta, pode solucionar a situação anterior, bem como reduzir o número de unidades necessárias para compor a rede de UMP, simplificando o planeamento do sistema logístico, tendo em conta os fatores económicos e ambientais;
- O equipamento RecGlass encontra-se inativo aproximadamente 24,8% do tempo total de processamento da UMP, ocupando metade do espaço disponível dentro da unidade, ficando em questão a possibilidade de integrar este equipamento nas SGRU e utilizar o espaço disponível para outro TO;
- A tela transportadora de alimentação apresenta duas posições de operação, a reconfiguração do posicionamento deste equipamento é morosa, não tendo sido definida por Arrais [1]. Tendo isto em consideração, quaisquer mudanças no ciclo de processamento terão de ser definidas e incorporadas na nova UMP;
- Um dos contentores de recolha dos contaminantes rejeitados, encontra-se diretamente por baixo da tela transportadora de alimentação. Todos os contentores devem localizar-se em zonas de fácil acesso que não interfiram com outros equipamentos.

Sendo o RecGlass, o equipamento mais barato do DRV, a sua implementação nos SGRU não apresenta um aumento significativo nos custos da instalação do estágio de pré-processamento do DRV nos SGRU. Com as considerações anteriores, este equipamento foi excluído da nova UMP de forma a maximizar a capacidade de processamento da unidade. Este cenário irá permitir que o RecGlass trabalhe em máximo potencial de processamento, pois não

se tem a preocupação de ajustar a velocidade de processamento deste equipamento de forma a garantir a conformidade com o caudal admissível do TO (que é inferior).

Durante a escolha do TO, notou-se que nos ensaios de otimização do DRV desenvolvido por Dias [2], foi utilizado um modelo obsoleto de TO. Foi conseqüentemente colocada a questão para a possibilidade de serem necessários menos de três estágios de triagem ótica usando modelos de TO atuais. Sugere-se então, para trabalho futuro, a realização de ensaios do DRV usando tecnologia de triagem ótica atualizada,

A nova UMP desenvolvida é constituída por dois TO e possui dois modos de processamento, em série e em paralelo, usados na primeira e segunda passagem dos resíduos pela UMP, respetivamente. O custo unitário da unidade foi estimado em 585 000 €. Possui uma capacidade de processamento anual de 41891 ton/ano, o que ainda não é suficiente para processar a produção anual de EI da Valorsul utilizando uma unidade, mas reduz o número de UMP necessárias de três para duas. Relativamente à produção anual de TMBr e EI de todas as SGRU, são necessárias quatro unidades, uma redução de três unidades em relação à UMP anteriormente proposta, o que resulta numa redução de custo total estimado em 550 000 €. Com a redução do número de unidades móveis necessárias para a rede nacional, é expectável que os custos operacionais sejam mais reduzidos, ou seja, menos operações de manutenção, menor número de rotas a percorrer (reduz os custos de combustível), e menos trabalhadores.

Situações em que um dos TO se encontra inoperacional, não invalidam o uso da UMP para processamento de resíduos, pois a unidade permite que ambos os TO trabalhem independentemente um do outro.

As SGRU terão de disponibilizar de diversos equipamentos para acolher uma UMP, nomeadamente, duas tremonhas, duas telas transportadoras de alimentação, contentores de recolha dos produtos da triagem ótica, um sistema de aspiração de leves, e pelo menos uma pá carregadora. Sugere-se para trabalho futuro, um estudo da capacidade que as SGRU possuem para acomodar uma UMP.

O protótipo da UMP foi produzido numa escala de 1:20, possuindo uma dimensão de 610 x 122 x 145 mm. Devido á redução em escala da UMP, esta apresentava perfis e detalhes com espessuras muito pequenas, impossibilitando a produção de certos componentes, pelo que certas dimensões de espessura tiveram de ser aumentadas. Apesar desta limitação, foi possível produzir peças com encaixes deslizantes, representativas dos sistemas de guiamento linear conectados às telas transportadoras de extração dos produtos da triagem. Este protótipo poderá, portanto, ser utilizado para demonstrar os dois modos de operação da nova UMP (série e paralelo), bem como o fluxo de resíduos durante o seu funcionamento.

Bibliografia

- [1] J. C. F. Arrais, "Projeto de uma unidade móvel de recuperação de vidro", Tese de Mestrado, IST - UL, Lisboa, PT, 2019.
- [2] N. R. B. S. Dias, "Recuperação do vidro contido no rejeitado pesado proveniente de instalações de Tratamento Mecânico e Biológico para reciclagem", Tese de Doutoramento, IST - UL, Lisboa, PT, 2015.
- [3] Agência Portuguesa do Ambiente, "Relatório anual de resíduos urbanos 2019", APA Direção Geral das Atividades Económicas, Amadora, Portugal, 2019. URL <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933&sub3ref=936> (acedido em agosto de 2020)
- [4] Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2011, 17 Junho). Decreto-Lei n.º 73/2011. URL <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/73/2011/06/17/p/dre/pt/html>
- [5] Agência Portuguesa do Ambiente, "Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2014-2020", APA Direção-Geral das Atividades Económicas, Amadora, Portugal, 2014. URL https://apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2019/PERSU2020/PERSU2020%20_Audicao_Publica_dez2018.pdf
- [6] Agência Portuguesa do Ambiente, "Especificações técnicas dos resíduos de embalagens provenientes da recolha indiferenciada", APA Direção-Geral das Atividades Económicas, Amadora, Portugal, 2017. URL https://apambiente.pt/_zdata/Políticas/Residuos/FluxosEspecificosResiduos/ERE/Especificacoes%20Tecnicas%20Rec%20Ind.pdf
- [7] H. T. A. Jardim, "Caracterização de escórias de incineração de resíduos urbanos e recuperação do vidro", Dissertação de mestrado, IST - UL, Lisboa, PT, 2015.
- [8] I. R. Q. Garrinhas, "Optimização da triagem óptica na recuperação de vidro proveniente de TMB", Dissertação de Mestrado, IST - UL, Lisboa, PT, 2014.
- [9] K. T. Ulrich e S. D. Eppinger, Product Design and Development, New York, USA: MG-H, 2012.
- [10] 3DR HOLDINGS. "Popularity of FDM". URL <https://3dprint.com/169882/popularity-of-fdm/> (acedido em fevereiro de 2020)
- [11] M. F. C. R. Sardinha, "Design and development of a modular fused deposition modelling apparatus", Tese de Mestrado, IST - UL, Lisboa, PT, 2017.
- [12] I. C. B. A. Bernardo, "Desenho e Planeamento do Sistema Logístico de uma Unidade de Recuperação de Vidro de Embalagem", Tese de Mestrado, IST - UL, Lisboa, PT, 2019.
- [13] F. B. A. Rocha, "Recuperação de vidro nos fluxos de resíduos indiferenciados", Tese de Mestrado, IST - UL, Lisboa, PT, 2019.
- [14] Binder & CO. "CLARITY GLASS." Binder-co.com. URL <https://www.binder-co.com/955/CLARITYglass> (acedido em novembro de 2019)

- [15] PICVISA. "ECOGLASS". picvisa.com. URL https://www.picvisa.com/wp-content/uploads/2020/05/Ecoglass_EN.pdf (acedido em novembro de 2019)
- [16] Allgaier-Group "MSort". allgaier-group.com. URL https://www.allgaier-process-technology.com/sites/default/files/downloads/en/allgaier_apt_mog_msort_en.pdf (acedido em novembro de 2019)
- [17] Sesotec "SPEKTRUM". sesotec.com. URL https://www.sesotec.com/sites/593fc2aac25e5b0640a20ff8/content_entry59e75c78ffe9ecdb05f0bdf9/5a97c4f7ffe9ec732a73148d/files/spektrum-pr-en.pdf?1592543274 (acedido em dezembro de 2019)
- [18] Cleveland Containers. "40ft Shipping Containers." clevelandcontainers.co.uk. URL <https://www.clevelandcontainers.co.uk/containers/40ft-containers?tab=sideopening> (acedido em novembro de 2019)
- [19] Mk Technology Group. "Catalogue mk Conveyor Technology 4.0." mk-group.com. URL https://www.mk-group.com/fileadmin/media/catalog/en/mk_Conveyor_Technology_4.0_en.pdf (acedido em dezembro de 2019)
- [20] DAIFUKU Wynright. "AutoSort 4 Flat Face Arm Sorter" wynrightproducts.com. URL <https://www.wynrightproducts.com/products/sortation/> (acedido em dezembro de 2019)
- [21] União Europeia, "Orientações relativas às melhores práticas Europeias: Imobilização de carga nos transportes rodoviários", UE, Luxemburgo, 2014. URL <https://antram.pt/attachments/upload/Informações%20Rodoviárias/MI0614080PTN.pt.pdf>
- [22] S. R. Schmid, B. J. Hamrock e B. O. Jacobson, Fundamentals of Machine Elements: SI Version, Boca Raton, USA, 2014
- [23] Grupo Ferpinta. "Tubos quadrados" ferpinta.pt. URL http://www.ferpinta.pt/index.php?cat=3&id_item=1450 (acedido em janeiro de 2020)
- [24] Aldina Santiago, "manual de DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM AÇO INOXIDÁVEL", Coimbra, 2017. URL <http://www.steel-stainless.org/media/1478/dmsss4-pt.pdf>
- [25] Hepco Motion. "HLG Hepco Linear Ball Guides." hepcomotion.com. URL https://www.hepcomotion.com/wp-content/uploads/2016/01/UK-HLG-Catalogue_Updated-03-06-19.pdf (acedido em março de 2020)
- [26] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. URL "NBR 8196 - Emprego de escalas". [Online]. Disponível: <https://docente.ifrn.edu.br/samueloliveira/disciplinas/desenho-industrial/normas-abnt-para-desenho-tecnico/nbr-8196-emprego-de-escalas/view>
- [27] Ultimaker. "Ultimaker S5 Powerful, reliable, versatile 3D printing". URL <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5> (acedido em março de 2020)
- [28] 3D HUBS. "PLA vs. ABS: What's the difference?". URL <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference/> (acedido em abril de 2020)
- [29] RepRap. "PVA (SUPPORT)". URL <https://www.reprap.me/filament/1-75mm-filament/pva-1-75mm> (acedido em abril de 2020)

- [30] J. Fernandes, A. M. Deus, L. Reis, M. F. Vaz, M. Leite, "Study of the influence of 3d printing parameters on the mechanical properties of PLA", IST - UL, Lisboa, PT, 2018.
- [31] A. Castelão, B. A. R. Soares, C. M. Machado, M. Leite, A. J. M. Mourão, "Design for AM: Contributions from surface finish, part geometry and part positioning", Elsevier B. V., 2019
- [32] L. P. Luz, W. V. Domingues, S. F. Lajarin, UFPR. "Manufatura Aditiva, uma introdução ao principio de extrusão do material". URL <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EMAN7008/Mini%20Curso%20Impress%C3%A3o%203D.pdf> (acedido em abril de 2020)
- [33] R. J. Urbanic, R. Hedrick, " Fused Deposition Modeling Design Rules for Building Large, Complex Components", Taylor & Francis, 2016
- [34] 3D HUBS. "How to design parts for FDM 3D printing". URL <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing/> (acedido em fevereiro de 2020)
- [35] R. G. Budynas e J. K. Nisbett, "Shigley's mechanical engineering design", New York USA, Mc Graw Hill, 2015

A. Anexos

A.1. Características do coeficiente de segurança (Pugsley)

Tabela A.1: Tabela de valores dos parâmetros de segurança [22]

Characteristic ^a	A	C	B			
			vg	g	f	p
vg	vg		1.1	1.3	1.5	1.7
		g	1.2	1.45	1.7	1.95
		f	1.3	1.6	1.9	2.2
		p	1.4	1.75	2.1	2.45
g	vg		1.3	1.55	1.8	2.05
		g	1.45	1.75	2.05	2.35
		f	1.6	1.95	2.3	2.65
		p	1.75	2.15	2.55	2.95
f	vg		1.5	1.8	2.1	2.4
		g	1.7	2.05	2.4	2.75
		f	1.9	2.3	2.7	3.1
		p	2.1	2.55	3.0	3.45
p	vg		1.7	2.15	2.4	2.75
		g	1.95	2.35	2.75	3.15
		f	2.2	2.65	3.1	3.55
		p	2.45	2.95	3.45	3.95

Characteristic E ^d	D		
	ns	s	vs
ns	1.0	1.2	1.4
s	1.0	1.3	1.5
vs	1.2	1.4	1.6

^a vs = very serious, s = serious, and ns = not serious
D = danger to personnel
E = economic impact

^a vg = very good, g = good, f = fair, and p = poor.
A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection.
B = control over load applied to part.
C = accuracy of stress analysis, experimental data or experience with similar parts.

A.2. Especificações técnicas dos tubos quadrados (FERPINTA)

Tabela A.2: Especificações técnicas de tubos quadrados estruturais, fornecidos por FERPINTA [23]

DIMENSÕES		CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS						
Dimensões (mm) B	Espessura (mm) T	Peso (Kg/mt)	Tubos por Atado	Peso por Atado (Kg)	Secção (cm ²)	I - Momento de Inércia (cm ⁴)	W - Módulo Resistência Elástico (cm ³)	i - Raio de Giração (cm)
10	1,50	0,447	400	1,073	0,510	0,063	0,127	0,352
12	1,50	0,565	360	1,220	0,630	0,118	0,197	0,433
14	1,50	0,636	360	1,374	0,750	0,198	0,283	0,514
16	1,50	0,742	360	1,603	0,870	0,308	0,385	0,595
16	2,00	0,973	360	2,102	1,120	0,373	0,467	0,577
18	1,50	0,824	289	1,429	0,990	0,453	0,503	0,676
20	1,50	0,942	225	1,272	1,110	0,637	0,637	0,758
20	2,00	1,225	225	1,654	1,440	0,787	0,787	0,739
22	1,50	1,036	196	1,218	1,230	0,866	0,787	0,839
22	2,00	1,366	196	1,606	1,600	1,077	0,979	0,821
25	1,50	1,154	196	1,357	1,410	1,303	1,042	0,961
25	2,00	1,523	196	1,791	1,840	1,635	1,308	0,943
28	1,50	1,178	169	1,194	1,590	1,867	1,334	1,084
28	2,00	1,554	169	1,576	2,080	2,357	1,684	1,065
30	1,50	1,389	169	1,408	1,710	2,321	1,548	1,165
30	2,00	1,837	169	1,863	2,240	2,942	1,961	1,146

A.3. Informação técnica de parafusos métricos

Tabela A.3.1: Dimensões e propriedades geométricas de parafusos [35]

Nominal Major Diameter d mm	Coarse-Pitch Series			Fine-Pitch Series		
	Pitch p mm	Tensile-Stress Area A_t mm ²	Minor-Diameter Area A_r mm ²	Pitch p mm	Tensile-Stress Area A_t mm ²	Minor-Diameter Area A_r mm ²
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259

Tabela A.3.2: Propriedades Mecânicas de diferentes classes de parafuso métrico [35]

Property Class	Size Range, Inclusive	Minimum Proof Strength,* MPa	Minimum Tensile Strength,* MPa	Minimum Yield Strength,* MPa	Material	Head Marking
4.6	M5–M36	225	400	240	Low or medium carbon	
4.8	M1.6–M16	310	420	340	Low or medium carbon	
5.8	M5–M24	380	520	420	Low or medium carbon	
8.8	M16–M36	600	830	660	Medium carbon, Q&T	
9.8	M1.6–M16	650	900	720	Medium carbon, Q&T	
10.9	M5–M36	830	1040	940	Low-carbon martensite, Q&T	
12.9	M1.6–M36	970	1220	1100	Alloy, Q&T	

A.4. Ficha técnica da tela transportadora KFG-P 2000 AS

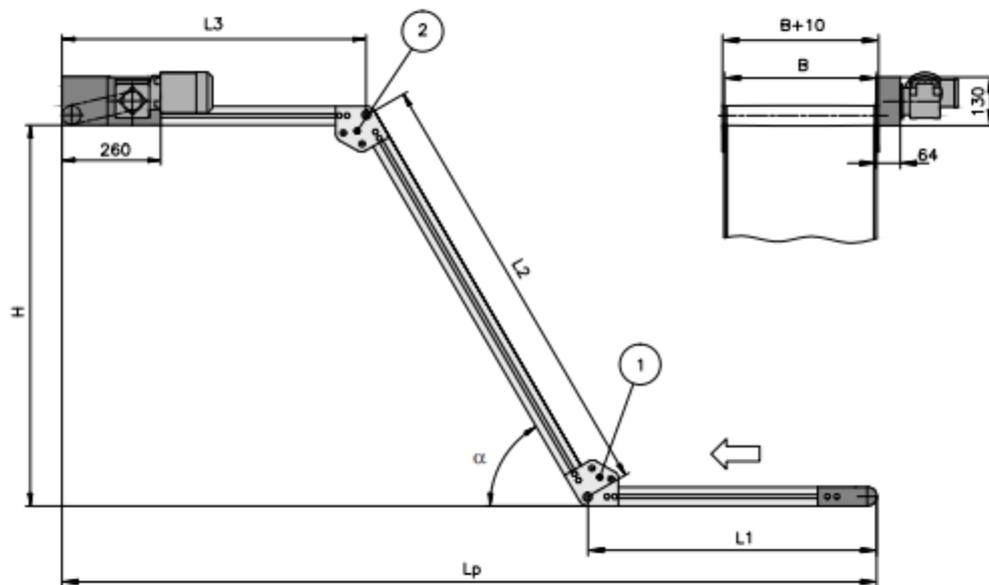
KFG-P 2000 AS



Properties

The drive located laterally on the outside allows the total height of the conveyor to be restricted to a minimum. The compact conveyor frame design makes it easier to integrate the conveyor into existing systems. The $\varnothing 53$ mm driving roller ensures excellent transmission of the motor power.

B20.00.010



Technical data

Conveyor length L (L1+L2+L3)	L1/L3 min. = 400, L2 min. = 600	
Conveyor width B	300 to 700 mm (in 100 mm increments)	others on request
Drive location	discharge end left/right	
Drive and speed	up to 15 m/min	others on request
Stand and side rail		p. 78
Standard distributed load	up to 25 kg/m, 5 kg/compartiment	others on request
Belt incline α	30, 45 and 60°	others on request
Conveyed product	height up to 55 mm, length up to 300 mm	others on request

Fig. A.4: Ficha técnica KFG-P 2000 AS [19]

A.5. Ficha técnica da tela transportadora GUF-P 2000 AS

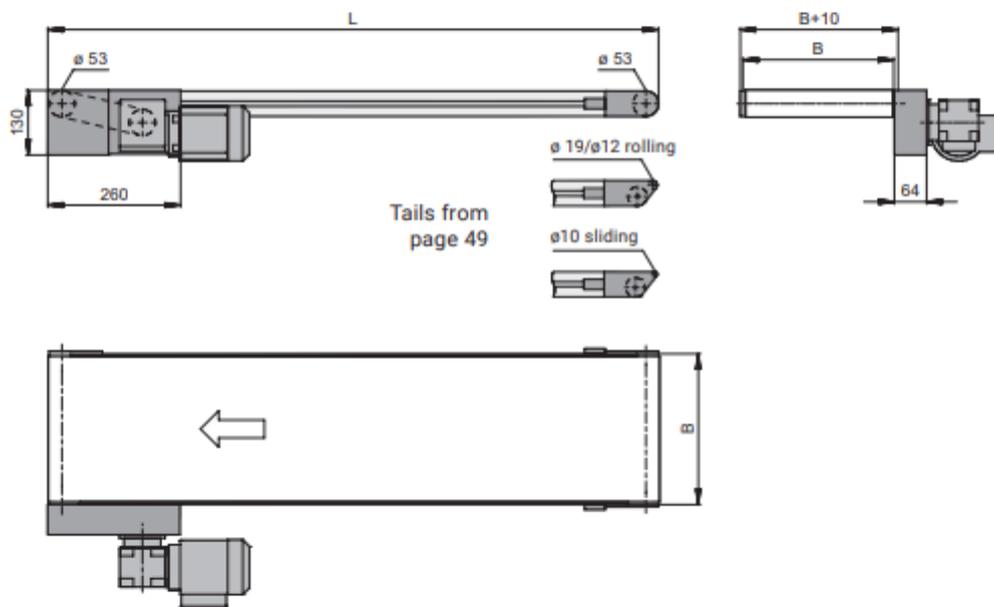
GUF-P 2000 AS



Properties

The drive located laterally on the outside allows the total height of the conveyor to be restricted to a minimum. The $\varnothing 53$ mm driving roller ensures excellent transmission of the motor power. Operation with cleated belts is possible with this version.

B20.00.008



Technical data

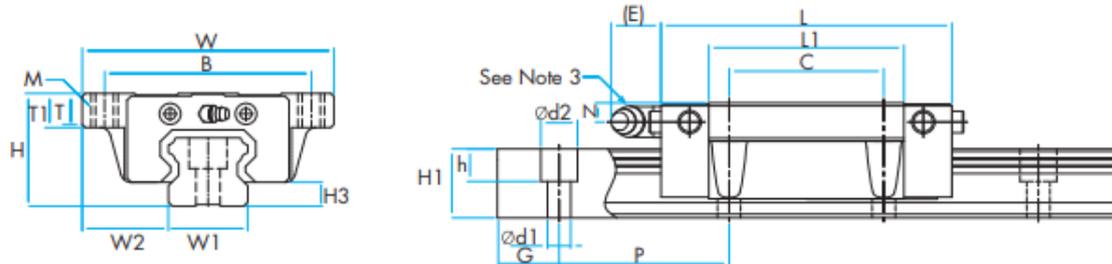
Conveyor length L	individual from 550 to 10000 mm	
Conveyor width B	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800 mm	others on request
Belt width	B-10 mm	from p. 88
Drive location	discharge end left/right; infeed end on request	
Drive and speed	up to $v=80$ m/min	p. 12
Stand and side rail		from p. 280
Standard distributed load	up to 25 kg/m	p. 20

Fig. A.5: Ficha técnica GUF-P 2000 AS [19]

A.6. Especificações técnicas do sistema de guiamento linear

Tabela A.6: Ficha técnica de sistemas de guiamento linear [25]

HLGS--CF Series, HLGS--F Series



Ref No.	External Dimensions			Dimensions of HLG Block								H3
	Height H	Width W	Length L	B	C	M	L1	T	N	E	Grease Nipple*3	
HLGS15CF	24	52	40.2	41	-	M5	24	6	7	6	A-M4	4.5
HLGS15F			56.9		26		40.7					
HLGS20CF	28	59	47.2	49	-	M6	27.6	8	9	5.5	B-M6F	6
HLGS20F			66.3		32		46.7					
HLGS25CF	33	73	59.1	60	-	M8	34.4	9	10	6	B-M6F	7
HLGS25F			83		35		58.2					

Ref No.	Dimensions of HLG Rail						Basic Load Rating Dynamic / Static		Static Moment Capacity Nm			Weight	
	Width W1 ±0.05	W2	Height H1	Min G	Pitch P	d1 x d2 x h	C kN	Co kN	M	Mv	Ms	HLG Block kg	HLG Rail kg/m
HLGS15CF	15	18.5	13	10	60	4.5 x 7.5 x 5.3	6.5	9.3	39	39	74	0.125	1.3
HLGS15F							9.3	15.5	110	110	124	0.203	
HLGS20CF	20	19.5	16.5	10	60	6 x 9.5 x 8.5	8.6	12.1	59	59	128	0.187	2.2
HLGS20F							12.3	20.2	165	165	213	0.301	
HLGS25CF	23	25	20	10	60	7 x 11 x 9	13.9	19.0	115	115	229	0.320	3.0
HLGS25F							19.9	31.6	323	323	381	0.527	

