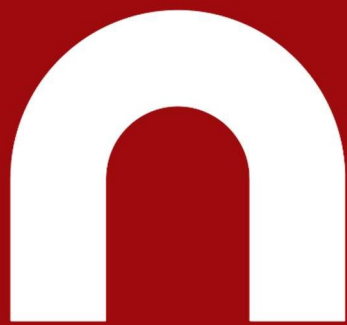




isec
Engenharia

DEFINITIVO

MESTRADO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

***Solid Edge*[®] como Ferramenta de Projeto
para Fabrico de componentes por
Maquinagem e Prototipagem**

Autor

Flávio José Malo Ribeiro

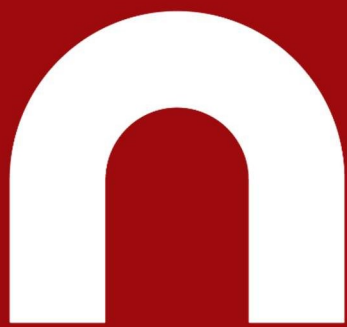
Orientador

Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Março, 2021



isec
Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

***Solid Edge*[®] como Ferramenta de Projeto para Fabrico
de componentes por Maquinagem e Prototipagem**

Relatório de Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos
Mecânicos

Autor

Flávio José Malo Ribeiro

Orientador

Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Março, de 2021

AGRADECIMENTOS

Durante a elaboração desta dissertação de mestrado foram recebidos vários apoios diretos e indiretos de várias pessoas, assim gostaria de manifestar o mais sincero agradecimento a todos, em especial:

Ao meu orientador, Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões, pela coordenação e conhecimento transmitido, pelo apoio durante a realização deste trabalho e pela disponibilidade demonstradas ao longo do tempo.

Ao Engenheiro Paulo Amaro e Prof. Doutor Pedro Ferreira, pelo conhecimento transmitido e ideias sugeridas durante a elaboração e produção da Base.

À minha família, principalmente à minha mãe pelo seu apoio incondicional ao longo todo este percurso académico.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal explorar o software de desenho *Solid Edge*[®] e perceber quais são as principais funcionalidades e ferramentas que este software disponibiliza para o utilizador e a sua versatilidade quando se projeta um componente desde a fase de projeto até à fase de produção.

Para uma demonstração de aplicação prática do *Solid Edge*[®] como ferramenta de projeto para fabrico de componentes, elegeu-se a Maquinagem e a Prototipagem para ser explorada a interligação com o *Solid Edge*[®]. Assim, além de serem exploradas as funcionalidades que foram necessárias do *Solid Edge*[®], no que diz respeito à implementação do fabrico de componentes, foram utilizadas neste trabalho as tecnologias de fabrico assistido por computador (CAD\CAM), bem como a prototipagem rápida de Impressão 3D.

Neste contexto, foi projetada no *Solid Edge* uma Base para uma prensa da mesa de uma máquina CNC. Para a produção deste componente recorreu-se ao software *MasterCAM*[®] para programar os ciclos de maquinagem e gerar o código CNC a ser utilizado no processo de fabrico por arranque de apara, num centro de maquinagem a 5 eixos.

No que diz respeito à interligação do *Solid Edge*[®] com a impressão 3D, foram projetados com o *Solid Edge*[®] componentes com rosca e provetes, para serem produzidos pelo método de extrusão de filamento fundido (FFF), com recurso ao software e impressora 3D. Os componentes roscados foram produzidos para serem utilizados na Base fabricada, enquanto que os provetes produzidos em PLA com e sem reforço, tiveram como finalidade a análise da influência do reforço nas propriedades mecânicas do provete.

Com este trabalho verificou-se que o *Solid Edge*[®] é uma ferramenta de trabalho bastante completa. Para a edição de componentes 3D ou 2D provenientes de outros softwares de desenho, o *Solid Edge*[®] demonstrou ser muito fluido e simples de utilizar, essencialmente porque trata os componentes importados como peças nativas, tornando todo o processo muito mais simples e rápido, aumentando assim a produtividade. Ao longo do trabalho de utilização do software, ficou demonstrada a capacidade de importar e manipular componentes no *Solid Edge*, sendo uma ferramenta versátil nas vertentes exploradas, tal como na criação de vistas 2D, vistas explodidas, etc.

Palavras-Chave: *Solid Edge*[®], CAD/CAM, maquinagem, impressão 3D, CNC, prototipagem.

ABSTRACT

The main objective of this work was to explore the Solid Edge® design software and understand what are the main features and tools that this software makes available to the user and its versatility when designing a component from the design phase to the production phase.

For a demonstration of the practical application of Solid Edge® as a design tool for the manufacture of components, Machining and Prototyping was chosen to explore the interconnection with Solid Edge®. Thus, in addition to being exploited the features that were necessary for Solid Edge®, with regard to the implementation of the component manufacturing, we were used in this study of the computer-aided manufacturing technologies (CAD \ CAM), as well as rapid prototyping 3D printing.

In this context, a Base was designed in Solid Edge for a table press on a CNC machine. For the production of this component, the MasterCAM® software was used to program the machining cycles and generate the CNC code to be used in the manufacturing process by chip start, in a 5-axis machining center.

Regarding the interconnection of Solid Edge® with 3D printing, threaded components and test pieces were designed with Solid Edge®, to be produced by the method of extrusion of fused filament (FFF), using the software and 3D printer. The threaded components were produced to be used in the manufactured Base, while the test pieces produced in PLA with and without reinforcement, were intended to analyze the influence of the reinforcement on the mechanical properties of the test piece.

This study found that the Solid Edge® is a very complete work tool. For editing 3D or 2D components from other design software, Solid Edge® proved to be very fluid and simple to use, essentially because it treats imported components as native parts, making the whole process much simpler and faster, thus increasing productivity. Throughout the work of using the software, the ability to import and manipulate components in Solid Edge was demonstrated, being a versatile tool in the areas explored, such as in the creation of 2D views, exploded views, etc.

Keywords: Solid Edge, CAD / CAM, machining, 3D printing, CNC, prototyping.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SIMBOLOGIA	XV
ABREVIATURAS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura do trabalho	3
2. EVOLUÇÃO DO <i>SOFTWARE SOLID EDGE</i> [®] E FUNCIONALIDADES	5
2.1. Enquadramento teórico	5
2.2. Módulos <i>Solid Edge</i> [®]	8
2.2.1. História	8
2.2.2. Módulos Integrados	9
2.2.2.1. <i>Solid Edge</i> [®] Mechanical Design.....	11
2.2.2.2. <i>Solid Edge</i> [®] Electrical Design.....	40
3. INTERLIGAÇÃO DO <i>SOLID EDGE</i> COM A TECNOLOGIA DE FABRICO CNC	45
3.1. Projeto e desenho com <i>Solid Edge</i> [®]	45
3.2. Ciclos de maquinagem e Fabrico da Base.....	60
3.2.1. Programação dos ciclos no <i>MasterCAM</i> [®]	60
3.2.2. Maquinagem da Base	69
4. INTERLIGAÇÃO <i>SOLID EDGE</i> [®] COM AS TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D.....	87
4.1. Modelação dos componentes a produzir por impressão 3D	88
4.2. Impressão dos Componentes.....	91
5. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PROVETES PRODUZIDOS POR IMPRESSÃO 3D	101
6. CONCLUSÃO.....	109
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
8. ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Primeira máquina CNC produzida na Europa em 1956. (My Brighton and Hove, 2017)...	5
Figura 2.2 - Ivan Sutherland SKETCHPAD. (BIM A+ European, 2019).....	6
Figura 2.3 - Software de desenho CATIA utilizado em 1981. (Proconcept sistemas, 2018).....	6
Figura 2.4 - (a) Logo primeiras versões; (b) Logo do Solid Edge® V5. (Solid Edge History, 2018).	9
Figura 2.5 - Menu Learn.	10
Figura 2.6 - Exemplo de Cloud-enabled Environment. (Solid Edge, 2019)	11
Figura 2.7 - Exemplo de Cotagem através de PMI. (Solid Edge, 2019)	13
Figura 2.8 - Exemplo de análise de elementos finitos. (Solid Edge, 2019)	13
Figura 2.9 - Exemplo de análise térmica. (Solid Edge, 2019).....	14
Figura 2.10 - Exemplo de simulação de fluxo de calor. (Solid Edge, 2019).....	15
Figura 2.11 - Exemplo de componente antes e após otimização. (Solid Edge, 2019)	15
Figura 2.12 - Geometria complexa para impressão 3D. (Solid Edge, 2019).....	16
Figura 2.13 - Exemplo de funcionalidade da engenharia inversa. (Solid Edge, 2019)	17
Figura 2.14 - Componente otimizado para impressão 3D. (Solid Edge, 2019).....	17
Figura 2.15 - a) Exemplo do Menu 3D Print, b) Microsoft® 3D Builder. (Solid Edge, 2019).....	18
Figura 2.16 - Opções disponíveis para os formatos (a) *.3MF; (b) *.STL.	19
Figura 2.17 - Otimização para produção por adição (Impressão 3D). (Solid Edge, 2019)	20
Figura 2.18 - Exemplo de opções disponíveis para impressão 3D.....	20
Figura 2.19 - Fornecedores disponíveis para o material selecionado.....	21
Figura 2.20 - Exemplo de vista explodida com lista de componentes. (Solid Edge, 2019).....	22
Figura 2.21 - Exemplo de otimização de vistas. (Solid Edge, 2019)	22
Figura 2.22 - Exemplo de desenho rápido. (Solid Edge, 2019)	23
Figura 2.23 - Exemplo de CAD Standard definido de acordo com a norma selecionada. (Solid Edge, 2019)	23
Figura 2.24 - Exemplo de lista para produção de uma chapa metálica. (Solid Edge, 2019).....	24
Figura 2.25 - Projeto chapa metálica. (Solid Edge, 2019)	25
Figura 2.26 - Exemplo de malhagem de chapa. (Solid Edge, 2019).....	25
Figura 2.27 - Exemplo de uma montagem grande. (Solid Edge, 2019)	26
Figura 2.28 - Vista explodida 3D. (Solid Edge, 2019).....	26
Figura 2.29 - Exemplo de renderização 3D. (Solid Edge, 2019)	27
Figura 2.30 - Exemplo de aplicação do módulo Mold Tooling. (Solid Edge, 2019)	28
Figura 2.31 - a) Objeto 3D; b) Visualização de objeto 3D em enquadramento real. (Solid Edge, 2019)	28
Figura 2.32 - a) Exemplo da vista de uma montagem no SEViewer; b) Lista de componentes na montagem; c) Exemplo de seleção de um só componente.	29
Figura 2.33 - Exemplo de apresentação de desenho 2D no SEViewer. (Solid Edge, 2019)	29
Figura 2.34 - Modelação Bottom-up ou Top-up. (Solid Edge, 2019)	30
Figura 2.35 - Exemplo de aplicação das ferramentas Assembly Relationships. (Solid Edge, 2019)....	30
Figura 2.36 - Exemplo de aplicação Pipe Line design. (Solid Edge, 2019).....	31
Figura 2.37 - Exemplo de aplicação do módulo XpresRoute. (Solid Edge, 2019)	31
Figura 2.38 - Exemplo de aplicação do módulo P&ID. (Solid Edge, 2019)	32
Figura 2.39 - Exemplo de aplicação do módulo Piping design. (Solid Edge, 2019).....	32
Figura 2.40 - Exemplo de aplicação do módulo NC-ready Flat Patterns. (Solid Edge, 2019).....	33
Figura 2.41 - Exemplo de aplicação do módulo. (Solid Edge, 2019)	34

Figura 2.42 - Exemplo de aplicação do módulo Last Changes. (Solid Edge, 2019)	35
Figura 2.43 - Exemplo de aplicação do módulo Design Management. (Solid Edge, 2019).....	35
Figura 2.44 - Exemplo de aplicação da funcionalidade de Pesquisa por formas. (Solid Edge, 2019) ..	36
Figura 2.45 - Exemplo de maquinagem 5 Eixos executada com base no Solid Edge® CAM Pro. (Solid Edge, 2019).....	37
Figura 2.46 - Exemplo de uma operação de torneamento CNC exterior. (Solid Edge, 2019)	38
Figura 2.47 - Exemplo de disposição de diversos componentes executada pelo Solid Edge® 2D Nesting. (Solid Edge, 2019)	38
Figura 2.48 - Exemplo de ilustração técnica elaborada. (Solid Edge, 2019).....	39
Figura 2.49 - Exemplo de aplicação do módulo Solid Edge® Electrical Design. (Solid Edge, 2019)...	41
Figura 2.50 - Exemplo de aplicação do módulo Wiring Design. (Solid Edge, 2019)	42
Figura 2.51 - Exemplo de aplicação do módulo Harness Design. (Solid Edge, 2019).....	42
Figura 2.52 - Exemplo de aplicação do módulo Electrical Routing. (Solid Edge, 2019).....	43
Figura 2.53 - Exemplo de desenho de um PCB. (Solid Edge, 2019).....	43
Figura 2.54 - Exemplo de colaboração ente ECAD e MCAD. (Solid Edge, 2019)	44
Figura 3.1 - Ambiente de desenho Solid Edge®.	46
Figura 3.2 - Mesa da máquina HAAS UMC 750SS.....	46
Figura 3.3 - Exemplo de esboço.	47
Figura 3.4 - a) Exemplo de extrusão em dois sentidos; b) Resultado da extrusão.	47
Figura 3.5 - a) Edição de uma superfície numa figura 3D; b) Aspeto final.....	48
Figura 3.6 - a) Área selecionada com o Extrude Cut; b) Resultado obtido.	48
Figura 3.7 - Logotipo ISEC® no MasterCAM®.	49
Figura 3.8 - Logotipo ISEC® aplicado na Base.	49
Figura 3.9 - Exemplo de edição de ficheiro CAD de importado. (a) - Original; (b) – Editado.....	50
Figura 3.10 - Parafusos importados GRABCAD utilizados na montagem.	50
Figura 3.11 - Montagem da base com a prensa nas duas posições previstas no projeto. (a) Base e Prensa montada transversalmente aos rasgos da mesa; (b) Base e Prensa montada paralela aos rasgos da mesa.	51
Figura 3.12 - Resultado do teste de interferências.....	52
Figura 3.13 - Criação da imagem real da base.....	52
Figura 3.14 - Imagem 3D da Base.....	53
Figura 3.15 - Elementos de fixação.	54
Figura 3.16 - Vista explodida do sistema Mesa de trabalho/Base/Prensa	55
Figura 3.17 - Ambiente de desenho 2D.....	56
Figura 3.18 - Menu das Vista no desenho 2D.	56
Figura 3.19 - Exemplo de cotagem do Solid Edge®.	57
Figura 3.20 - (a) Desenho 2D da Base; (b) Folha com os detalhes e pormenores.....	59
Figura 3.21 - Ambiente trabalho MasterCAM®.	60
Figura 3.22 - a) Definição do Stock Setup, b) Stock Setup com inclusão da base a obter.	61
Figura 3.23 - Localização do zero peça no 1º aperto.....	61
Figura 3.24 - Geometria das ferramentas utilizadas neste trabalho.	62
Figura 3.25 - Pormenor dos gumes de corte das ferramentas 3, 5 e 7 da Tabela 3.1.....	63
Figura 3.26 - Ciclos de maquinagem utilizados no 1º Aperto.	64
Figura 3.27 - a) Trajetória das ferramentas nas operações de desbaste e acabamento das superfícies laterais, b) Simulação da maquinagem das superfícies laterais.	65
Figura 3.28 - a) Trajetória das ferramentas executada para abertura dos canais das guias, b) Simulação da maquinagem dos canais para as guias.....	65
Figura 3.29 - Simulação das trajetórias das ferramentas do 1º Aperto.....	66
Figura 3.30 - Simulação da maquinagem do 1º Aperto.....	66
Figura 3.31 - Ciclos de maquinagem do 2º Aperto.	67

Figura 3.32 - a) Trajetórias das ferramentas dos ciclos nº 20 e nº 21, b) Simulação do processo de maquinagem de a)	67
Figura 3.33 - Trajetória das ferramentas no logo e letras ISEC®, b) Simulação da maquinagem da gravação do logo e letras ISEC® e resultado final da maquinagem do 2º aperto.	68
Figura 3.34 - Máquina utilizada, HAAS UMC 750SS.....	69
Figura 3.35 - Bloco inicial de material para produzir a Base.....	70
Figura 3.36 - a) Grampos utilizados para fixar o bloco b) Bloco fixo com os Grampos.	70
Figura 3.37 - Procedimento para o cálculo do Zero Peça com sonda Renishaw.....	71
Figura 3.38 - Maquinagem das faces, ciclo nº2.....	71
Figura 3.39 - a) Simulação da maquinagem das faces laterais. b) Maquinagem das faces laterais da Base.....	72
Figura 3.40 - Guia utilizada na montagem que faz o alinhamento da Base com a mesa do centro de maquinagem.	72
Figura 3.41 - a) Simulação da abertura das caixas para as guias, b) Caixas para as guias maquinadas.....	73
Figura 3.42 - Caixas para encaixe das guias, onde se encontram os chanfros realizados nas arestas interiores.....	74
Figura 3.43 - a) Simulação das caixas para os M16 e furos M6, b) Maquinagem dos ciclos simulados em a).....	74
Figura 3.44 - a) Simulação da maquinagem dos furos de Ø 12mm e dos cantos, b) Maquinagem dos furos Ø 12 mm e dos cantos.....	75
Figura 3.45 - Boleado realizado nas arestas exteriores da Base.....	75
Figura 3.46 - a) Simulação de todos os ciclos do 1º Aperto, b) Ciclos do 1º Aperto executados, com as 2 guias montadas.....	76
Figura 3.47 - Desbaste dos cantos.....	76
Figura 3.48 - Desbaste em altura (ciclo nº20).....	77
Figura 3.49 - a) Simulação dos ciclos para obter as 4 caixas de Ø 18 mm para os furos; b) Resultado obtido com a maquinagem das 4 caixas dos furos.	77
Figura 3.50 - Chanfro de 45º com 0.5 mm e boleado com raio de 2.5 mm.....	78
Figura 3.51 - a) Furos com rosca M10 para os olhais; b) Aplicação dos Olhais (numa fase final).	78
Figura 3.52 - Análise do alinhamento da base com a mesa de trabalho.....	79
Figura 3.53 - Comparação entre simulação a) e maquinagem b) das operações realizadas até ao ciclo nº 29.....	79
Figura 3.54 - Alteração da fixação da Base.....	80
Figura 3.55 - Furos para parafusos M16.	80
Figura 3.56 - Aspeto da superfície final, a) Pormenor do padrão criado pelo Raster, b) Vista geral da peça.	81
Figura 3.57 - Pormenor dos chanfros e do acabamento das superfícies.....	81
Figura 3.58 - Aspeto quase final das superfícies da base.....	82
Figura 3.59 - Logótipo ISEC®.....	82
Figura 3.60 - a) Simulação de todas as operações realizadas no 2º Aperto, b) Maquinagem de todas as operações do 2º Aperto.	83
Figura 3.61 - Pormenor da identificação da posição da Base.....	83
Figura 3.62 - Parafusos M12 e Porcas T utilizadas.....	84
Figura 3.63 - Versão final do fundo da Base.....	84
Figura 3.64 - Aspeto final da parte superior da Base e aplicação.	85
Figura 4.1 - Conjunto de parafusos de cabeça cilíndrica tipo Umbrako disponíveis na aplicação GrabCAD.	87
Figura 4.2 - Geometria do Provete produzido por impressão 3D.....	87

Figura 4.3 - Escolha do formato de trabalho com o ficheiro importado.....	88
Figura 4.4 - Parafuso pronto para edição.....	88
Figura 4.5 - Algumas das versões de tampas roscadas ponderadas.....	89
Figura 4.6 - Aspeto final da tampa roscada M10 a aplicar na base da prensa.....	89
Figura 4.7 - Procedimento para criar ficheiro com extensão STL.....	89
Figura 4.8 - Dimensões utilizadas no desenho do provete de tração.....	90
Figura 4.9 - a) Provete normal, b) Provete com caixa para inclusão do reforço.....	90
Figura 4.10 - Arame de reforço utilizado.....	90
Figura 4.11 - a) Impressora 3D FlashForge Guider II, b) Mesa e área de impressão.....	91
Figura 4.12 - Ambiente de trabalho do programa FlashPrint.....	91
Figura 4.13 - a) Suportes para impressão, b) Padrão triangular de enchimento e o Raft utilizado.....	92
Figura 4.14 - a) Aspeto da simulação, b) Análise das várias camadas.....	92
Figura 4.15 - Detalhes de impressão fornecidos pela impressora.....	93
Figura 4.16 - Impressão finalizada da Tampa M10.....	93
Figura 4.17 - Resultado final da Tampa Roscada M10.....	94
Figura 4.18 - Ajuste dimensional de impressão efetuado.....	94
Figura 4.19 - a) Teste da Tampa Roscada M10, b) 4 Tampas Roscadas M10 que vão ser utilizadas na Base.....	95
Figura 4.20 - Exemplo de aplicação da tampa roscada.....	95
Figura 4.21 - Aplicação final das Tampas Roscadas M10.....	96
Figura 4.22 - Provete para impressão.....	96
Figura 4.23 - a) Provete sem reforço, b) Provete para aplicação de reforço.....	97
Figura 4.24 - Processo de impressão do provete.....	97
Figura 4.25 - Configuração da pausa para colocar o reforço.....	98
Figura 4.26 - a) Pausa para colocar reforço, b) reforço, c) Reforço colocado.....	98
Figura 4.27 - a) Retoma da impressão após colocação do reforço, b) Impressão concluída.....	99
Figura 4.28 - Aspeto final dos provetes com e sem reforço.....	99
Figura 5.1 - Máquina INSTRON 5584 utilizada nos ensaios.....	101
Figura 5.2 - Ensaio de tração no fio de arame.....	102
Figura 5.3 - Gráfico força/alongamento realizados no fio de arame.....	104
Figura 5.4 - Gráfico da Tensão/Deformação do fio de arame.....	105
Figura 5.5 - Fixação dos provetes em PLA.....	106
Figura 5.6 - Provete sem reforço após ensaio.....	106
Figura 5.7 - Resultado visual do ensaio do provete com reforço.....	107
Figura 5.8 - a) Formato do reforço antes do ensaio; b) Visualização do reforço após o ensaio.....	107
Figura 5.9 - Gráfico da Tensão/Deformação dos provetes.....	108

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características das ferramentas utilizadas neste trabalho.	62
Tabela 3.2 - Parâmetros de corte das ferramentas utilizadas. (Sandvik Coromant, 2019).	63
Tabela 5.1 - Propriedades do PLA utilizado na impressão dos provetes para o ensaio de tração. (FlashForge, 2020)	102

SIMBOLOGIA

ϵ_{conv} – Deformação convencional

σ_{conv} – Tensão convencional

σ_{real} – Tensão real

ϵ_{real} – Deformação real

ΔL – Variação do comprimento

A_0 – Área resistente inicial

E – Espessura do Provete

F – Força aplicada

L – Largura do provete

r – Raio do arame

ABREVIATURAS

2D – Two-dimensional

3D – Three-dimensional

3MF – 3D Manufacturing Format

ANSI – American National Standards Institute

AR – Augmented Reality

B-Rep – Boundary Representation

BSI – British Standard Institution

BOM – Bill of Materials

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CAM – Computer Aided Manufacturing

CATIA – Computer-aided three-dimensional interactive application

CEO – Chief Executive Officer

CFD – Computational fluid dynamics

CGM – Computação Gráfica Metafile

CNC – Computer Numerical Control (Controlo Numérico Computadorizado)

DAC – Desenho Assistido por Computador

DIN – Deutsches Institut für Normung

DXF – Drawing Exchange Format

DXP – Digital Exchange Package

ECAD – Electrical Computer Aided Design

EDM – Electrical Discharge Machining

EN – European standards

FFF – Fused Filament Fabrication

FEA – Finite Element Analysis

GUI – Graphical user interface

IGES – Initial Graphics Exchange Specification

ISA – International Society of Automation

ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
IOT – Internet of Things
ISO – International Organization for Standardization
JIS – Japanese Industrial Standards
MCAD – Mechanical Computer Aided-Design
MIT – Massachusetts Institute of Technology
MBD – Definição Baseada em Modelos
NC – Numeric control
OLE - Object Linking and Embedding
PCF – Piping Component File
PCB – Printed Circuit Board
PDF – Portable Document Format
P & ID – Process and Instrumentation Diagram
PLA – Polylactic Acid
PLM – Product life cycle management
PMI – Product Manufacturing Information
SEV – Solid Edge Viewer
STEP – Standard for the Exchange of Product model data
STL – Standard Triangle Language
TPO – Total Production Optimization
USB – Universal Serial Bus

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

Os softwares de desenho são uma ferramenta importante na evolução da indústria, à medida que a tecnologia foi evoluindo, os componentes e projetos foram ficando cada vez mais complexos e exigentes. Surgiu assim a necessidade de ter ferramentas com a capacidade de responderem a essas exigências e que ajudassem as empresas a projetarem e produzirem os componentes de forma mais rápida e com uma constante redução de custo. O aparecimento destes softwares de desenho revolucionou a forma como os engenheiros e projetistas trabalhavam, permitiu diminuir o tempo de desenvolvimento de projetos e facilitou a partilha dos mesmos, ao ser possível criar bases de dados onde eram guardados os componentes desenvolvidos, sendo posteriormente de fácil consulta e acesso por parte dos vários departamentos intervenientes.

Apesar de durante muitos anos o desenho em papel ter sido o principal método de apresentação de projetos, a evolução tecnológica levou a que os computadores começassem a ser cada vez mais pequenos, não requerendo grandes áreas disponíveis para a sua instalação, o consumo energético por parte destes também baixou consideravelmente bem como o seu preço, tornando-os acessíveis a cada vez mais utilizadores. Tais fatores contribuíram para o aparecimento de mais softwares de desenho, substituindo lentamente, o desenho em papel.

Estas novas ferramentas de trabalho abrem novos caminhos para o desenvolvimento de componentes cada vez mais complexos, e muita das vezes com um desenvolvimento mais rápido do que com o método tradicional, permitem recorrer a catálogos de componentes normalizados já existentes na indústria, como por exemplo parafusos, rebites, porcas, freios, etc.

Uma das grandes inovações dos softwares de desenho é a capacidade de criar protótipos virtuais e imagens 3D realistas, que permitem apresentar um produto aos clientes ou aos fornecedores sem ter a necessidade de construir um protótipo real, sempre que se pretende apresentar ou analisar o aspeto final do componente, para posteriormente efetuar alguma alteração.

O aumento das funcionalidades e potencialidades dos softwares CAD levou a uma inevitável evolução das tecnologias de fabrico, nomeadamente através de uma maior interação entre o projeto e o fabrico de componentes, culminando na possibilidade de obtenção de produtos de maior complexidade, de desenvolvimento mais rápido, de menor custo e adaptados às necessidades particulares de cada utilizador.

Neste contexto, a Siemens apoia a comunidade académica e oferece às escolas a oportunidade de usar ferramentas de gestão do ciclo de vida do produto (Product life cycle management – PLM) mais recentes e de última geração. O Programa GO PLM da *Siemens*[®] concede licenças de software a instituições académicas qualificadas. No caso do Departamento de Engenharia Mecânica do *ISEC*[®], esta colaboração é articulada com a Cadflow, representante oficial da *Siemens*[®], estando disponível de forma gratuita para professores e alunos do *ISEC*[®] as mais recentes versões da licença universitária do *Solid Edge*[®].

Para uma demonstração de aplicação prática do *Solid Edge*[®] como ferramenta de projeto para fabrico de componentes, deu-se preferência a tecnologias existentes no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC[®], elegendo-se por isso a Maquinagem e a Prototipagem para ser explorada a interligação com o *Solid Edge*[®]. Assim, além de serem exploradas as funcionalidades CAD que foram necessárias do *Solid Edge*[®], no que diz respeito à implementação do fabrico de componentes, foram utilizadas neste trabalho as seguintes tecnologias:

- Software de fabrico assistido por computador (CAM) *Mastercam*[®] bem como um centro de maquinagem CNC de 5 eixos;
- Impressão 3D por extrusão de material pela técnica de fabrico por filamento fundido (Fused Filament Fabrication).

Tendo com objetivo selecionar para projetar um componente que demonstrasse ser necessário, após ouvir algumas opiniões e sugestões, foi identificada a necessidade de produzir uma Base para uma prensa que está a ser utilizada numa máquina CNC HAAS UMC 750SS disponível no Laboratório de Biomecânica do ISEC[®]. A Base a projetar e fabricar para a prensa deveria obedecer a um conjunto de requisitos identificados, entre os quais deveria permitir elevar a prensa da mesa da máquina CNC, ampliando a capacidade de maquinaria, reduzindo o risco de colisão das ferramentas montadas na árvore com a mesa de trabalho, principalmente quando se está a proceder à maquinagem a 5 eixos.

Para além do uso das tecnologias de fabrico baseadas na subtração de material, tal como é o caso do uso da maquinagem CNC mencionada anteriormente, na última década verificou-se um grande aumento no uso de componentes produzidos por prototipagem 3D, através do método de produção por adição de material, conhecido também como impressão 3D, em que se pode utilizar materiais poliméricos, resinas, metais, entre outros. Este método de produção permite o fabrico de componentes de modo mais rápido ou com geometrias mais complexas do que pelo método tradicional de produção por arranque de aparta, pese embora as propriedades mecânicas do produto final fiquem aquém do desejável frequentemente.

A impressão 3D, com recurso à impressão com filamento de PLA (ácido poliláctico), um material polimérico, também pode ser utilizada para criar protótipos, quando existe a necessidade de ter um componente físico para ser testado numa montagem já existente. Podem também ser produzidos componentes com reforço constituído por um material diferente, de modo a melhorar as propriedades do material utilizado, em aplicações específicas, sendo possível obter componentes que cumpram os requisitos da aplicação com um custo muito inferior ao de um componente produzido pelos métodos tradicionais de remoção de aparta em materiais metálicos.

Com base na tecnologia de impressão 3D, as capacidades da prototipagem do *Solid Edge*[®] foram exploradas, recorrendo à produção de componentes roscados, a serem utilizados na Base fabricada em CAD/CAM. Além disso, foram ainda produzidos por impressão 3D provetes em PLA com e sem reforço, os quais foram posteriormente ensaiados para determinar as propriedades mecânicas, demonstrando outras potencialidades que podem ser exploradas nestas tecnologias em trabalhos futuros.

1.2. Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo principal explorar o software de desenho *Solid Edge*[®] e perceber quais são as principais funcionalidades e ferramentas que este software disponibiliza para o utilizador e a sua versatilidade quando se projeta um componente desde a fase de projeto até à fase de produção.

De forma a explorar mais profundamente as ferramentas analisadas num contexto mais prático, foi definido como objetivo projetar uma Base para ser utilizada numa prensa da GARANT Xpent 361100_0. Para a produção interligamos o *Solid Edge*[®] com outro software já existente no ISEC[®], o software *MasterCAM*[®] para programar os ciclos de maquinagem e gerar o código CNC a ser utilizado no processo de produção por arranque de apara, num centro de maquinagem a 5 eixos que está instalado no Laboratório de Biomecânica do ISEC[®].

No que diz respeito à interligação do *Solid Edge*[®] com a impressão 3D, foi definido como objetivo projetar componentes roscados e provetes com o *Solid Edge*[®], para serem produzidos pelo método de extrusão de filamento fundido (FFF), com recurso ao software e impressora da *FlashForge*[®]. Os componentes roscados foram produzidos para serem utilizados na Base fabricada, enquanto que os provetes foram produzidos em PLA com e sem reforço, tiveram como finalidade a análise da influência do reforço nas propriedades mecânicas do provete.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, onde acresce ainda as referências e bibliografia consultada.

No **Capítulo 1** faz-se uma breve contextualização do trabalho, apresentam-se os objetivos gerais que fundamentaram a sua execução e apresenta-se também a estrutura do trabalho;

No **Capítulo 2** faz-se um enquadramento histórico dos softwares desenho, a sua evolução desde as suas bases até ao presente momento, salientado os mais importantes pelas novas funcionalidades e inovações. Apresenta-se o software a ser estudado, a sua evolução ao longo do tempo e uma análise teórica geral dos módulos que o compõem;

No **Capítulo 3** apresenta-se a demonstração de algumas das capacidades do *Solid Edge*[®] com o projeto de uma Base para uma prensa *Garant XPENT 361100_0* e alteração de modelos 3D provenientes de outros softwares de desenho. Produção com recurso ao software *MasterCAM*[®] para gerar o código CNC para ser utilizado na produção, bem como a produção num centro de maquinagem *CNC HAAS UMC 750SS* pelo método de produção através de arranque de apara.

No **Capítulo 4** foi explorada tecnologia de impressão 3D, sendo projetados e produzidos componentes roscados e provetes com e sem reforço;

No **Capítulo 5** realizaram-se os testes de tração nos provetes produzidos, sendo determinadas as propriedades mecânicas nos provetes;

No **Capítulo 6** apresentam-se as principais conclusões deste trabalho.

2. EVOLUÇÃO DO SOFTWARE SOLID EDGE® E FUNCIONALIDADES

2.1. Enquadramento teórico

Os softwares de CAD/CAM são programas que dão auxílio aos engenheiros, desenhadores, projetistas e arquitetos nas várias fases de criação, modificação, análise e documentação de projetos que foram substituindo de forma gradual o desenho manual 2D e o 3D. Com a utilização deste tipo de programas de desenho consegue-se aumentar a produtividade, melhorar significativamente a qualidade dos desenhos/projetos e permite criar uma base de dados para a elaboração dos projetos, melhorando assim a comunicação entre as várias secções de produção. Foi uma grande evolução nas áreas da engenharia, arquitetura, da manufatura e mesmo em outras áreas da indústria pela sua elevada precisão, versatilidade e capacidade de editar e proceder a alterações necessárias nos desenhos/projetos CAD/CAM.

A origem dos softwares CAD/CAM pode ser seguida desde 1957, ano em que Dr. Patrick J. Hanratty desenvolveu aquele que é conhecido como o primeiro sistema de programação comercial de controlo numérico (CNC), conhecido como PRONTO, que foi a base para o desenvolvimento deste tipo de programas. O PRONTO foi a primeira aplicação completamente digital para controlo das máquinas de maquinagem (Figura 2.1). Antes do aparecimento destes softwares a operação era feita através da utilização de cartões perfurados, ou um sistema híbrido de analógico/digital em que era usada uma fita perfurada para armazenar o programa, designada de máquina controlada numericamente ou computador numericamente controlado (CNC).

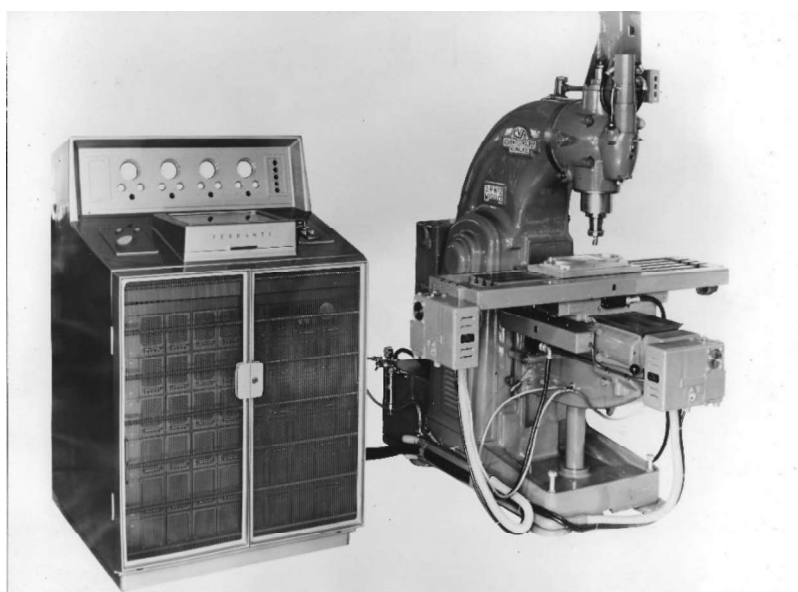


Figura 2.1 - Primeira máquina CNC produzida na Europa em 1956. (My Brighton and Hove, 2017).

Apesar destas evoluções tecnológicas, nas três décadas seguintes, o desenho em papel continuou a ser a principal forma de apresentação dos projetos, pois ainda estávamos a umas décadas de existirem computadores pequenos e acessíveis com capacidade de executarem estes softwares.

Em 1960 Ivan Sutherland criou o *SKETCHPAD* (Figura 2.2), como parte da sua tese de doutoramento no *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, o primeiro software do mundo

com uma interface gráfica que demonstrava os princípios básicos e a viabilidade deste tipo de software, apesar de muito primitivo comparado com os softwares utilizados hoje em dia, o *Sketchpad* era muito inovador pois permitia ao utilizador interagir graficamente com o computador ao utilizar uma caneta de luz para desenhar no monitor.



Figura 2.2 - Ivan Sutherland SKETCHPAD. (*BIM A+ European*, 2019)

Os primeiros softwares de desenhos eram 2D, que vieram substituir as mesas de desenho. Este tipo de software CAD era apenas utilizado pelas empresas do setor aeroespacial e grandes empresas do sector automóvel, devido ao elevado custo dos primeiros computadores,

Na década de 70 os softwares de CAD 3D começaram a ser comercializados de forma livre, surgindo assim em 1977 o software de desenho CATIA, sendo um dos primeiros senão o primeiro que permitia desenho 2D e 3D (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Software de desenho CATIA utilizado em 1981. (Proconcept sistemas, 2018)

De todos os softwares de desenho CAD e funcionalidades destes que foram aparecendo ao longo dos anos, podemos destacar alguns marcos mais importantes pelas novas funcionalidades e inovações.

- O PRONTO® – criado em 1957 por *Prattick Hanratty*, foi o primeiro software de programação de controlo numérico comercial (CNC). Ponto de partida para o CAD.

- SKETCHPAD® – criado em 1960 por *Ivan Sutherland* e foi o primeiro software a utilizar uma interface gráfica completa. Os utilizadores utilizavam para desenhar uma caneta com luz em que o indicador no ecrã era composto por “xy”.
- ADAM® – criado em 1971 por *Prattick Hanratty*, programa escrito em Fortran e criado de modo a correr virtualmente em todas as máquinas. Software com bastante sucesso tendo sido atualizado para trabalhar com computadores de arquitetura de 16 e 32 bits. 80% dos softwares utilizados hoje em dia tem como ponto de partida o ADAM.
- IGES – formato de ficheiros que aparece em 1980, permite ao utilizador transferir os desenhos 3D entre diferentes Softwares CAD.
- CATIA® – criado em 1981 pela empresa *Dassault Systemes*, é um software CAD que ainda é utilizado nos dias de hoje.
- AutoCAD® – criado em 1982 pela *Autodesk*, é o primeiro software CAD de desenho 2D estruturado para computadores domésticos.
- Pro/Engineer® – criado em 1987, atualmente designado por *Creo*, foi o primeiro software de CAD paramétrico implementado em grande escala que se inspirou no *Sketchpad*, bastante interativo e fácil de usar. Utilizava o sistema operativo *UNIX* para trabalhar, pois os restantes sistemas não tinham os requisitos para que este funcionasse.
- STEP® – formato de ficheiros criado em 1994, assume o *IGES* como um novo formato para partilha de modelos 3D entre softwares. Foi definido como padrão internacional para transferência de modelos 3D.
- SolidWorks® – criado em 1995 pela *Dassault Systemes*, foi outro software de desenho que teve um enorme sucesso, por ser fácil de utilizar e permitir que os utilizadores aproveitassem ao máximo a tecnologia CAD 3D.
- Solid Edge® – apresentado em 1995, a *Siemens*® apresenta-o como um software de PLM (*Product Lifecycle Management*) que fornece ferramentas como modelação de sólidos, modelação de montagens e visualização 2D. Uma resposta ao sucesso do *Solid Works*®.
- Autodesk Inventor® – Criado em 1999 pela *Autodesk*® como uma forma simples e bastante intuitiva que permitia o desenho de projetos complexos de uma forma bastante rápida. Bastante utilizado atualmente.
- Autodesk 360® – criado em 2012, é uma ferramenta compacta que dá a possibilidade aos engenheiros e desenhadores de projetar, visualizar, compartilhar e reeditar projetos 2D e 3D. Ferramenta desenvolvida com base no conceito de *Cloud*.
- PTC Creo® 5.0 – aparece em 2018, uma atualização do *Creo* que incorpora recursos na área da Manufatura Aditiva, IOT, Realidade Aumentada (AR), Definição baseada em modelos (MBD).

Nos dias de hoje estes softwares estão bastante enraizados na indústria, nas mais diversas áreas desde o desenvolvimentos dos projetos até a fase de implementação, sendo mesmo quase imprescindível a sua utilização nas várias etapas decorrentes no projeto pela maneira como simplifica a comunicação entre as várias partes intervenientes no projeto, facilita a apresentação ao cliente ou mesmo ao fornecedor, permitindo assim reduzir a necessidade de recorrer a protótipos reais e dispendiosos.

2.2. Módulos Solid Edge®

Neste capítulo, para além de ser apresentado um resumo da evolução do *Solid Edge*®, este é essencialmente dedicado a descrever de forma mais ou menos resumida quais os módulos desenvolvidos para o *Solid Edge*® e que interagem com o módulo base de desenho, permitindo potencializar as ferramentas do software CAD em toda a sua plenitude. Uma vez que a esmagadora parte das ferramentas que serão descritas não estavam disponíveis na licença disponível, estas não foram exploradas de uma forma prática, sendo a sua descrição bem como as imagens apresentadas, retiradas na sua grande maioria dos casos da literatura consultada (Solid Edge, 2019). É importante aqui expressar a dificuldade em elaborar este capítulo, quer pelo facto da falta de experiência prática de utilização dos múltiplos módulos descritos, quer pelo facto de não se encontrar literatura bem organizada com a informação pretendida.

2.2.1. História

O *Solid Edge*® é um software de desenho inicialmente desenvolvido pela *Intergraph*® (Tushar, 2018) e lançado em 1996 (Figura 2.4), desenvolvido a partir da plataforma com a designação Jupiter e preparado para correr no sistema operativo *Microsoft Windows*®, esta plataforma foi a base para uma série de novos softwares de desenho 2D e 3D. Até aquela altura os softwares disponíveis utilizavam na maioria o sistema operativo Unix, que era o mais utilizado para software CAD em que a plataforma tinha a designação de *Turnkey Graphics Systems*. A *Intergraph*® foi adquirida em 2007 pela Siemens AG, que o renomeou para *Solid Edge*® - *Siemens PLM Software* que se mantém até aos dias de hoje, sendo este software uma ferramenta de trabalho que faz parte do quotidiano dos engenheiros há mais de 22 anos.

Foi dos primeiros softwares a ser acessível a quase todos os engenheiros e demonstra-se muito versátil pois foi um dos primeiros a permitir a partilha de uma forma universal dos ficheiros CAD com outras plataformas de desenho através de ficheiros com o formato IGES, STEP ou DXP. Para além de ser um software orientado para o desenho e montagens, ao contrário dos outros programas de CAD existentes na altura.

Reconhecida a vantagem e versatilidade do *Solid Edge*® pela *Kaiser Optical System*, uma das primeiras empresas a utilizar este software que trabalha na área da instrumentação espectrográfica, que quando migrou para o *Solid Edge*® do seu antigo software 2D e 3D:

“Uma característica importante é o recurso de modelação de montagem do *Solid Edge*®, que usa uma ligação em vez de camadas para incorporar componentes que já existem, dando indicação ao sistema onde encontrá-los. Agora, quando um componente é atualizado, cada conjunto, montagem que integra a ligação é automaticamente atualizado. Também obtemos uma ligação forte entre os modelos e desenhos gerados. Estes são aspetos que realmente fazem a diferença.” (Tushar, 2018)

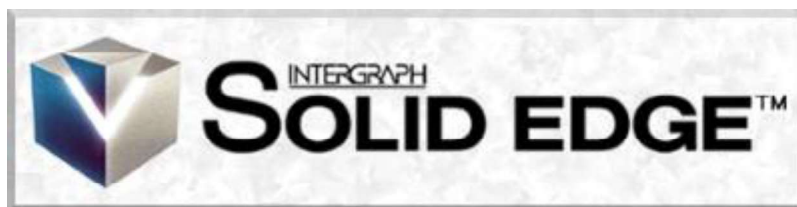
O próprio CEO da Microsoft, Bill Gates, também ficou impressionado com a versatilidade do software que comentou que: “a *Intergraph* capturou realmente a visão do futuro da Microsoft ao criar aplicações nativas do Windows CAD e aplaudimos as suas conquistas. O compromisso inicial da *Intergraph* ajudou a tornar este fenómeno possível.” (Tushar, 2018)

Isto também levou a que mais tarde fosse incluído um software de desenho técnico no lançamento do Windows.

Nos anos iniciais a *Solid Edge*[®] imitava o aspeto dos produtos Microsoft Office para criar um ambiente mais familiar para o utilizador e este ser mais intuitivo de utilizar.



(a)



(b)

Figura 2.4 - (a) Logo das primeiras versões; (b) Logo do *Solid Edge*[®] V5. (Solid Edge History, 2018).

Logo na primeira versão do *Solid Edge*[®] *version 1* lançada em 22 abril de 1996, já tinha a capacidade de trabalhar com desenhos provenientes de outros softwares como *AutoCAD* e *MicroStation*. Foi mantendo esta opção até aos dias de hoje, o que lhe confere uma enorme versatilidade face a outros softwares.

Este software foi evoluindo de modo a acompanhar as necessidades dos engenheiros nas várias áreas de aplicação, sendo um software de engenharia convencional e de projeto destinado a pequenas e médias empresas, tendo se tornado numa ferramenta bastante completa a nível de produção, pois permite criar um fluxo de trabalho com desenhos reais.

A base que está por detrás do *Solid Edge*[®] é o software *Parasolid*[®], o *kernel* de modelação *computer-aided geometric* mais usado na indústria. O *Parasolid*[®] é uma tecnologia da Siemens que oferece uma compatibilidade de 100 % nos modelos 3D entre as aplicações de desenvolvimento de produtos.

2.2.2. Módulos Integrados

De forma a se perceber como o *Solid Edge*[®] está estruturado e quais os módulos que o constituem, foi realizada uma pesquisa online, com uma maior incidência na página oficial da *Solid Edge*[®] da *Siemens*[®] para perceber as funcionalidades que são disponibilizadas aos utilizadores e como estas estão interligadas entre si. (Solid Edge, 2019).

O *Solid Edge*[®] fornece uma ferramenta para desenvolvimento de produtos da próxima geração para os engenheiros do presente a pensarem no futuro. É um software composto por vários módulos interligados entre eles, o que lhe dá uma grande capacidade de criar um bom fluxo de

trabalho, consegue abordar todos os processos de desenvolvimento de componentes/peças 3D desde da produção, simulação, tratamento de dados, renderização, entre outros. Após se estar familiarizado com o básico das ferramentas de desenho, permite criar e modificar modelos 3D digitais. O *Solid Edge*[®] oferece o compromisso da *Siemens*[®] de fornecer os recursos de transformação digital dando a possibilidade às pequenas empresas de poderem aproveitar esta tecnologia para serem mais competitivas face as grandes empresas, pelo facto de com estes programas ser possível realizar o mesmo trabalho com menos recursos, e assim reduzir o custo final do produto.

O *Solid Edge*[®] inclui também a opção integrada de análise e simulação total completa, bem como as ferramentas de manufatura aditiva e subtrativa associada a capacidade de gestão de requisitos e partilha e armazenamento de ficheiro na *cloud-based project* de forma gratuita.

O *Solid Edge*[®] disponibilizado pela *Siemens*[®], é composto por um conjunto de ferramentas que são utilizadas sem dificuldade e que são disponibilizadas a um preço acessível para pequenas e médias empresas, desenhistas e engenheiros, *startups*, sendo possível ainda obter uma licença gratuita para professores, estudantes ou mesmo para pessoas que estejam interessadas em aumentar o seu conhecimento e as suas habilidades. Logo no menu inicial existe um separador com o nome *Learn* (Figura 2.5), onde estão disponíveis tutoriais, um grande conjunto de informação para ajudar o utilizador que tenha pouca experiência em desenho ou que esteja pouco familiarizado com o *Solid Edge*[®].



Figura 2.5 - Menu Learn.

Para facilitar o trabalho de quem se desloca em trabalho, o *Solid Edge*[®] oferece um serviço de **Cloud-enabled Design** (Figura 2.6) que permite o acesso fácil ao CAD 3D através de diferentes dispositivos, desde que tenham o *Solid Edge*[®] *Cloud-ready* instalado na máquina a ser utilizada, com uma capacidade de configuração quase instantânea do ambiente CAD de acordo com as preferências de cada utilizador, tendo a capacidade de desenho baseada na nuvem, permite o acesso de uma forma fácil ao CAD 3D profissional, assim como a partilha rápida de dados através das várias partes envolvidas ou mesmo fornecedores e clientes. Este tipo de capacidade de trabalho em *Cloud-Based* permite reduzir as necessidades de suporte técnico de informática

constante para o ambiente CAD, libertando assim este recurso para trabalhar em outros projetos, que visam melhorar a produtividade, não tendo assim a necessidade de manutenção diária do sistema.

O *Solid Edge*[®] retira o máximo proveito da capacidade de processamento do equipamento que o utilizador está a usar, garantido a fiabilidade e um rápido tempo de resposta. Os arquivos são armazenados na *cache* do equipamento, por forma a garantir ainda mais fiabilidade e melhor desempenho, caso exista alguma interrupção da internet. O utilizador pode continuar a trabalhar sem interrupções e assim que a ligação for retomada, o software faz o upload de todas as alterações por ordem de utilização.

A licença CAD pode ser guarda na nuvem (*Cloud*) e com um simples *login* consegue-se executar o *Solid Edge*[®] em qual lugar. Isto permite trocar de forma mais fácil de equipamento de trabalho, trabalhar no escritório do cliente ou mesmo a partir de casa. Permite ainda utilizar softwares já existentes de partilha de ficheiros ou mesmo para realizar backup, tais como *Dropbox*, *Microsoft One Drive*, *Google Drive*, entre outros.



Figura 2.6 - Exemplo de *Cloud-enabled Environment*. (*Solid Edge*, 2019)

Os vários módulos que compõem o *Solid Edge*[®] são: *Mechanical design*, *Electrical design*, *PCB e Harness Design*, *Manufacturing*, *Simulation*, *Technical Publications*, *Data Management*, *3D Printing e Reverse Engineering*, os quais serão em seguida resumidamente descritos.

2.2.2.1. *Solid Edge*[®] *Mechanical Design*

O *Solid Edge*[®] *Mechanical Design*, projeto mecânico, (*Solid Edge*, 2019) é um software que se refere como rápido, flexível e de desenho da próxima geração. Completo com ferramentas de projeto poderosas com otimização de topologia, modelação generativa de geometrias, com a capacidade de acelerar a criação de componentes mais leves, componentes esses perfeitamente adequados para a produção por processos de adição. Ou pode mesmo ser usado

para aprimorar mais a forma do objeto para um fabrico mais tradicional, por subtração de material. O *Solid Edge*® tem como objetivo tornar mais rápido e simples o desenvolvimento de peças ou montagens, diminuindo as perdas de tempos para atualizar as montagens ou desenhos 2D. Consegue esta inovação recorrendo à **tecnologia síncrona (*Synchronous Technology*)** que torna a criação e edição de desenhos 3D CAD mais rápida e fácil combinando velocidade e simplicidade da modelação direta com a flexibilidade e controlo do design paramétrico.

Este tipo de tecnologia permite criar rascunhos 2D e 3D de uma forma rápida, alterar um componente de forma fácil e rápida quando solicitado e também realizar alterações simultâneas em várias peças dentro de uma montagem. Com esta ferramenta podemos evitar falhas de recursos, problemas de reconstrução e de redesenhar componentes que possam ser demorados. O poder da tecnologia síncrona permite trabalhar dados provenientes de múltiplos softwares CAD como se fossem ficheiros nativos suportando a colaboração de fornecedores e outros parceiros, sendo assim possível importar um ficheiro 3D CAD proveniente de outra plataforma, abrir o desenho e editá-lo da forma como se fosse um desenho nativo do *Solid Edge*®, atualizando de forma automática todo o histórico do componente. O poder exclusivo desta tecnologia síncrona permite uma colaboração fácil entre fornecedores e parceiros.

O *Solid Edge*® permite também dar resposta rápida às alterações do projeto realizadas já num estágio bastante tardio de desenvolvimento, quando uma última alteração surge perto do prazo de entrega esta tecnologia permite fazer as alterações necessárias de uma forma fácil e rápida, mesmo em modelos 3D CAD. Atualizando simplesmente as dimensões de referência, ou alterando diretamente a geometria, podemos realizar alterações rapidamente sem preocupações com falhas, problemas de reconstruções ou com retrabalho demorado. Executa as alterações em todos os ficheiros ligado à peça como nas montagens (assembly), a peças isoladas, desenhos 2D, limitando assim a possibilidade de falhas.

Neste programa após ser desenhado o componente com as ferramentas de desenho 2D ou 3D, existem à disposição algumas ferramentas que permitem otimizar o tempo de desenvolvimento do projeto, tal como o *PMI* (Product Manufacturing Information), *Simulation*, *Generative Design* e *Reverse Engineering*.

Como a ferramenta de *PMI* (Informação sobre produção das peças) podemos adicionar as dimensões ou mesmos anotações, como símbolo de soldadura, balões de anotações nas peças ou mesmo na montagem, de uma forma simples e intuitiva, tal como se encontra representado na Figura 2.7.

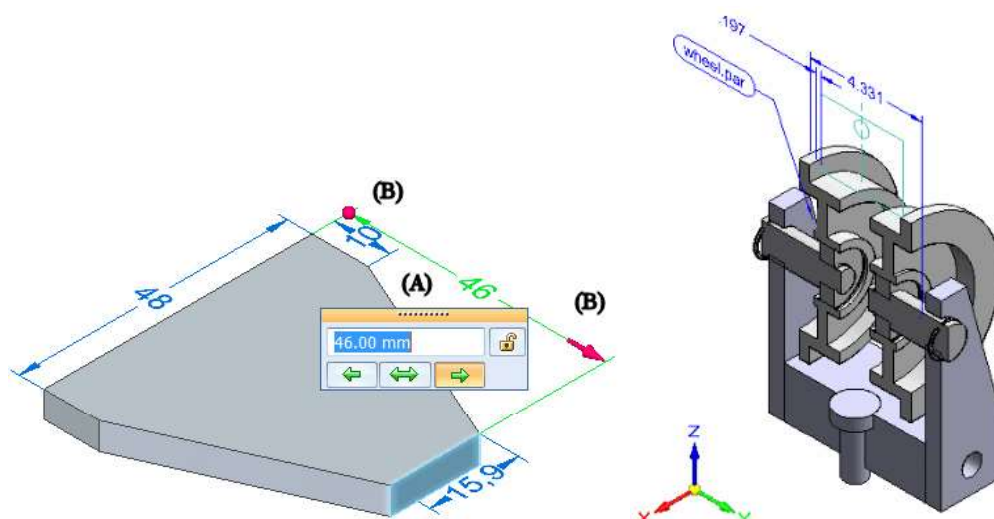


Figura 2.7 - Exemplo de Cotagem através de PMI. (Solid Edge, 2019)

O **Solid Edge® Simulation** tem uma componente de simulação que permite fazer simulações logo numa fase inicial do projeto, numa altura em que se tem menos componentes e assim podemos proceder aos testes e realizar as alterações necessárias de forma mais simples. Para além disso permite também fazer simulações com muita precisão em modelos completos e complexos que vai permitir reduzir o número de protótipos e consequentemente reduzir o tempo e custo de produção. Esta ferramenta é baseada numa tecnologia de modelação de elementos finitos *Femap* e do *NX Nastran*, programas bastante consolidados no mercado (Figura 2.8).

De uma forma resumida, pode-se dizer que as ferramentas incluídas no *simulation* incluem simulação de uma única peça, simulação de esforços numa montagem e dinâmica de fluidos computacional (CFD), existindo também uma ferramenta integrada que permite uma análise de elementos finitos (FEA) por forma que se consiga validar os componentes ou montagens no ambiente *Solid Edge®*.

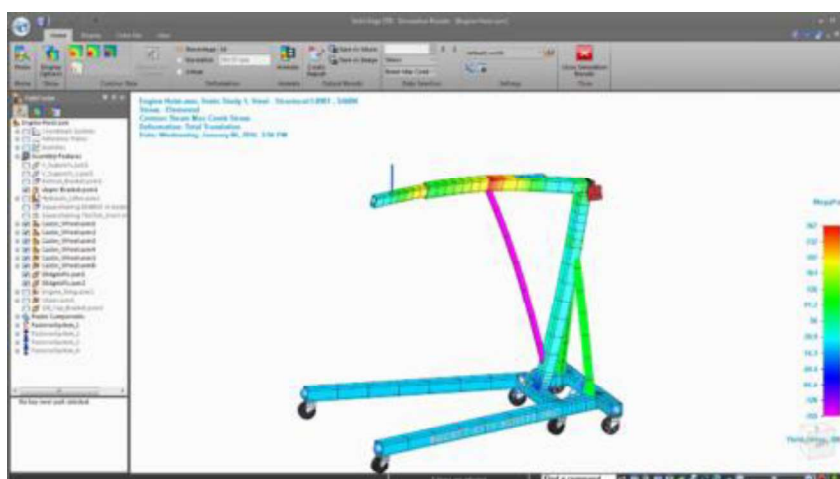


Figura 2.8 - Exemplo de análise de elementos finitos. (Solid Edge, 2019)

As funcionalidades deste componente englobam a criação de forma automática de modelos de elementos finitos para estruturas sólidas e de chapa metálica, sendo possível ainda refinar a malha de modo a obter resultados mais precisos. Para a montagem existe ainda a capacidade de

detetar o contacto entre superfícies de forma automática calculando essas interações de uma forma realista.

Este software tem a capacidade de criar condições de fronteira para ambientes de simulação mais realistas de modo a que se possa obter um resultado mais real e próximo das condições de trabalho/aplicação do componente. Engloba também uma ferramenta Simulação Térmica (Figura 2.9) de forma a analisar o comportamento térmico, transferência de calor tanto em aquecimento como em arrefecimento, transição da transferência de calor com os resultados a apresentarem os tempos relativos a cada um dos componentes.

Engloba também ferramentas gráficas muito abrangentes de pós-processamento, que nos permite interpretar e entender o comportamento do componente em estudo. Se for verificado que é necessário proceder a alterações no desenho, a tecnologia síncrona torna essas alterações muito mais fáceis.

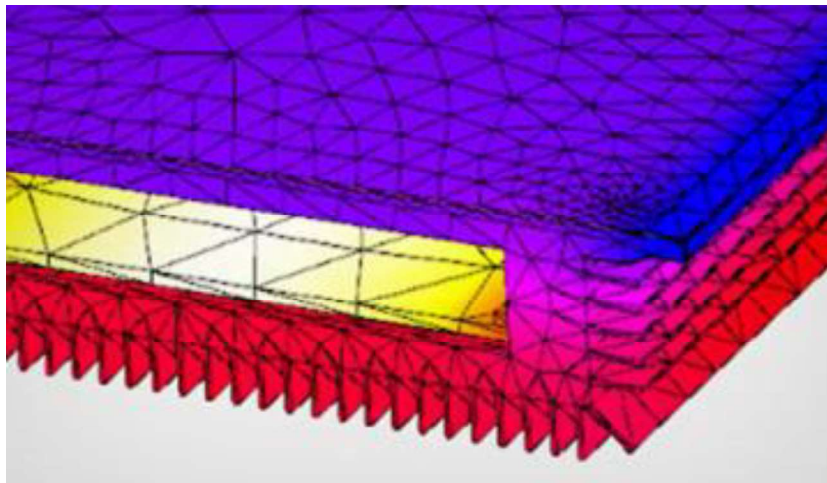


Figura 2.9 - Exemplo de análise térmica. (Solid Edge, 2019)

Com uma simulação de movimento completa permite visualizar o funcionamento real dos componentes na montagem como se fossem componentes reais. Engloba também funções de análise de tensão em estruturas que permitem analisar vigas com cargas elevadas, estudando assim a tensão causada pela carga. Nas estruturas simula a carga em que as mesmas se tornam instáveis, sendo esta funcionalidade bastante importante em montagens com componentes com um comprimento considerável. É também possível a análise de vibração para determinar as frequências naturais de um componente ou montagem em vibração livre.

O Solid Edge® engloba uma opção de simulação de fluxo para **dinâmica de fluido computacional (CFD)** designada por FloEFD que permite uma análise mais fácil, rápida e com bastante precisão da transferência de calor e fluxo de fluidos (Figura 2.10).

Esta ferramenta é adequada para ser usada durante o processo de desenho da peça, pois consegue uma redução de tempos entre os 65-75 % comparado com outras ferramentas utilizadas no mercado. Com uma funcionalidade de estudo paramétrico e comparação de desenho integrada, permite compreender a influência que pode ter uma alteração de geometria ou restrições de contacto nos resultados, pois compara uma ampla gama de variáveis do projeto. Podendo os dados serem avaliados através de gráficos, animações ou valores numéricos.

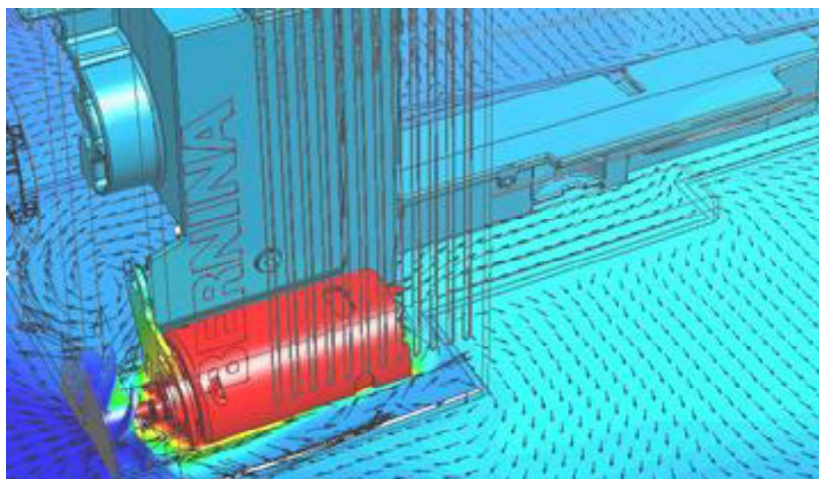


Figura 2.10 - Exemplo de simulação de fluxo de calor. (Solid Edge, 2019)

O projeto **iterativo incorpora a componente de otimização** no *Solid Edge*® dando aos desenhistas/projetistas a possibilidade de definem um material específico para o projeto, um espaço de projeto, as cargas aplicadas, as restrições permitidas e o peso pretendido, sendo o programa a calcular automaticamente a solução geométrica (Figura 2.11). Estas poderosas ferramentas de desenho 3D direcionadas para a otimização de geometria originam componentes mais leves levando a um menor desperdício de material durante a produção, gerando formas complexas para a fundição ou fabrico por adição de grande precisão, mantendo sempre uma relação entre peso e a resistência.



Figura 2.11 - Exemplo de componente antes e após otimização. (Solid Edge, 2019)

Inclui também otimização da topologia para peças CAD, em que baseado nos parâmetros introduzidos, como o tipo de material do componente, o espaço de projeto, cargas permitidas e restrições, o software vai gerar uma geometria de massa reduzida que mantenha a integridade estrutural, executando vários estudos com várias cargas e restrições.

As peças que resultam de um processo de geração iterativa, por vezes têm uma geometria complexa que, ao terminar este processo estão prontas para produção por adição, como por exemplo impressão 3D (Figura 2.12).

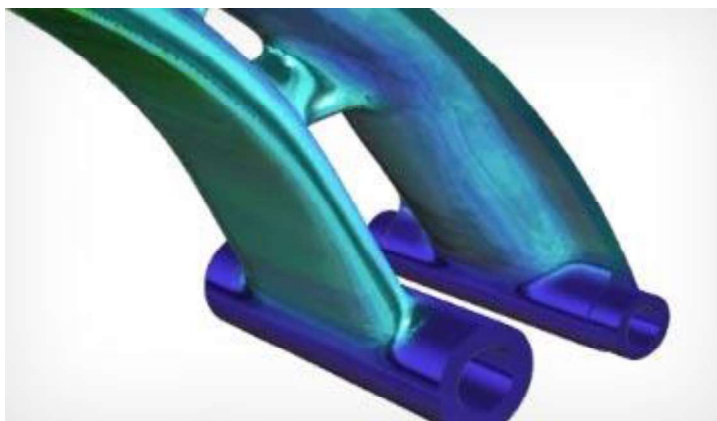


Figura 2.12 - Geometria complexa para impressão 3D. (Solid Edge, 2019)

É possível evoluir o projeto ainda mais recorrendo a tecnologia de convergência, os componentes otimizados provenientes de projeto iterativos podem ainda ser modificados recorrendo a modelação convergente e a tecnologia síncrona em que os resultados da malhagem são integrados de uma forma perfeita no processo de edição do componente permitindo ter todo o processo necessário para a execução.

A **modelação de convergência** no *Solid Edge*[®] combina perfeitamente modelos sólidos tradicionais *B-rep* com os modelos de malhagem triangular, sem a conversão demorada e propicia a erros. A modelação convergente da Siemens permite realizar as tradicionais operações *B-rep* em dados e modelos 3D analisados digitalmente que sejam resultantes do projeto iterativo reduzindo assim o trabalho de redesenhar, suportando ao mesmo tempo processos modernos de fabrico por adição.

A modelação convergente visa simplificar o processo de trabalhar com os dados digitalizados, pois estes são digitalizados em 3D e importados para o *Solid Edge*[®] como superfícies ou em malha de modo a ser possível começar logo a desenhar, sem ter de passar por um processo demorado de conversão e a criação manual de formas ou superfícies.

Na **engenharia inversa** (*Reverse Engineering*) o *Solid Edge*[®] oferece ferramentas inteligentes para trabalhar com malha (*mesh*) ou dados baseados em triângulos (Figura 2.13). As geometrias podem ser importadas de outros ficheiros, geometrias digitalizadas ou mesmo provenientes de projetos iterativos. Estes dados são importados numa malha triangular e em muitos casos é necessário proceder a correções no desenho. Para isso o *Solid Edge* fornece ferramentas bastante intuitivas, de limpeza de malha, de modo a remover alguns erros que possam ocorrer no processo de importação da geometria, permitindo assim obter uma malha completa. Dá-nos a possibilidade de criar malhas (*meshes*) trabalháveis, pois os corpos no formato de malha importados nem sempre cumprem os requisitos impostos pela aplicação. Assim o *Solid Edge*[®] oferece ferramentas para remover superfícies específicas ou mesmo regiões da malha, preencher furos e suavizar a malha para criar uma peça pronta para fabrico ou para continuar o projeto.

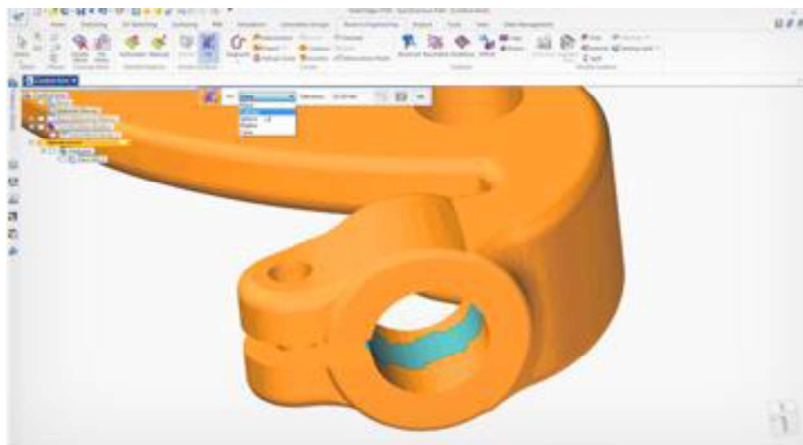


Figura 2.13 - Exemplo de funcionalidade da engenharia inversa. (Solid Edge, 2019)

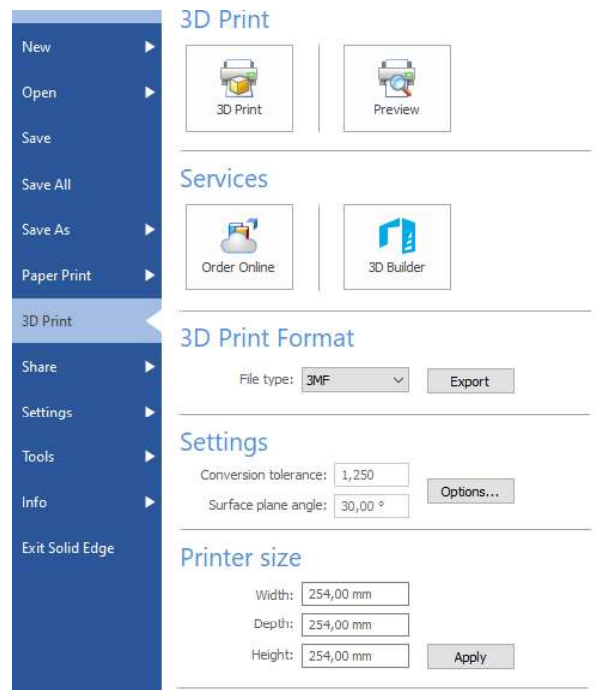
O verdadeiro poder da engenharia inversa é notado ao criar superfícies nativas em cima dos dados importados. O *Solid Edge*® oferece comandos para extrair faces identificadas nas regiões da malha e também tem a capacidade de encaixar faces analíticas em cima de uma região.

Independentemente de os componentes serem criados através da modelação tradicional, de um projeto iterativo ou mesmo importado de um scanner 3D, estes podem ser usados logo para **impressão 3D**, projeto de moldes, análise, etc. A modelação convergente remove as limitações dando flexibilidade aos desenhadores de poder tornar realidade os produtos otimizados através do recurso a novos materiais e técnicas de fabrico por adição (Figura 2.14).

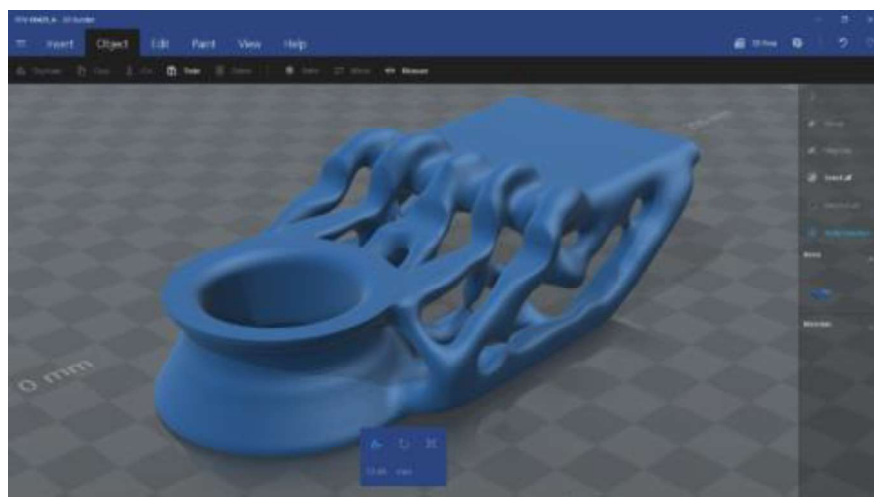


Figura 2.14 - Componente otimizado para impressão 3D. (Solid Edge, 2019)

O *Solid Edge*® permite imprimir diretamente para a **impressora 3D**, através da opção 3D Print existente no menu. Dá a opção de gravar as peças no formato Stl, 3MF ou mesmo utilizar a aplicação da *Microsoft*® *3D Builder* onde é possível obter uma pré-visualização da peça e colocá-la em posição para a impressão 3D, para posteriormente transferi-la para uma impressora própria ou enviá-la para um serviço de impressão na Cloud (Figura 2.15). Inclui também a capacidade de impressão a cores da peça, recorrendo a impressoras que utilizam tinteiros de cor em conjunto com filamento de PLA que tem a capacidade de absorver as cores, permitindo assim a criação de componentes para aplicações específicas.



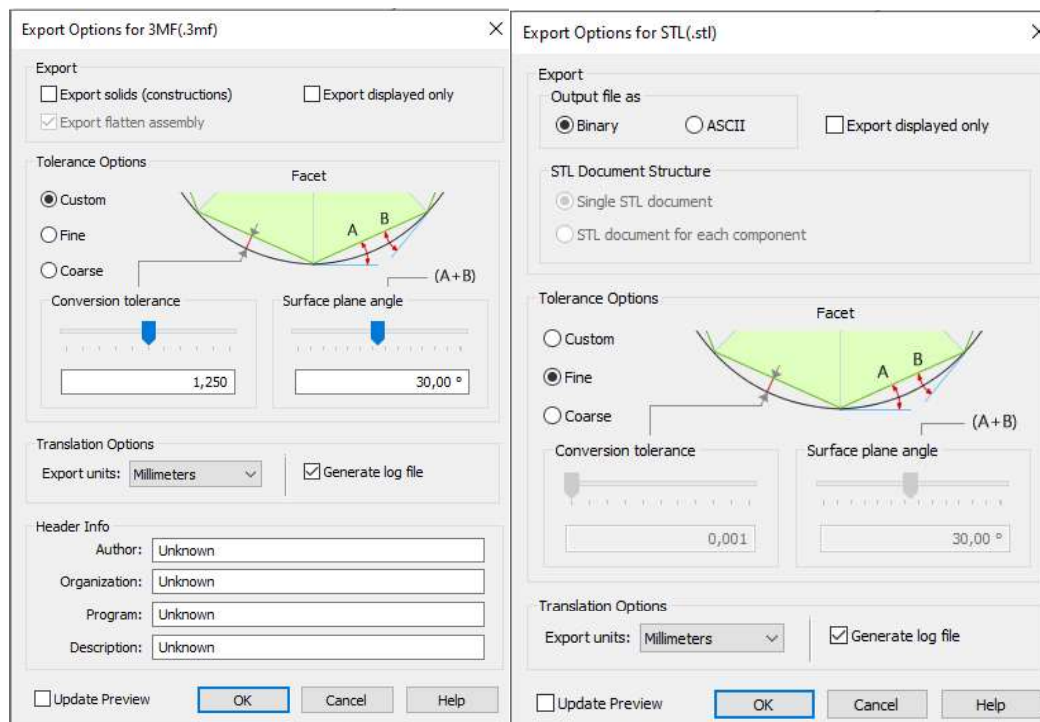
a)



b)

Figura 2.15 - a) Exemplo do Menu 3D Print, b) *Microsoft® 3D Builder*. (Solid Edge, 2019)

Na opção da escolha dos formatos de impressão 3D (Figura 2.16) podem ainda ser seleccionadas várias opções, como a **tolerância dos pontos das faces** e o formato das unidades em que é exportado o modelo.



(a)

(b)

Figura 2.16 - Opções disponíveis para os formatos (a) *.3MF; (b) *.STL.

Os componentes desenhados com o objetivo de serem produzidos através do método de **produção por adição de material**, como a **impressão 3D**, são sempre desenhados tendo em conta o método de impressão e qual a aplicação que esse componente vai ter. Seja ele um protótipo ou um componente final, o *Solid Edge*[®] oferece uma vasta gama de ferramentas de trabalho que têm a capacidade de suportar o fluxo de trabalho desde o início do desenho até ao fim da preparação para impressão (*end-to-end workflow*).

O programa oferece ainda a oportunidade de explorar os desenhos através da capacidade de otimização da topologia das peças com recurso a um processo iterativo, o que permite criar componentes com menos massa e com materiais mais leves, com formas bastante complexas em que a sua produção apenas se torna possível através do recurso às mais recentes técnicas de produção por adição, como impressão 3D, seja em metal ou outro tipo de material (Figura 2.17).



Figura 2.17 - Otimização para produção por adição (Impressão 3D). (Solid Edge, 2019)

O *Solid Edge*® combina de uma forma perfeita os modelos de sólidos b-rep com os de malha triangular sem grandes perdas de tempo e conversões que depois induzem em erro, reduzindo assim o tempo necessário para corrigir o componente e passar logo à produção através dos métodos mais recentes de produção por adição de material. É possível ainda enviar os componentes para os serviços de impressão 3D baseados na nuvem (*Claud-based 3D printing services*) com a opção “*Order Online*” que direciona para a **3YOURMIND**, onde é obtido logo um orçamento com preços para os vários tipos de material e os métodos de produção utilizados, prazos reais de produção e entrega do componente na localização pretendida (Figura 2.18).

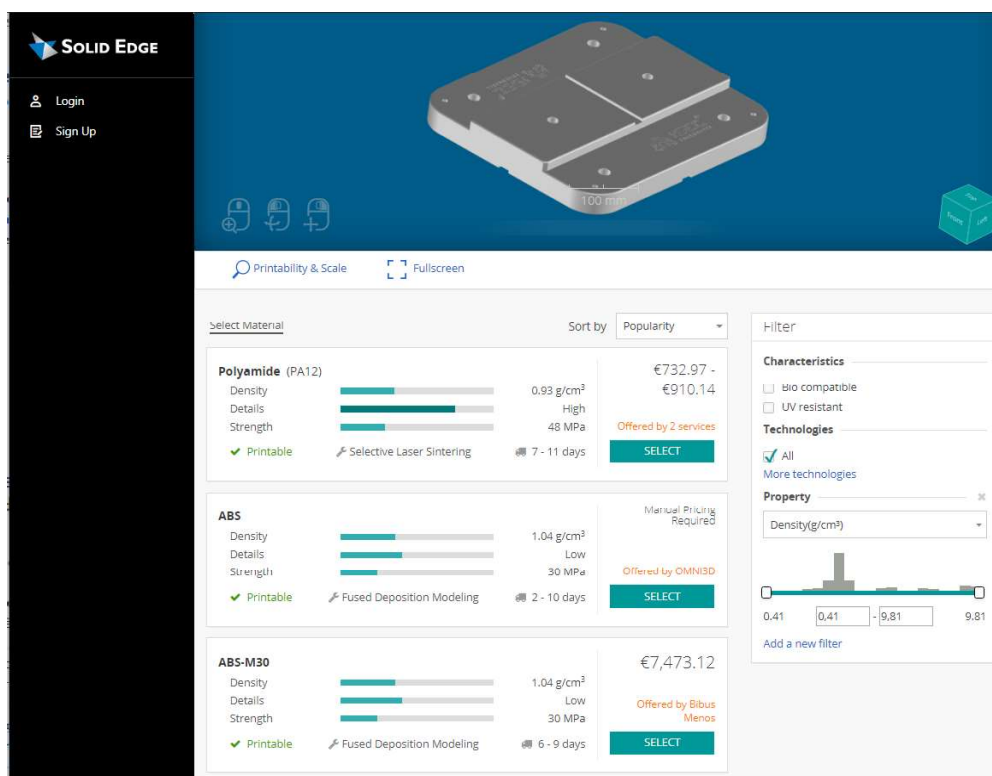


Figura 2.18 - Exemplo de opções disponíveis para impressão 3D.

Sendo ainda possível escolher entre os fornecedores disponíveis para a mesmo tipo de material, e optar pelo mais vantajoso (Figura 2.19).

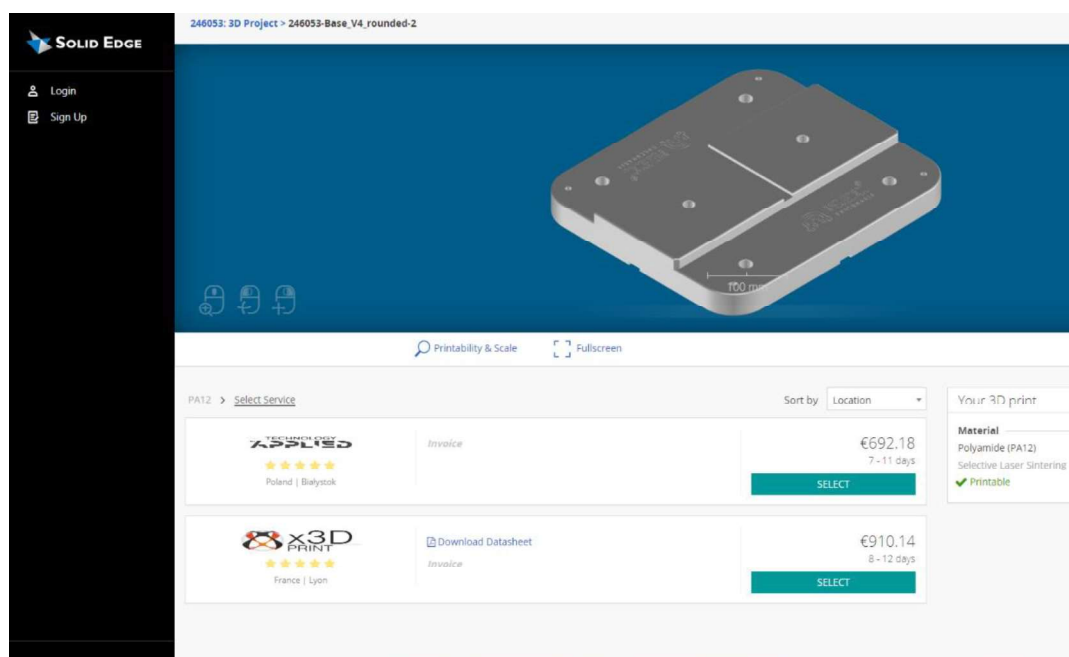


Figura 2.19 - Fornecedores disponíveis para o material selecionado.

Os **desenhos 2D e rascunhos de CAD** podem ser a parte final para muitos projetos pois são muita das vezes a ligação entre o projeto e a produção o que implica que estes desenhos necessitam de ser precisos. O desenho e a montagem dos produtos estão a evoluir tornando-os cada vez mais complexos em que estes têm de respeitar as normas globais, desde a criação, anotação e atualização. Tendo em conta estes requisitos, o *Solid Edge*[®] consegue definir as normas do rascunho que pretendemos e posteriormente o *layout* do desenho e o detalhe pretendido. A anotação e o controlo do dimensionamento seguem automaticamente essa norma.

O *Solid Edge*[®] engloba ainda a funcionalidade de **desenho e documentação CAD simplificados**, conseguindo-se assim criar e atualizar de forma automática os desenhos de modelos 3D, criar de uma forma mais rápida vistas padrão, incluindo vistas auxiliares, de secção, detalhe, corte parcial e vista isométrica. É possível também criar de uma forma automatizada vistas explodidas com ou sem listas de componentes e listas de material para modelos de qualquer tamanho (Figura 2.20).

Pode-se ainda escolher uma série de diferentes opções de visualização, como por exemplo colocar sombra, para garantir que a compreensão da peça seja o mais clara possível. Quando são efetuadas alterações no modelo 3D, ao voltar ao desenho 2D é mostrado um alerta gráfico onde ocorreram as alterações. Quando os desenhos forem guardados os campos com o título são preenchidos automaticamente com os dados do arquivo de peças.

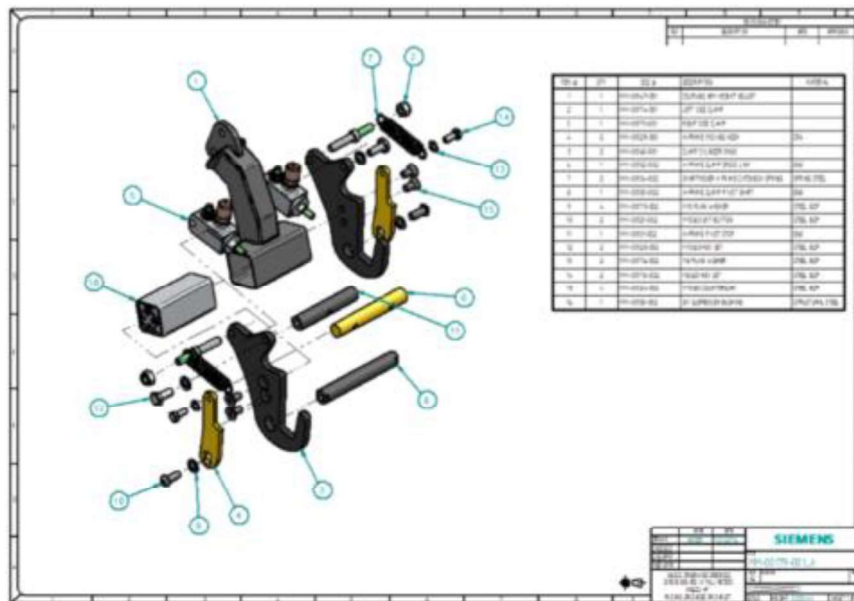


Figura 2.20 - Exemplo de vista explodida com lista de componentes. (Solid Edge, 2019)

O *Solid Edge*[®] está otimizado para tirar partido das novas arquiteturas dos processadores de vários núcleos de modo a otimizar a velocidade e a performance, para melhorar o desempenho durante a criação ou atualização de desenhos, criar ou atualizar montagens e permite escolher entre visualizações com qualidade rascunho ou com alta qualidade. Além disto, permite definir vistas nos desenhos com base numa consulta por pesquisa e desativar todos os componentes que não são essenciais para a finalidade da vista (Figura 2.21).

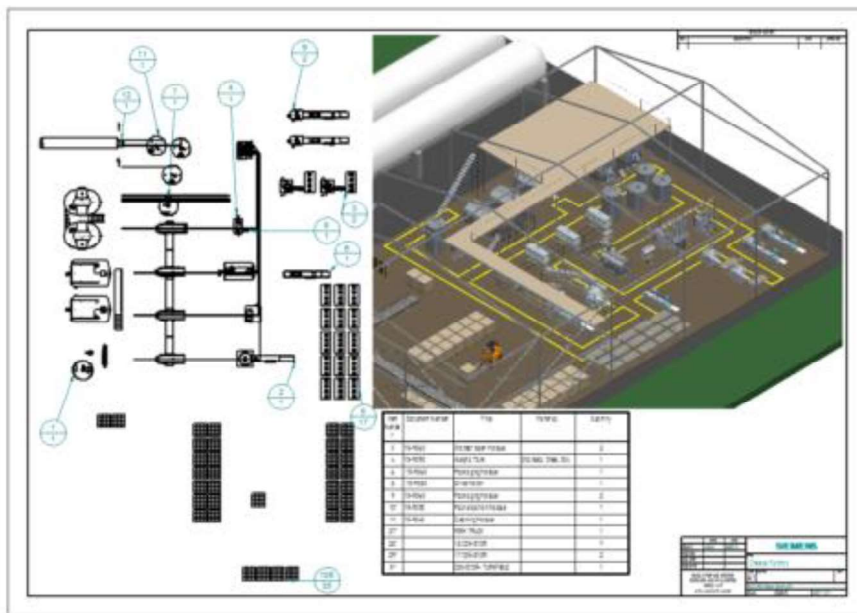


Figura 2.21 - Exemplo de otimização de vistas. (Solid Edge, 2019)

Inclui também uma componente de **dimensionamento e anotações de desenho mais fáceis** comparado com os seus concorrentes, pois as ferramentas abrangentes de dimensionamento e anotação permitem criar cotagens em desenhos de uma forma mais rápida (Figura 2.22). Os modelos *QuickSheet* podem ser usados para completar um desenho com normas predefinidas

como visualizações, listas de peças e anotações. Estas visualizações podem ser criadas automaticamente a partir da peça 3D, podendo depois ser alteradas através de um complemento de dimensões e anotações que também se encontra disponível.

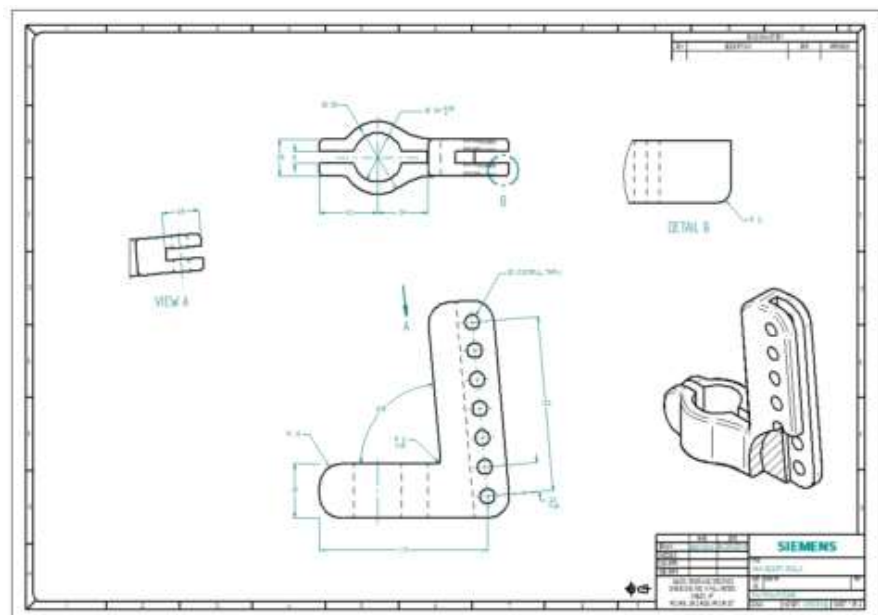


Figura 2.22 - Exemplo de desenho rápido. (*Solid Edge*, 2019)

Existe também um **suporte para padrões globais de desenho CAD** com *layout* simples de desenho, de diagramas, anotação e cotação de desenhos que cumprem de uma forma automática as normas de rascunho standard, incluindo as normas ISO, ANSI, BSI, DIN, JIS, entre outras.

Com o *Solid Edge*[®], têm-se todo o controlo sobre os elementos de desenho, permitindo assim que se façam as alterações necessárias caso as normas alterem (Figura 2.23).

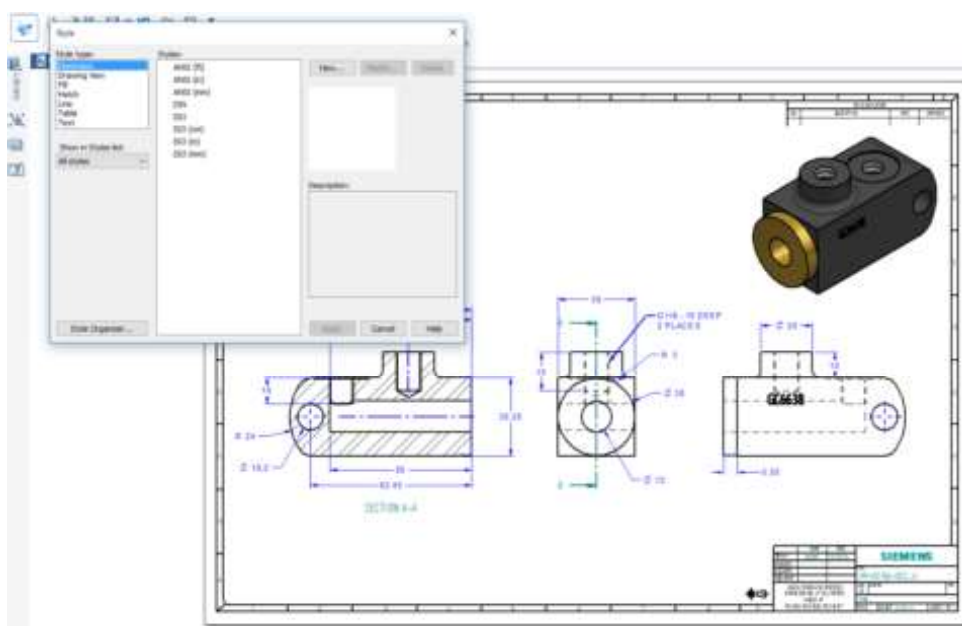


Figura 2.23 - Exemplo de *CAD Standard* definido de acordo com a norma seleccionada. (*Solid Edge*, 2019)

Existe também uma opção de **desenhos com precisão de peças em chapa metálica**, onde podemos documentar a produção de peças em chapa com tabelas onde se coloca a sequência de dobras, ângulo e direção a efetuar na chapa (Figura 2.24).

A lista de peças com balão automático pode ser adicionada a desenhos com montagem, onde a lista corresponde exatamente às peças do modelo, mesmo para componentes ou acessórios que não estejam presentes ou que não sejam físicos, como o caso da pintura.

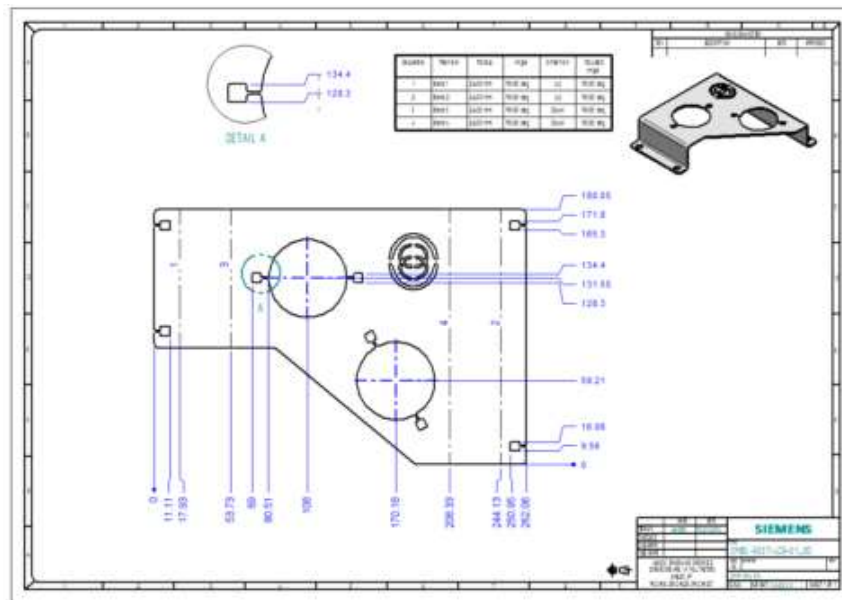


Figura 2.24 - Exemplo de lista para produção de uma chapa metálica. (Solid Edge, 2019)

Para os projetos que englobam trabalhar com chapa metálica o *Solid Edge*® tem uma componente que permite superar diversos dos desafios impostos pelo projeto tornando assim mais rápido o desenvolvimento de projetos em chapa metálica. Como referido anteriormente, a capacidade de criar listas das operações a serem realizadas na produção, é proveniente de um conjunto de ferramentas específicas para chapa metálica como por exemplo dobrar/quinar, gravar, cortar, flange de corte, entre outras (Figura 2.25). O módulo de chapa metálica inclui também opções de análise, programação NC entre outras opções de modo a reduzir o tempo de desenvolvimento do projeto e assim reduzir os custos.

O módulo de chapa metálica inclui também a capacidade de reutilizar de uma forma simples os projetos 3D fornecidos por clientes ou fornecedores, sendo possível converter o modelo de chapa metálica em partes que podem ser utilizadas e onde se podem realizar as alterações necessárias, como se fosse um ficheiro nativo. Ao importar os ficheiros o *Solid Edge*® tem a capacidade de reconhecer parâmetros como espessura e curvatura o que facilita a edição dos mesmos.

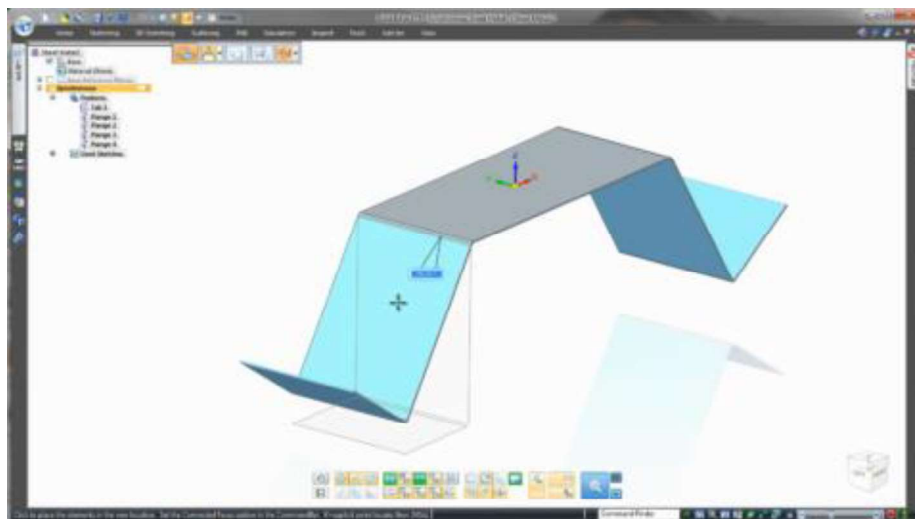


Figura 2.25 - Projeto chapa metálica. (Solid Edge, 2019)

Este módulo incorpora também “sensores” que medem automaticamente parâmetros como a distância entre dobras efetuadas e a área da superfície. Fornece também o recurso a elementos finitos de modo a realizar simulações em fases iniciais do projeto, sendo assim possível melhorar a qualidade das peças e ao mesmo tempo reduzir as falhas, minimizar o material e o peso, e diminuir a necessidade de protótipos físicos a um número mínimo (Figura 2.26).

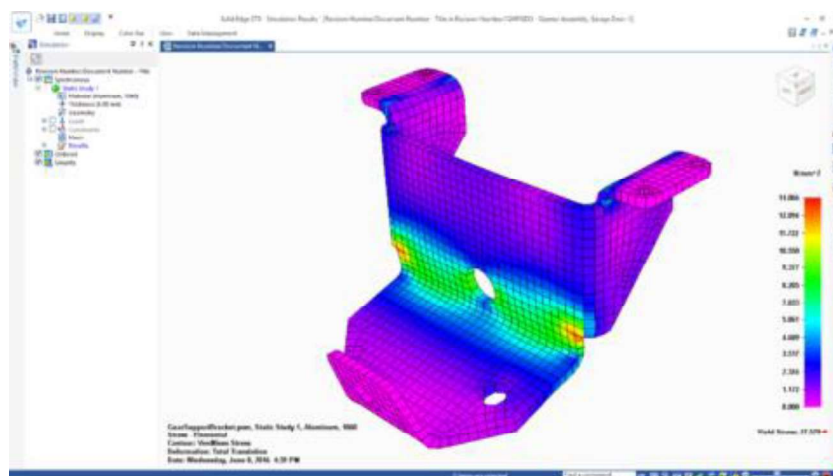


Figura 2.26 - Exemplo de malhagem de chapa. (Solid Edge, 2019)

Para a representação do componente final, o *Solid Edge*® tem um módulo de montagem e gestão que suporta desde a montagem mais simples até à mais complexa, pois nos dias que correm as montagens têm cada vez mais componentes, à medida que os projetos vão ficando mais complexos. Este módulo permite realizar montagens bastante exatas com todos os componentes, como por exemplo tubos, fios, soldadura e chapa metálica, para uma simulação completa, de modo a permitir uma análise de projeto mais precisa. Consegue-se assim analisar e identificar possíveis interferências, bem como criar instruções de montagens ou mesmo apresentar o produto ao cliente sem a necessidade de produzir um protótipo real, sendo assim possível baixar os custos de produção.

Para grandes montagens o *Solid Edge*® utiliza técnicas de gestão de memória que permite ao utilizador organizar de uma forma fácil toda a montagem, desde criar, carregar e realizar

atualizações de forma rápida nas grandes montagens e mesmo nos desenhos que estão associados à montagem. A Simplificação de montagens, definição das zonas de montagem e navegação só da estrutura permitem libertar a memória do sistema o que permite apresentar gráficos 3D melhorados (Figura 2.27). Através da modelação na montagem, é possível posicionar submontagens complexas dentro das montagens principais e alternar entre vistas simplificadas ou detalhadas de uma forma rápida. É possível também transformar submontagens em componentes independentes, permitindo assim melhorar o desempenho.



Figura 2.27 - Exemplo de uma montagem grande. (Solid Edge, 2019)

O Solid Edge® tem a capacidade de criar uma montagem realista com os componentes/peças finalizadas em que podemos ter um produto próximo do real para mostrar aos clientes, sem ter a necessidade de ter o produto físico. Existem várias opções que se podem configurar como a posição da luz de modo a criar sombras e os reflexos para melhorar a perceção do objeto, realizar simulações de movimento ou mesmo vistas explodidas em 3D, que permitem criar guias de montagem ou manuais de manutenção (Figura 2.28). Nas simulações de movimento, podem ser guardadas sob a forma de vídeo para mostrar aos clientes posteriormente.



Figura 2.28 - Vista explodida 3D. (Solid Edge, 2019)

Criar uma imagem 3D realista mais próxima possível do produto acabado pode ajudar na comunicação entre todos os departamentos que participam no projeto ou mesmo na apresentação do produto ao cliente. A vantagem da renderização está na possibilidade de gerar imagens com uma qualidade de fotografia mesmo antes de ser iniciado qualquer processo de produção da peça, mantendo assim os custos de produção baixos, o que leva a um preço do produto final mais baixo (Figura 2.29).

Com o **KeyShot** no **Solid Edge**[®], a renderização 3D torna-se mais simples e fácil, pode-se alterar os materiais, iluminação e ambiente envolvente, escolhendo as opções e materiais desejados a partir de uma enorme biblioteca de materiais opcionais, esquema de iluminação e cores bem como planos de fundo, para isso basta arrastar e soltar na área de edição.

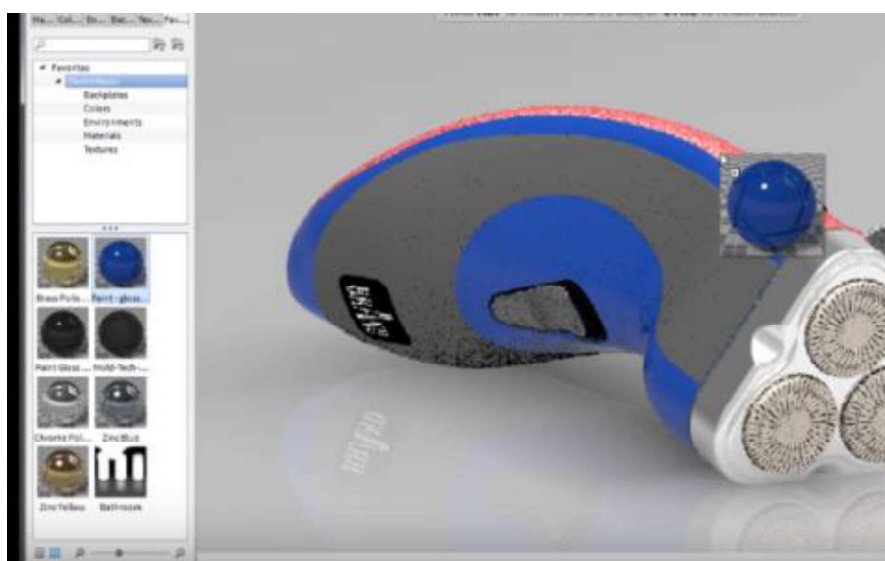


Figura 2.29 - Exemplo de renderização 3D. (Solid Edge, 2019)

Dentro do módulo da montagem existe também uma opção para construir moldes designada de **Mold Tooling** (Figura 2.30), a qual permite criar moldes para produzir componentes por moldação por injeção de plástico. Este módulo proporciona uma substancial redução de tempo na elaboração do molde, pois elimina muitas das operações repetidas, criando de uma forma muito precisa a cavidade e bucha, oferece uma vasta escolha de moldes *standard* usuais na indústria, gera de forma automática os componentes necessários e cria o desenho do respetivo eletrodo associado. O **Solid Edge**[®] **Mold Tooling** completa os desenhos dos moldes de uma forma mais rápida a um custo mais baixo.

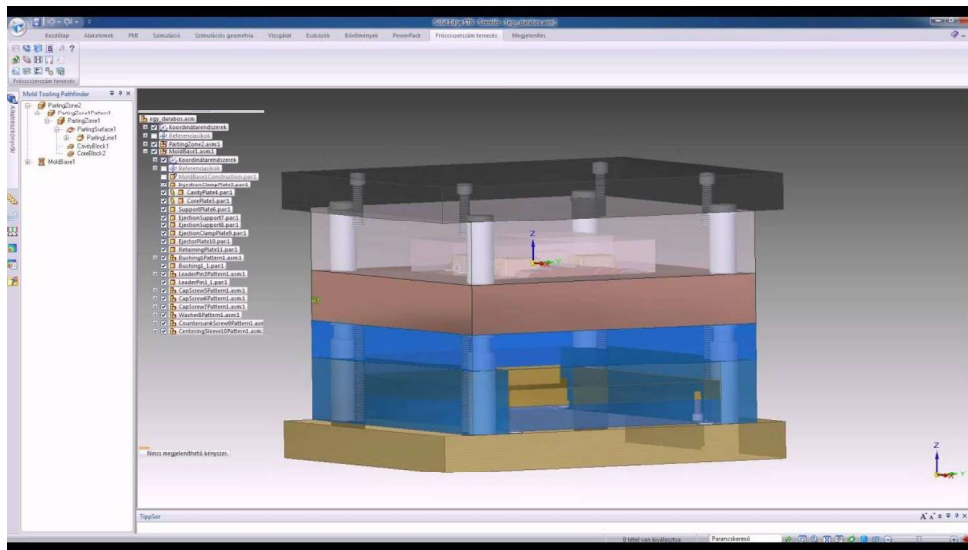


Figura 2.30 - Exemplo de aplicação do módulo *Mold Tooling*. (Solid Edge, 2019)

Para tornar mais prática a partilha de informação e dar a conhecer a clientes e fornecedores um modelo 3D, uma montagem com vários componentes ou apresentar desenhos 2D, é disponibilizado de forma gratuita a aplicação **Solid Edge® Free Viewer**, a qual está também disponível para dispositivos móveis através do *Google Play*, *Apple Store* e *Windows Store* de forma gratuita. Este programa permite visualizar uma peça ou uma montagem e na montagem permite isolar um componente para o analisar de forma independente. É possível também enquadrar o componente 3D no meio em que vai ser aplicado através da camera fotográfica do dispositivo, tal como se exemplifica na Figura 2.31.

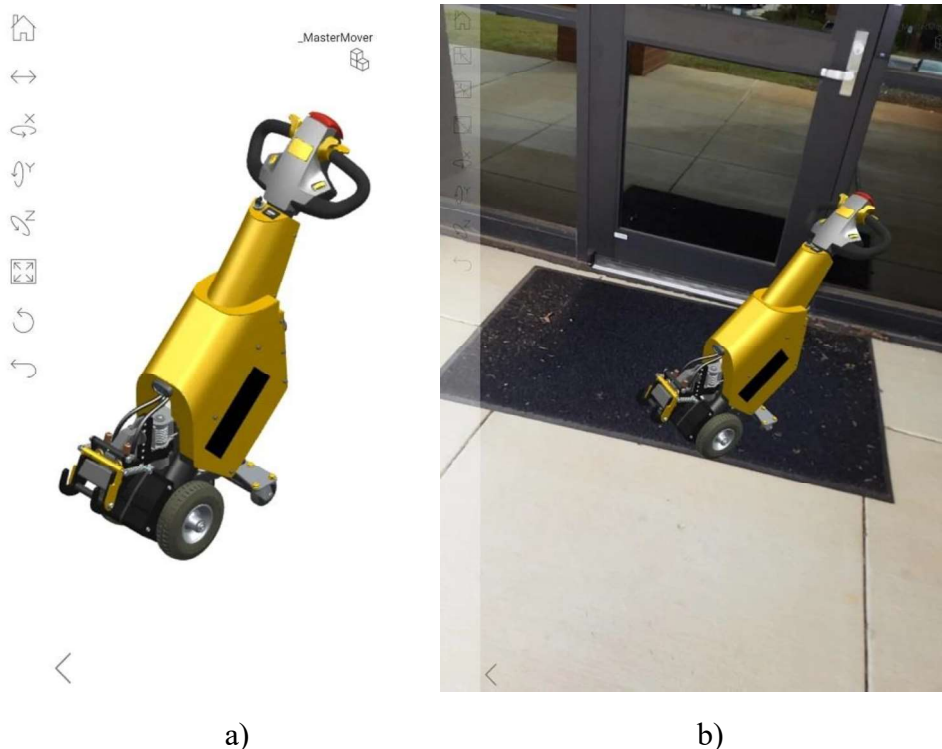


Figura 2.31 - a) Objeto 3D; b) Visualização de objeto 3D em enquadramento real. (Solid Edge, 2019)

Numa montagem, é possível o acesso a uma lista dos componentes que constituem a mesma montagem, existindo a opção de selecionar um componente, o qual fica selecionado com uma cor diferente, de modo a facilitar a sua identificação e análise (Figura 2.32).

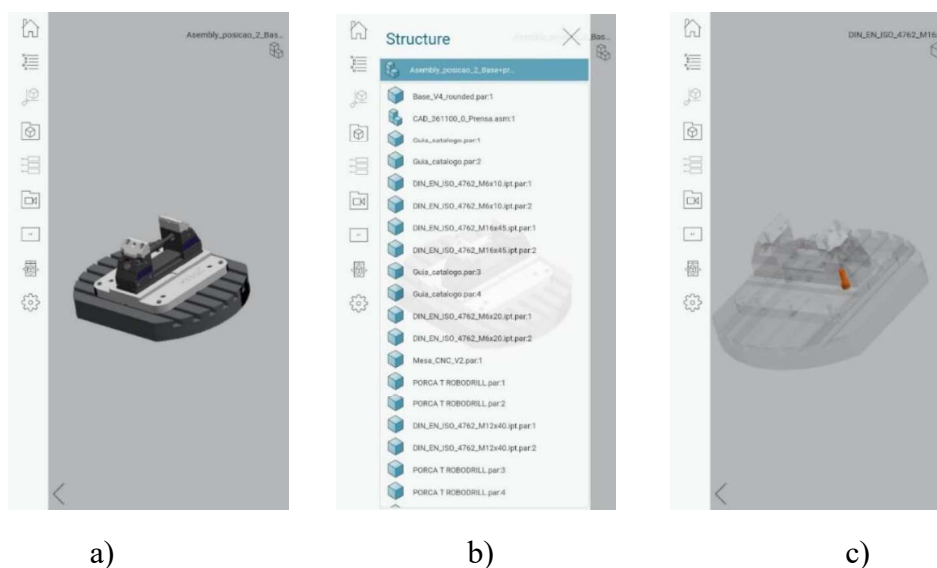


Figura 2.32 - a) Exemplo da vista de uma montagem no *SEViewer*; b) Lista de componentes na montagem; c) Exemplo de seleção de um só componente.

Para exportar os ficheiros para o formato da aplicação descrita o *Solid Edge*® disponibiliza uma opção para guardar o ficheiro logo no formato específico, designada como *Save for Tablet* com a extensão SEV. Contudo a aplicação também tem suporte para ficheiros DXF, CGM e *AutoCAD* DWG, tal como é apresentado na Figura 2.33 o formato de um desenho 2D.

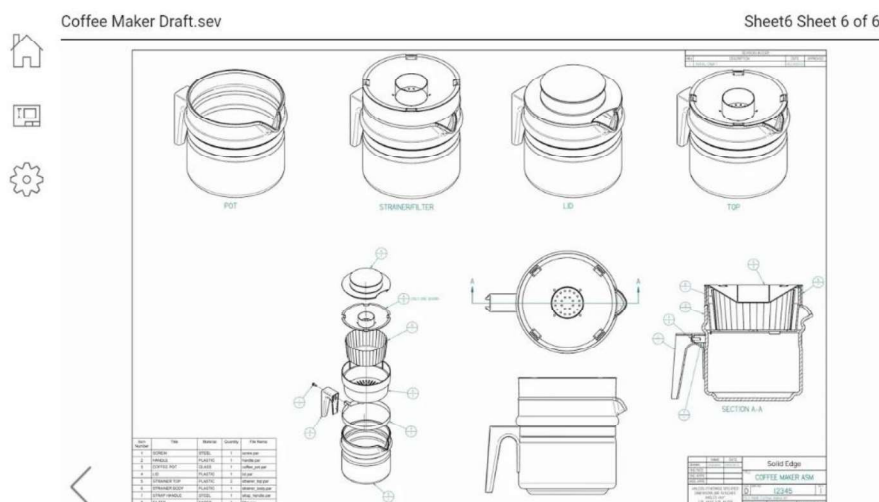


Figura 2.33 - Exemplo de apresentação de desenho 2D no *SEViewer*. (*Solid Edge*, 2019)

Com o *Solid Edge*®, existe a possibilidade de desenhar da forma que for mais conveniente. Isto é, **Bottom-up**, a partir de um componente que já existe, ou **Top-down**, a começar de um *layout* conceptual ou desenhar componentes para encaixarem numa montagem já existente (Figura 2.34). O *Solid Edge*® possui um conjunto de comandos e ferramentas de modelação e montagem que permitem ao utilizador usar uma abordagem associativa ou não-associativa. Torna-se mais fácil e rápido criar ou modificar uma montagem, ao utilizar funções booleanas ou a capacidade

de editar vários componentes em simultâneo, potencialidades designadas no *Solid Edge*® por tecnologia síncrona.

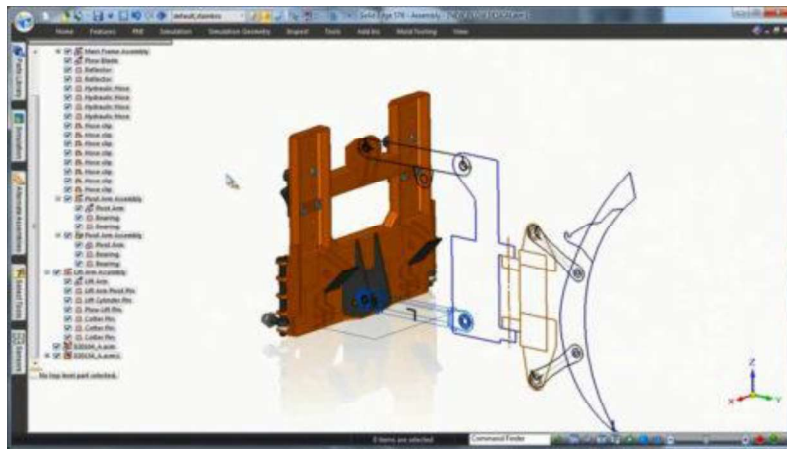


Figura 2.34 - Modelação *Bottom-up* ou *Top-up*. (*Solid Edge*, 2019)

Com as ferramentas de modelação na montagem (*assembly relationships*), podemos de uma forma fácil atualizar as relações e restrições impostas durante a montagem, quer seja através da modificação de peças existentes ou adicionando novos componentes à montagem, conforme exemplificado na Figura 2.35.



Figura 2.35 - Exemplo de aplicação das ferramentas *Assembly Relationships*. (*Solid Edge*, 2019)

O *Solid Edge*® oferece uma componente para criar Projetos de Planta Modular (*Modular Plant Design*). Isto é a partir do tradicional desenho 2D com o planeamento de tubagem, é possível transformar o desenho 2D num projeto de tubagem 3D em grande escala. Esta componente permite agilizar o fluxo de trabalho de todo o processo com tubagem 3D ligada, suporte de diagramas de tubagem e instrumentos (*P & ID*) e *ISOGEN*® *output*, garantindo assim que os projetos sejam realizados de uma forma correta desde a fase inicial até á fase final.

Este módulo permite que os utilizadores compreendam facilmente a logica/intenção do projeto através de um esquema 2D e que de seguida desenvolvam os 2D num modelo 3D (Figura 2.36).

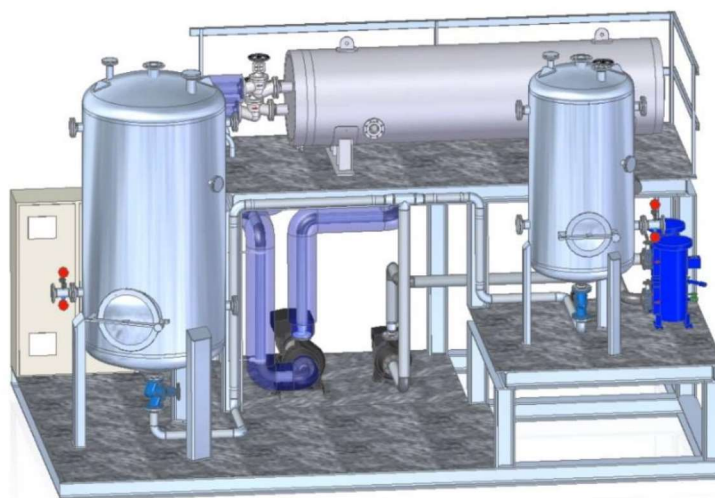


Figura 2.36 - Exemplo de aplicação *Pipe Line design*. (Solid Edge, 2019)

O **Solid Edge® P&ID** usa processos automatizados por forma a criar *pipelines* de uma forma completa, incluindo bibliotecas de símbolos e peça internas. Todas as especificações da tubagem podem ser consultadas em qualquer altura do projeto, podendo também ser geradas listas de material e relatórios.

Este módulo é ainda constituído por 3 módulos como **Solid Edge® XpresRoute**, **Solid Edge® P&ID Design** e **Solid Edge® Piping Design**.

O **Solid Edge® XpresRoute** otimiza o desenho de sistemas mecânicos num ambiente de desenho 3D, criando percursos mais eficiente para as tubagens (Figura 2.37). Depois de o desenho estar concluído, este modulo continua a acelerar o trabalho, gerando automaticamente relatórios detalhados, *BOMs* (*Bill of materials*) e outras informações detalhadas.

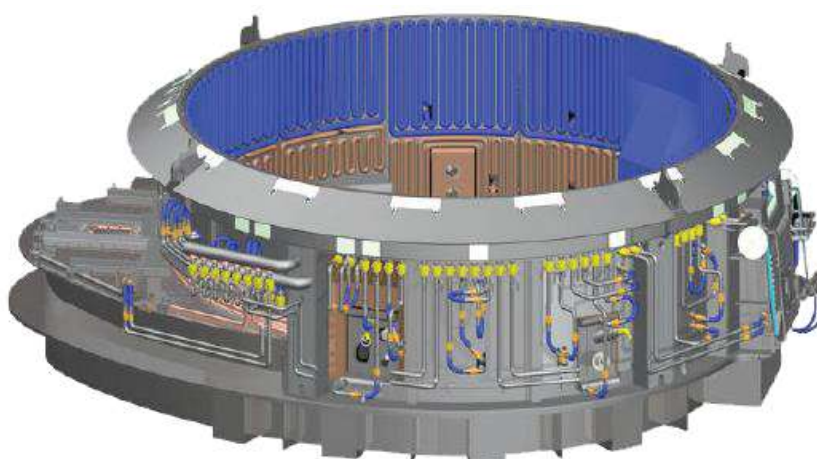


Figura 2.37 - Exemplo de aplicação do módulo *XpresRoute*. (Solid Edge, 2019)

Com **Solid Edge® P&ID Design** é possível obter um diagrama de fluxo 2D e um suporte com símbolos (Figura 2.38) os quais são importantes para cumprir os padrões de qualidade standards internacionais. São suportadas as normas ANSI/ISA, DIN, EN e ISO sendo efetuada

perfeitamente a interligação destas normas com o *Solid Edge® Piping Design* onde as definições controlam a criação automática de tubagens. As definições que definem o P&ID (*Piping and Instrumentation Diagrams*) podem ser facilmente implementadas no modelo 3D, de modo a providenciar uma solução completa de um projeto de planta modular.

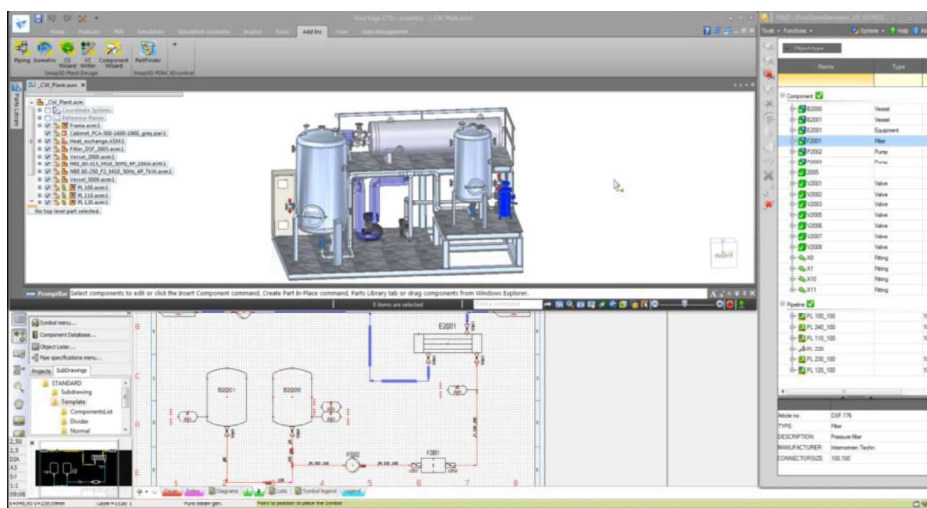


Figura 2.38 - Exemplo de aplicação do módulo P&ID. (Solid Edge, 2019)

O *Solid Edge® Piping Design* oferece uma opção de desenho 3D automático de tubagem com bibliotecas de peças 3D bastante abrangente e com um *Output ISOGEN®* totalmente automático, através de um formato PDF para o projeto. Tubos e mangueiras com o mesmo comprimento em diferentes montagens, mesmo com curvas diferentes, mantêm o mesmo número de referência na lista de materiais (*Bill of Materials*), reduzindo assim erros que possam ocorrer durante o processo de montagem. O software contempla uma funcionalidade que permite um desenho mais rápido e inclui uma ferramenta de *sketch* melhorada por forma a que mesmo um utilizador sem experiência crie um esboço 3D de uma forma fácil.

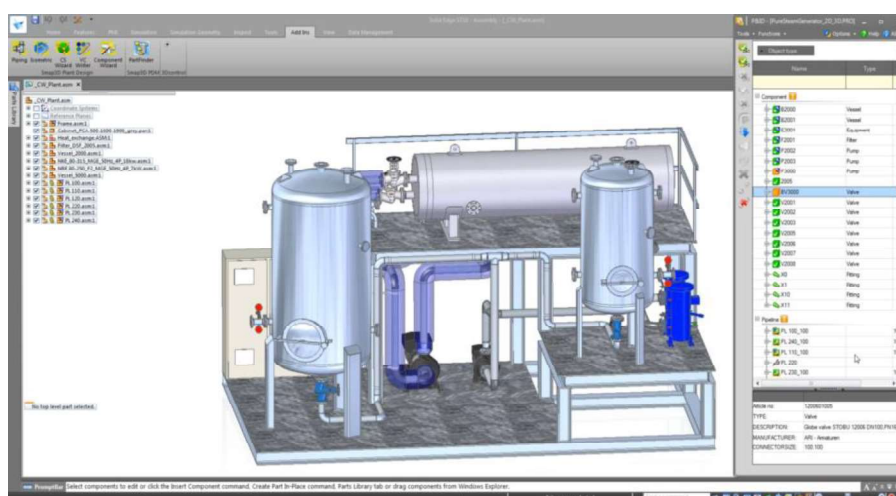


Figura 2.39 - Exemplo de aplicação do módulo Piping design. (Solid Edge, 2019)

O *Solid Edge*[®] permite partilhar desenhos 2D de uma forma fácil com outras equipas do projeto, fornecedores e clientes, mesmo que não sejam utilizadores do *Solid Edge*[®]. Com o ***Solid Edge 2D Drafting***, módulo que é gratuito, é possível uma partilha fácil de desenhos nativos, fornecendo ainda recursos de *layout* de desenho, diagramas e dimensionamento. Como esta ferramenta é totalmente compatível com a versão comercial do *Solid Edge*[®], não se perde nenhum parâmetro do desenho, mantendo assim a sua integridade como resultado da tradução de dados.

O *Solid Edge*[®] possui um módulo designado **NC-ready Flat Patterns**, vocacionado para gerar código CNC padrão para quinagem de componentes com geometrias planas (Figura 2.40). Ou seja, dá a possibilidade de criar uma fórmula personalizada com bases nas mesas de quinagem. Para a produção, o *Solid Edge*[®] mostra a dimensão de corte mais eficiente para otimização dos recursos materiais.

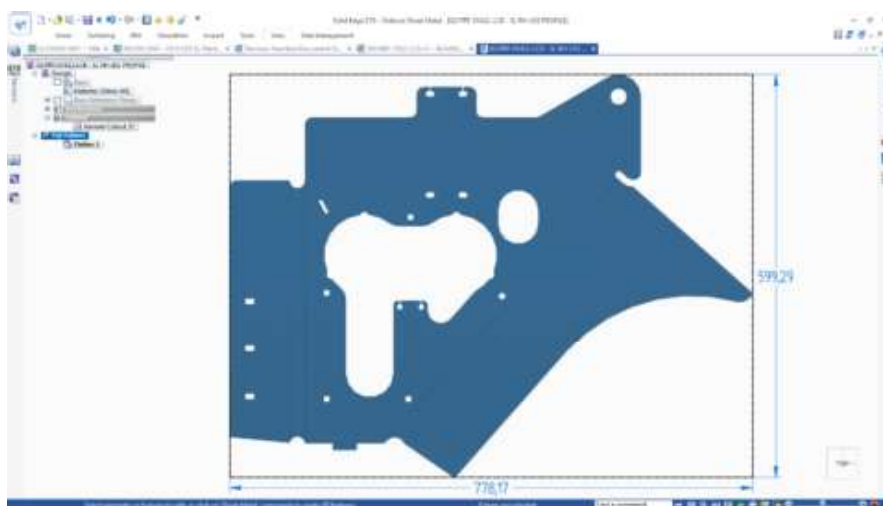


Figura 2.40 - Exemplo de aplicação do módulo *NC-ready Flat Patterns*. (*Solid Edge*, 2019)

Tem ainda a capacidade de permitir a redução do tempo de projeto com o recurso à padronização de componentes e peças *standard*. Ao realizar a montagem de componentes, muitas das vezes é necessário a utilização de peças normalizadas, como parafusos, porcas ou mesmo submontagens. Para isso o *Solid Edge*[®] tem a capacidade de copiar os componentes ou mesmo as submontagens de uma forma rápida mantendo a mesma disposição. Com a biblioteca que está incluída, disponibiliza uma vasta gama de componentes que cumprem as normas utilizadas no mercado ou na empresa.

O *Solid Edge*[®] inclui um conjunto de ferramentas específicas para criação de **estruturas rígidas e de soldaduras** de uma forma mais rápida.

A soldadura e estruturas do *Solid Edge*[®] são totalmente associadas com a montagem, modelação de peças e rascunho (*Drafting*). Na componente das estruturas podem ser usados dois métodos: usar rascunhos ou usar as arestas de corpos sólidos. Quando se desenha a partir de corpos sólidos, nas peças 3D existe a capacidade de usar todas as ferramentas da tecnologia síncrona do *Solid Edge*[®].

O *Solid Edge*[®] dispõe de soluções de **gestão de dados CAD** que conseguem acompanhar as necessidades de todos os fabricantes, desde pequenas e médias empresas até grandes empresas com operações bem definidas.

Empresas do setor da produção podem ter alguma dificuldade em manter um fluxo de trabalho correto e sem falhas, quando ocorre um crescimento rápido de dados resultantes de novos projetos e da sua produção. Os resultados apresentados pelas empresas que implementaram estas soluções, demonstram que a probabilidade de ser “muito eficaz” em encontrar os dados que necessitam e partilhar os mesmos com outros elementos é 2.7 vezes mais rápido. A probabilidade de ser “muito eficaz” na gestão dos desenhos dos projetos é acima de 3 vezes mais rápida, e a probabilidade de ser “muito eficaz” a fornecer a informação correta para a produção é acima de 2.5 vezes mais rápida e eficaz.

Estas soluções são derivadas de ferramentas de gestão de dados integrada, que estão incluídas no *Solid Edge*[®], assim como recursos mais amplos de gestão de dados CAD e de gestão do ciclo de vida do produto (PLM), capacidades do *Teamcenter*[®].

Com a gestão de dados incorporado no *Solid Edge*[®] é muito mais fácil a gestão de ficheiros/dados sem ser necessário suporte técnico. Esta função consegue oferecer recursos excelentes para pequenas e médias empresas que tenham um grande aumento de volume de ficheiros CAD. Esta solução permite ainda ao utilizador rever ou editar as propriedades de vários ficheiros em simultâneo

A configuração rápida, sem programas de base de dados (*Fast setup*), utiliza apenas a capacidade de gestão de dados integrada, com recurso à tecnologia padrão de indexação do *Windows*[®], de modo a guardar as informações dos ficheiros. Como não existe a necessidade de ter instalado programas de bases de dados, não é necessário recorrer ao apoio técnico. Simplesmente são colocados índices nas pastas onde os ficheiros do *Solid Edge*[®] estão guardados, estando apta a sua utilização (Figura 2.41).

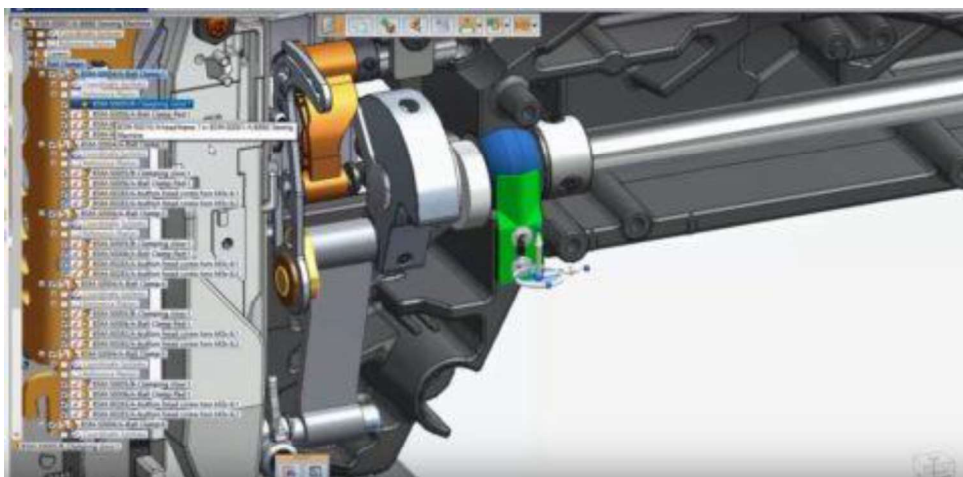


Figura 2.41 - Exemplo de aplicação do módulo. (*Solid Edge*, 2019)

É possível pesquisar os ficheiros através do explorador do *Windows*[®] ou no *Solid Edge*[®] recorrendo aos nomes dos ficheiros ou através das propriedades *standard* ou personalizadas.

Pode ser realizada uma busca através do modo “onde é que a peça é usada” (*last changes*), sendo o resultado apresentado em que montagens, rascunhos ou desenhos 3D está a ser usada a peça e assim pode ser avaliado os impactos que as alterações vão ter (Figura 2.42).



Figura 2.42 - Exemplo de aplicação do módulo *Last Changes*. (Solid Edge, 2019)

Com o módulo **Design Management** é possível realizar uma revisão nos componentes, montagens e desenhos de uma forma rápida. Podemos utilizar um desenho/montagem já existente fazer alterações ou mesmo colocar novas peças, conseguindo assim arrancar um novo projeto de forma mais rápida. Permite ainda analisar ou mesmo editar as propriedades de um componente, montagens ou desenhos, e enviar as peças, montagens e desenhos para produção com apenas alguns passos (Figura 2.43).

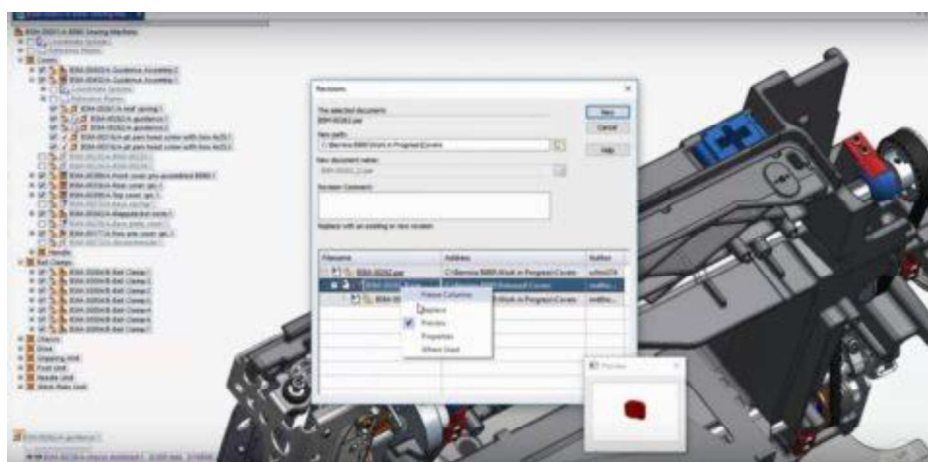


Figura 2.43 - Exemplo de aplicação do módulo *Design Management*. (Solid Edge, 2019)

Como exemplo do impacto que o módulo *Design Management* pode ter em ambiente industrial, apresenta-se a experiência de Yashwant Rajeshirke, Senior Development Engineer, R&D, Forbes Marshall:

“Com o *Solid Edge*[®], aumentamos a eficiência dos nossos engenheiros de projeto em 60 a 65%. Agora, seguimos com precisão as revisões e desenhos. Os nossos engenheiros de projeto podem aceder facilmente aos dados uns dos outros. Projetos conceituais são produzidos virtualmente e os projetos ilustram realmente a intenção. Agora temos uma biblioteca comum de componentes e desenhos de produtos. O nosso processo de desenho para fundição foi simplificado. Além disso, o prazo de entrega dos desenhos foi substancialmente reduzido.” (Solid Edge, 2019)

O *Solid Edge*[®] possibilita a captura, gestão e partilha dos dados de modo a melhorar a eficácia e integridade de todo o projeto por intermédio da tecnologia *Teamcenter*. Esta opção permite criar um ambiente de trabalho único para gestão de dados do projeto para as ferramentas, dados mecânicos, eletrónicos e simulações. Esta integração proporciona ainda uma gama completa de recursos que permitem fazer uma gestão do ciclo de vida do produto (PLM) por forma a refinar melhor todo o processo de produção, desde o parte inicial do projeto até à fase de produção.

O *Solid Edge*[®] tem a aptidão de pesquisar por formas os componentes, o que permite reutilizar as peças existentes em novos projetos. Esta funcionalidade pode ser configurada de uma forma fácil, guardar e utilizar os componentes já criados que foram recuperados (Figura 2.44).

É possível ainda copiar e editar usando o *Structure Editor*, o qual permite configurar de uma forma rápida novas montagens.

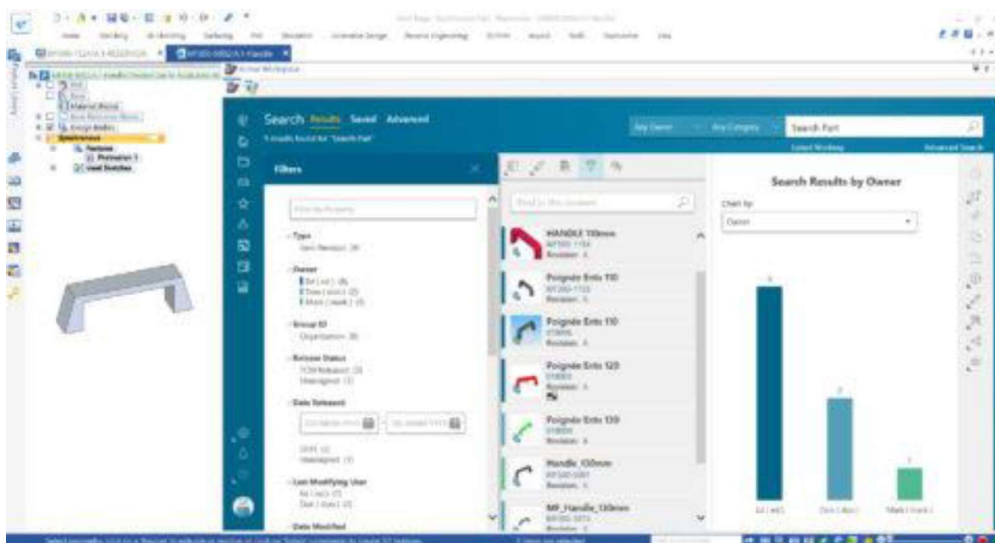


Figura 2.44 - Exemplo de aplicação da funcionalidade de Pesquisa por formas. (Solid Edge, 2019)

As vantagens das funcionalidades agora descritas são evidenciadas com o relato de alguns utilizadores, como o de Olivier Pellerim, IT Innovation Manager, do Groupe SEB:

“Usar o *Teamcenter* com o *Solid Edge*[®] permite-nos garantir o acesso seguro às informações mais recentes validadas em qualquer lugar. Se precisamos de um documento mais recente da nossa equipa num outro fuso horário, mesmo que eles estejam a dormir, eles estão disponíveis no *Teamcenter*, e podemos ter a certeza de que estamos a utilizar a versão correta, em todas a vezes.” (Solid Edge, 2019)

Para além de todos os módulos e funcionalidades já descritas, é importante salientar que o *Solid Edge*[®] inclui também um conjunto de **ferramentas CAM** que permitem planear o processo de

produção, desde os métodos tradicionais até aos mais recentes, como a maquinagem CNC, otimização da disposição dos componentes no espaço disponível (*nesting*), corte, quinagem, moldagem, soldadura e produção por adição.

Neste conjunto de ferramentas o **Solid Edge® CAM Pro** apresenta um conjunto de ferramentas para o fabrico através de corte por arranque de apara bastante completo, que oferece um conjunto abrangente de soluções para programação máquina-ferramenta. Isto abrange desde a maquinagem simples até à utilização de vários eixos e de alta velocidade, cobrindo todo o tipo de necessidades. Esta ferramenta pode ser usada como um componente integrado no *Solid Edge®* ou de forma independente, sendo que em conjunto com o *Solid Edge®*, evita a necessidade de recorrer ao uso de programas de terceiros.

O *Solid Edge® CAM Pro* oferece também um conjunto de opções de fresagem e maquinagem CNC, incluindo pós-processadores, modelos de otimização de pós-processamento e documentação de produção. Oferece um conjunto completo de módulos, como por exemplo, um vocacionado para o ensino, bem como outros manuais para um melhor controlo da maquinagem.

Tem a capacidade de trabalhar com maquinagem de 2.5; 3 e 5 eixos com todas as suas funcionalidades, desde operações mais simples como o desbaste, acabamento orientados no eixo Z, ou ciclos de furação, até as opções mais exigentes de maquinagem de alta velocidade, corte com eixo fixo para superfícies complexas que podem incluir a opção do *raster* e *offset*. Suporta também o corte simultâneo em vários eixos para trabalhar superfícies complexas com métodos automáticos ou manuais, conforme se demonstra na Figura 2.45.



Figura 2.45 - Exemplo de maquinagem 5 Eixos executada com base no *Solid Edge® CAM Pro*. (*Solid Edge*, 2019)

Com um completo ambiente de simulação onde são visualizados os movimentos da ferramenta com base na programação realizada ou com base no código G gerado no pós-processamento. São detetadas possíveis colisões obtendo assim resultados mais precisos por forma a evitar erros de maquinagem, prevenindo prejuízos avultados.

O *Solid Edge® CAM Pro* inclui também uma componente completa para **tornos CNC**, incluindo tornos de CNC com várias torres ou de vários eixos. Inclui também opções para

programar tornos CNC verticais de torre, com programação para operações de torneamento exterior ou interior (Figura 2.46). Este módulo de torneamento está também disponível com uma versão para o ensino.

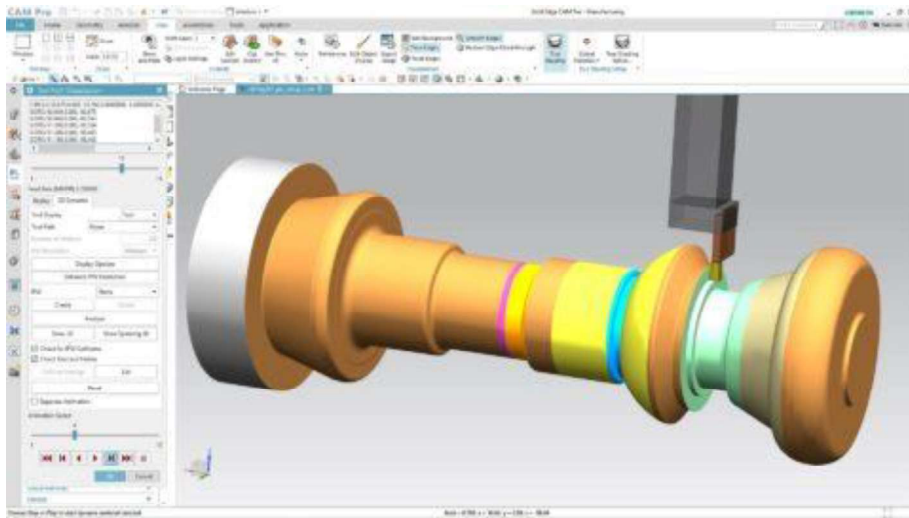


Figura 2.46 - Exemplo de uma operação de torneamento CNC exterior. (Solid Edge, 2019)

Com o **Solid Edge® 2D Nesting** conseguimos fazer uma disposição otimizada de *layouts* para corte de material, seja ele metal, plástico, madeira, tecidos ou têxteis. Assim consegue-se diminuir o desperdício de material, rentabilizado ao máximo o material disponível para corte (Figura 2.47).

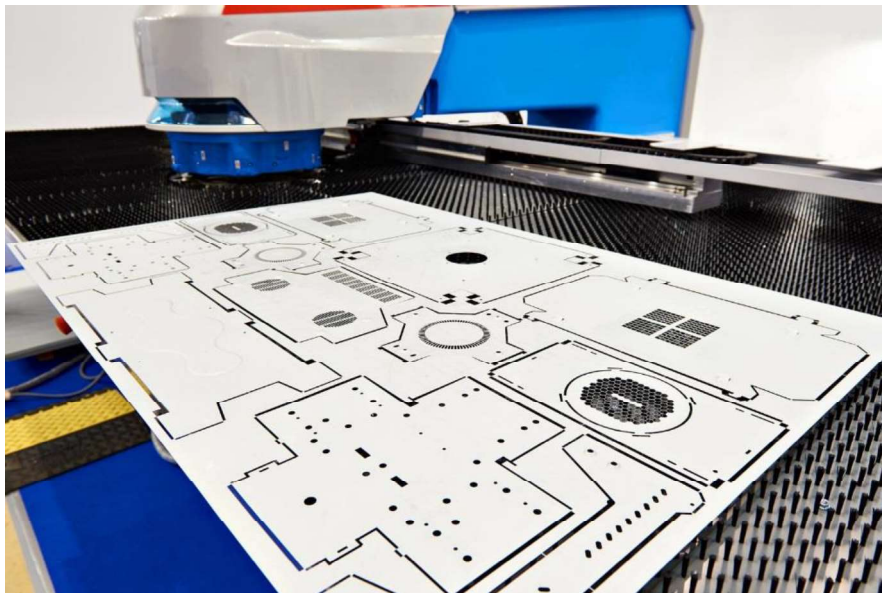


Figura 2.47 - Exemplo de disposição de diversos componentes executada pelo Solid Edge® 2D Nesting. (Solid Edge, 2019)

Esta funcionalidade está bastante integrada no **Solid Edge®**, uma vez que pode ser facilmente aplicada aos componentes a importar, trabalhando com vários tipos de formatos de ficheiros como **Solid Edge® sheet metal** e ficheiros da montagem (PSM e PAR) mas também formatos neutros, não provenientes deste software, incluído o DXF e DWG.

Com o **Solid Edge® Technical Publications** tem-se a capacidade de criar facilmente ilustrações e documentos técnicos para o componente ou uma montagem com vários componentes, como manuais de instalação ou manutenção num formato PDF (Figura 2.48). Com esta ferramenta consegue-se criar de uma forma muito rápida diversos tipos de documentos sejam eles ilustrações simples ou documentos complexos com vistas 3D para a produção, manutenção ou para o ensino, reduzindo assim a necessidade de ter pessoas especializadas para a criar estes documentos.

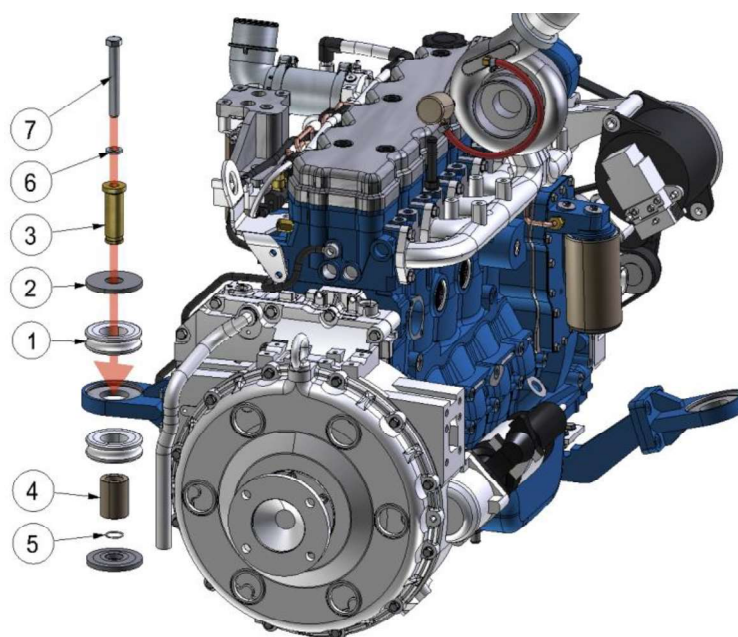


Figura 2.48 - Exemplo de ilustração técnica elaborada. (Solid Edge, 2019)

O **Solid Edge®** beneficia ainda de parcerias com empresas por forma a criar e integrar, em alguns casos, aplicações especializadas que ampliam e tornam ainda mais abrangentes as capacidades de trabalho.

Para o projeto industrial existe uma parceria com **KeyShot™ | Luxion** que é um programa utilizado para a criar imagens 3D, animações ou visualizações interativas. Com o **CAD Models | CADENAS** tem-se acesso direto a mais de 400 catálogos certificados com milhares de peças.

A nível da análise e simulação, foi estabelecida uma parceria com **Dynamic Design Motion | Design Simulation Technologies** que permite executar uma simulação e compreender a performance e funcionalidade da peça do **Solid Edge®** de modo a conseguir validá-la numa fase inicial de projeto. O **SIGMUDEDGE | Varatech** têm a capacidade de analisar as variações e tolerâncias das peças para garantir uma qualidade de construção.

No processo de projeto de planta está estabelecida uma parceria com **Snap3D Plant Design | CAD-Partner** para realização de projeto de planta e de tubagem 2D/3D mais inteligente. Na vertente elétrica e eletrónica a parceria com a **E3.series | Zuken** possibilita uma solução para projetos elétricos líder no setor dos cabos, cabelagens, fluidos e painéis. Esta ferramenta tem a capacidade de englobar ao mesmo tempo projetos elétricos, hidráulicos e pneumáticos. Com a parceria com **PCBto3D | TLD** completa a ligação entre o projeto mecânico e elétrico para criar um projeto desenhando uma placa de circuito impresso no **Solid Edge®**.

Para melhorar e facilitar o processo de projeto existem parcerias com várias empresas para peças de catálogo e padronizadas, como o caso *EDGE Quick Library* | *EDGE plm* que fornece uma biblioteca de peças definida pelo utilizador, a *TracePartsOnline.net* | *Trace Parts*; que consiste numa biblioteca online a nível global e que fornece o acesso a catálogos 3D em formato *Solid Edge*[®] de mais de 400 fabricantes de peças, existindo também a *PARTcommunity* | *CADENAS* e a *PARTsolution* | *CADENAS* em que a primeira oferece de forma gratuita modelos CAD 2D e 3D de mais de 300 catálogos de fornecedores e a segunda permite uma redução de custos de forma sustentável para peças padrão de fornecedores para engenheiros de projetos.

Para a produção existe a parceria com *JETCAM Expert* | *JETCAM*, *SigmaNEST* | *Sigma TEK Systems*, *PEPS DAD/CAM System* | *Camtek* um dos líderes mundiais no mercado de programas CAD/CAM, com o *ESPRIT* | *DP Technology* um poderoso programa com um sistema de programação de espectro completo para fresar, tornear, Eletroerosão (EDM) com fio e máquinas multitarefa, *CAMWorks* | *HCL Technologies* programa de CAM que tira partido dos recursos da tecnologia síncrona e proporciona fluxos de trabalho automáticos e fáceis de utilizar através da programação de controlo numérico.

Na componente de gestão de Projeto e configuração de produto, existem parcerias com a *openBoM* | *Newman Clould*, *Kenesto* | *kenesto* que providenciam ferramentas de trabalho para colaboração em tempo real baseadas na nuvem (*Cloud-based*). Existe também parceria com a *CADCustimization* | *PREMA GROUP*, *CADECplus*, *DBSolidEdge* | *MechWorks*, *EcoDesigner* | *Trayak* que permite executar uma análise do ciclo de vida e assim calcular o impacto ambiental que um produto vai ter. Com o *TPO – Total Production Optimization* | *Platainec* ferramenta que permite processar todos os dados, ou seja, projetos, pedidos e inventário, por forma a criar os planos de produção o mais otimizados possível. Entre outras parceiras que visam ajudar ainda mais os utilizadores fornecendo acesso a ferramentas adicionais para aumentar a produtividade.

2.2.2.2. Solid Edge[®] Electrical Design

O *Solid Edge*[®] disponibiliza também um módulo designado de ***Electrical Design***, vocacionado para o desenvolvimento de projetos elétricos em colaboração com *Electrical CAD* e *Mechanical CAD* (Figura 2.49), de modo a ultrapassar os desafios dos projetos eletromecânicos, proporcionando uma verdadeira colaboração entre as componentes mecânicas e elétricas. Este módulo é baseado numa tecnologia da *Mentor Graphics*, uma empresa do grupo Siemens.

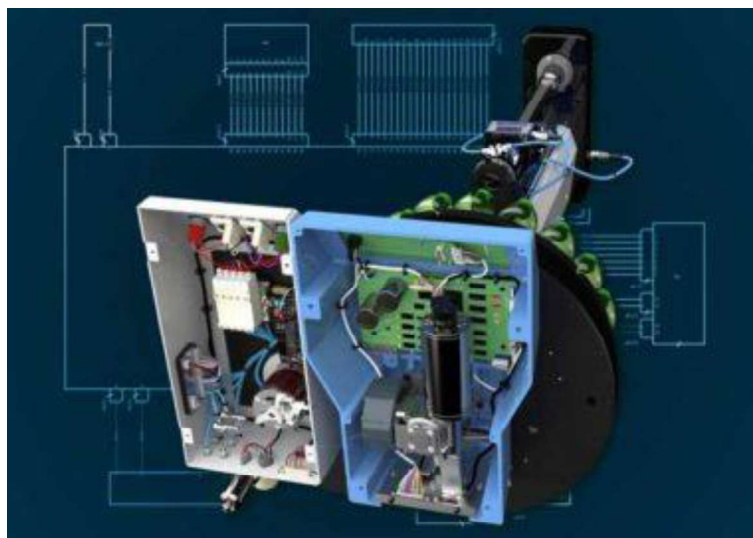


Figura 2.49 - Exemplo de aplicação do módulo *Solid Edge® Electrical Design*. (Solid Edge, 2019)

As opções fornecidas pelo *Solid Edge® Electrical* permitem projetar e simular sistemas elétricos, desde os mais simples até cabelagens complexas. É possível ordenar toda a cabelagem e os componentes nas montagens 3D dos modelos, visualizando o aspeto da instalação em ambiente 3D e analisar estas montagens de modo a calcular o comprimento correto dos fios para se poder projetar as cabelagens. Realizar uma simulação para garantir que todo o circuito funciona corretamente, não sendo necessário esperar pelos protótipos reais. Podemos também implementar logo o projeto PCB num projeto mecânico de modo a criar uma montagem completa do produto final.

Com o módulo *Solid Edge® Wiring Design* podemos criar projetos elétricos de uma forma rápida e intuitiva através do recurso a ferramentas com provas dadas na indústria, as quais permitem verificar o comportamento elétrico à medida que se vai criando o sistema. Este aplicativo tem integrado bibliotecas inteligentes de símbolos elétricos, componentes e simulação (Figura 2.50).

Na simulação podemos destacar a proteção que assinala erros de curto-circuito, circuito aberto, queda de tensão, fusão e erros de dimensionamento de cabos.

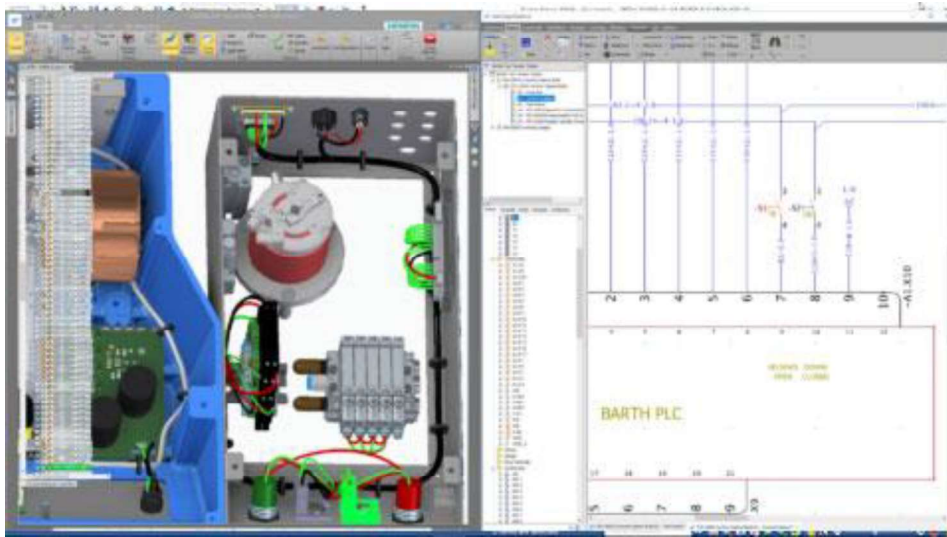


Figura 2.50 - Exemplo de aplicação do módulo Wiring Design. (Solid Edge, 2019)

Com o **Solid Edge® Harness Design** podem ser criadas cabelagens numa escala real, prontas para a produção em conjunto com uma lista automática de materiais a utilizar, bem como relatórios e listas de corte dos fios (Figura 2.51). Tem a capacidade de criar uma ponte entre o projeto elétrico e mecânico de uma cabelagem, otimizando e acelerando todo o processo do projeto/produção, fazendo com que o produto chegue mais rápido ao mercado. Tem incorporado bibliotecas de componentes e símbolos que fazem a seleção automática de terminais, selos/vedantes e fios para cada uma das ligações.

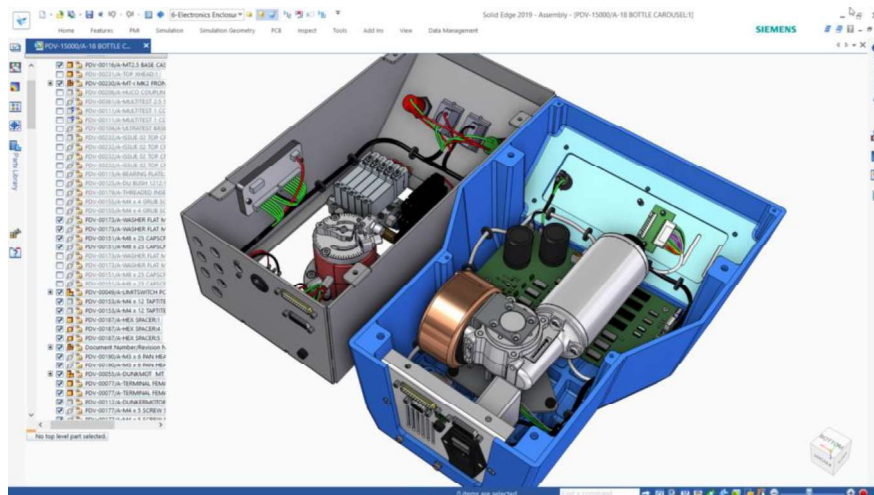


Figura 2.51 - Exemplo de aplicação do módulo Harness Design. (Solid Edge, 2019)

O **Solid Edge® Electrical Routing** é uma ferramenta indicada para criar e organizar, de forma eficiente, todas as cabelagens, fios e cabos numa montagem mecânica reduzindo consideravelmente o tempo de projeto. Podemos definir de uma forma rápida um trajeto 3D entre os componentes e também definir o tipo de fio e a suas propriedades através um assistente

muito intuitivo, em que podemos utilizar componentes elétricos e conectores que já estão pré-configurados no *Solid Edge*® (Figura 2.52).

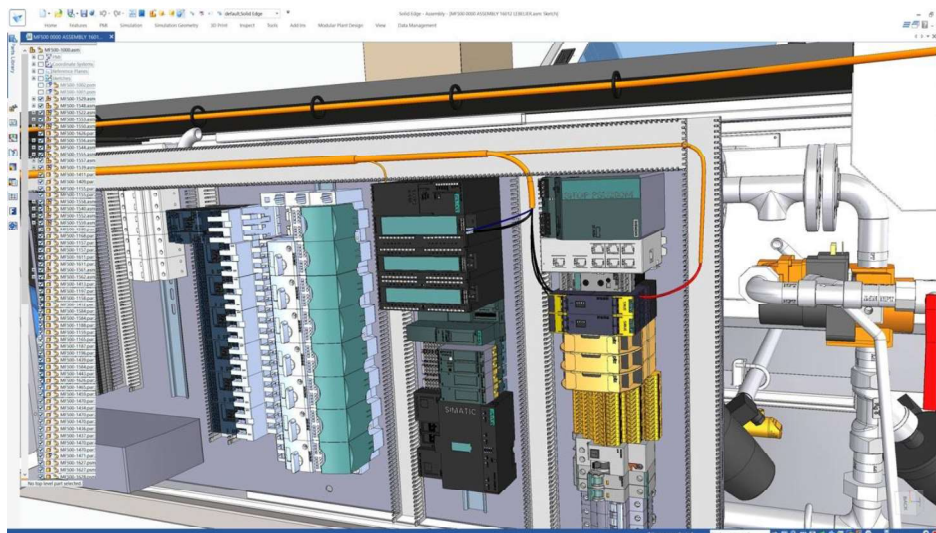


Figura 2.52 - Exemplo de aplicação do módulo *Electrical Routing*. (*Solid Edge*, 2019)

O *Solid Edge*® *PCB Design*, é um módulo que inclui ferramentas que permitem a captura esquemática e *layout* do PCB, simplificando toda a parte complexa do projeto PCB. Tem também incluído o *sketch routing*, onde é possível planear e posicionar em 2D/3D de forma hierárquica em colaboração com ECAD/MCAD (Figura 2.53). Permite assim ter um desenvolvimento mais rápido com uma melhor comunicação entre a parte elétrica e mecânica, visualizar possíveis problemas de colisão ou interferência, num ambiente PCB 3D, isolar as placas de circuito impresso e partilhá-las rapidamente entre os vários departamentos, bem como ter acesso a uma biblioteca e repositório de peças.

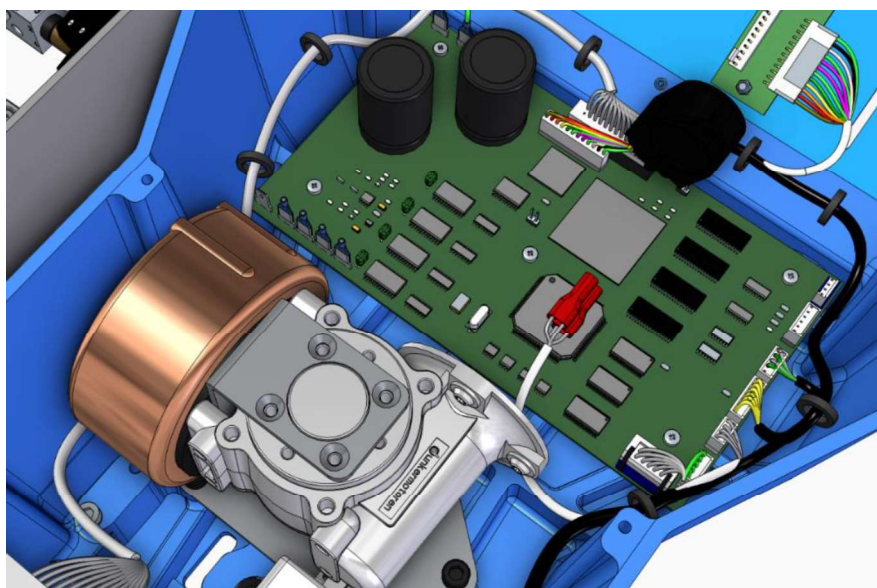


Figura 2.53 - Exemplo de desenho de um PCB. (*Solid Edge*, 2019)

Com o **Solid Edge® PCB Collaboration** é possível quebrar a barreira da comunicação num projeto PCB com o objetivo da eficiência entre ambientes de ECAD e MCAD. Com um ambiente de trabalho individual para cada parte do projeto, permite criar e exportar de uma forma fácil um esboço de projeto PCB de um ambiente de trabalho MCAD.

Tem uma opção de visualização 3D realista, muito intuitiva, que permite ver a placa do circuito impresso separada do meio envolvente que em que está inserida (Figura 2.54).

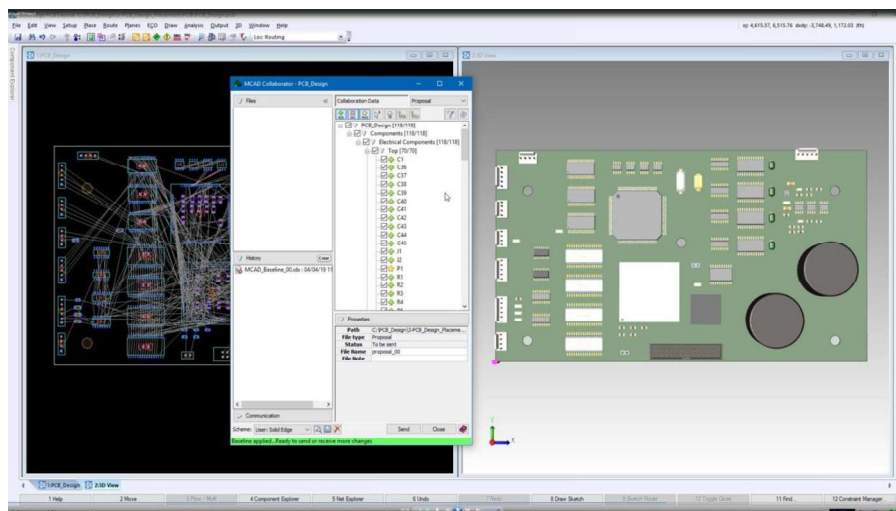


Figura 2.54 - Exemplo de colaboração ente ECAD e MCAD. (Solid Edge, 2019)

3.INTERLIGAÇÃO DO *SOLID EDGE* COM A TECNOLOGIA DE FABRICO CNC

3.1.Projeto e desenho com *Solid Edge*®

Neste trabalho o Solid Edge foi utilizado para desenhar uma base para uma prensa, a qual será posteriormente maquinada a partir de um bloco em alumínio. Para este efeito foi utilizado o *Solid Edge Mechanical Design* para projetar uma base para uma prensa Garant XPENT 361100 utilizada num centro de maquinagem CNC.

Após diversas reuniões com os diferentes utilizadores do centro de maquinagem chegou-se à conclusão que a base tinha de cumprir os seguintes requisitos:

- Ter altura adequada que permitisse com a sua utilização cumprir os requisitos de maquinagem em operações a 5 eixos;
- Ter a possibilidade de ser montada sobre a mesa de trabalho em diferentes posições (paralela ao eixo do XX ou ao eixo do YY), utilizando em qualquer dos casos o mesmo sistema de fixação;
- A base ficar alinhada com os furos existentes na prensa para assim efetuar a união;
- Os furos de fixação da Base à mesa de trabalho, ficarem sempre alinhados com os encaixes da mesa, independentemente da posição em que esta seja montada.
- Prever a colocação de olhais para permitir o manuseamento, e transporte com maior facilidade.

De modo a colocar em prática algumas das capacidades do *Solid Edge*® descritas no capítulo anterior, realizou-se todo o desenvolvimento desta peça, desde o desenho de um rascunho, realização da montagem com os vários componentes para verificar se existia alguma interferência, até criar uma imagem 3D realista do produto final.

No ambiente de trabalho de desenho do *Solid Edge*® (Figura 3.1) encontra-se um aspeto gráfico em muito semelhante ao que se encontra em outros programas de desenho existentes no mercado. Estão disponíveis várias ferramentas para rascunhos 2D e 3D, simulação, superfícies, engenharia inversa, gestão de dados, entre outras.

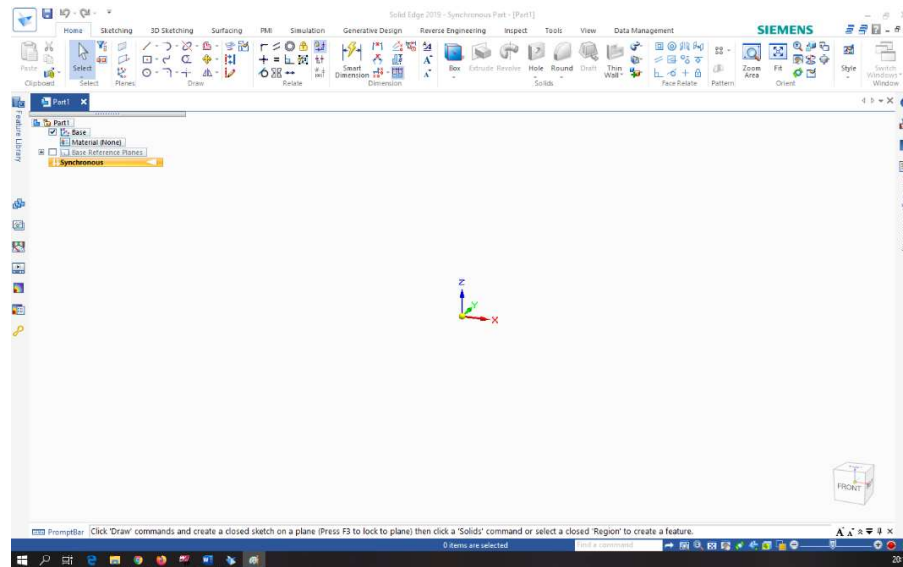


Figura 3.1 - Ambiente de desenho *Solid Edge*®.

De modo a começar a explorar o programa e as suas funcionalidades e ganhar alguma destreza com as ferramentas de desenho, começou-se por desenhar a mesa do centro de maquinagem CNC (Figura 3.2). Foram fornecidos os desenhos 2D da máquina e dos seus acessórios, de onde retirou-se as medidas para desenhar da forma mais realista possível a mesa.

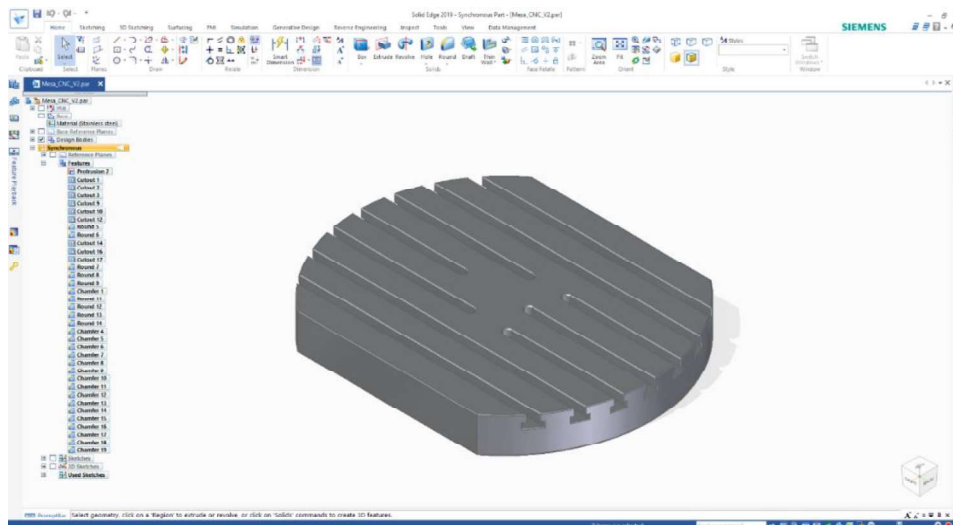


Figura 3.2 - Mesa da máquina HAAS UMC 750SS.

Para desenhar a base é possível começar por um rascunho 2D ou 3D. Com recurso ao rascunho 2D foi definido o plano em que se vai começar a trabalhar e desenhar a forma geométrica que se pretende, neste caso a geometria da base (Figura 3.3).

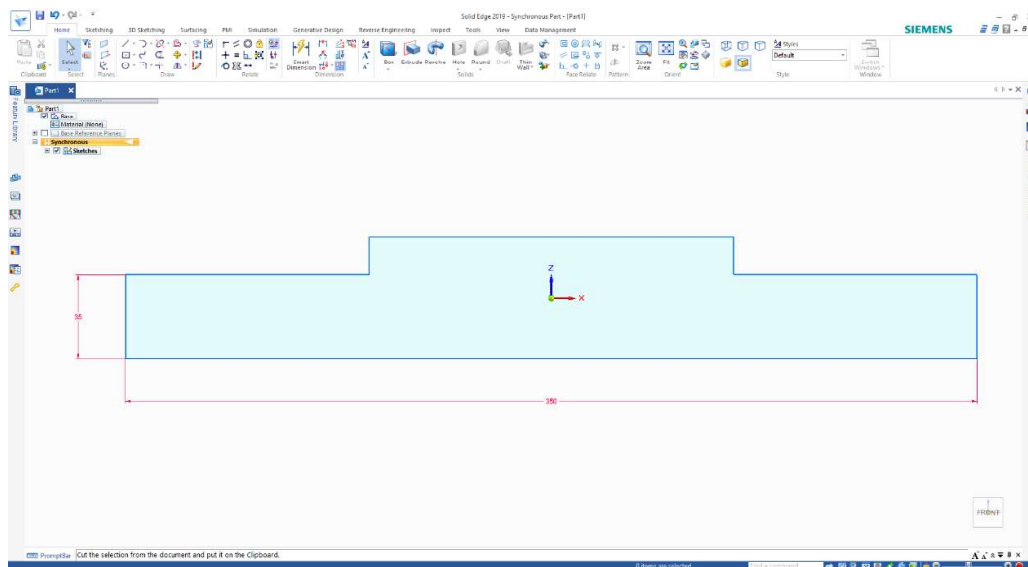


Figura 3.3 - Exemplo de esboço.

Com a ferramenta *Extrude* foi criada a geometria 3D (Figura 3.4), acedendo a esta ferramenta através do menu *Home* ou seleccionar ao desenho 2D. Esta função permite realizar a extrusão numa direcção ou em duas ao mesmo tempo de uma forma bastante fácil e intuitiva graças a atalhos no teclado, e assim manter o referencial no centro da geometria. Permite também realizar uma extrusão de corte (*Extrude Cut*) num ou nos dois sentidos e desta forma obter uma geometria que é o ponto de partida deste trabalho.

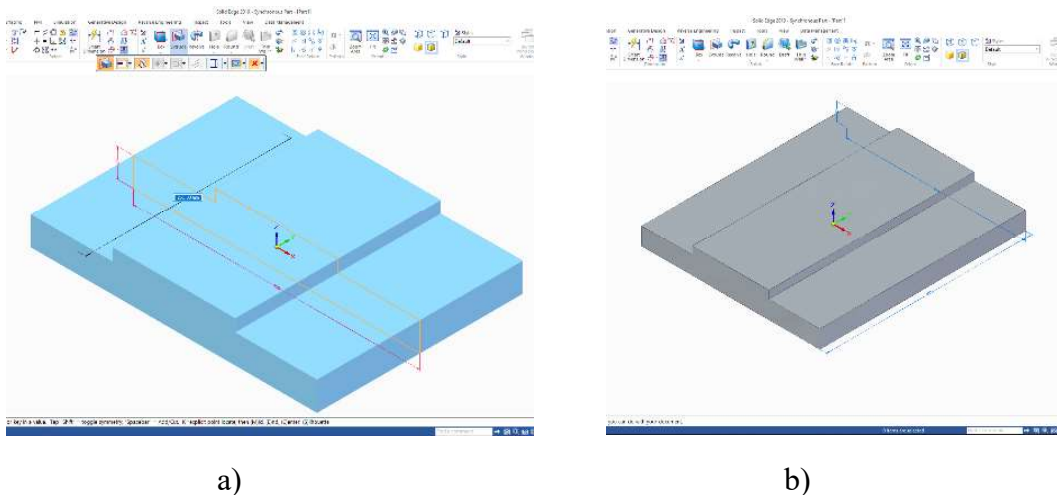
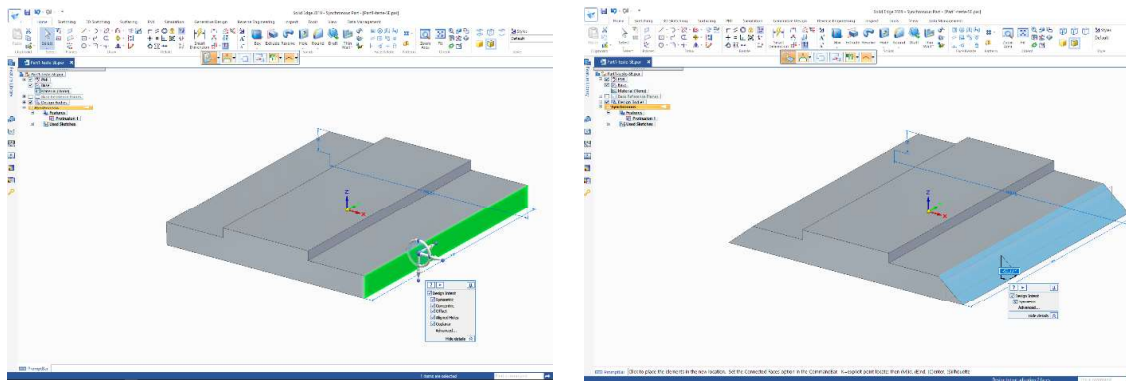


Figura 3.4 - a) Exemplo de extrusão em dois sentidos; b) Resultado da extrusão.

Na parte da edição da peça em 3D é bastante fácil proceder a alterações nas superfícies, como passar de uma superfície vertical para uma inclinada, como se demonstra com a ferramenta *Rotate* (Figura 3.5), bastando para isso seleccionar a superfície que se pretende editar, arrastar o centro do referencial para o local onde vai ser o eixo de rotação da face que será alterada. Por norma consegue-se alterar as duas faces opostas ao mesmo tempo, se a opção *symmetric* estiver seleccionada na caixa de opções que aparece junto ao referencial.

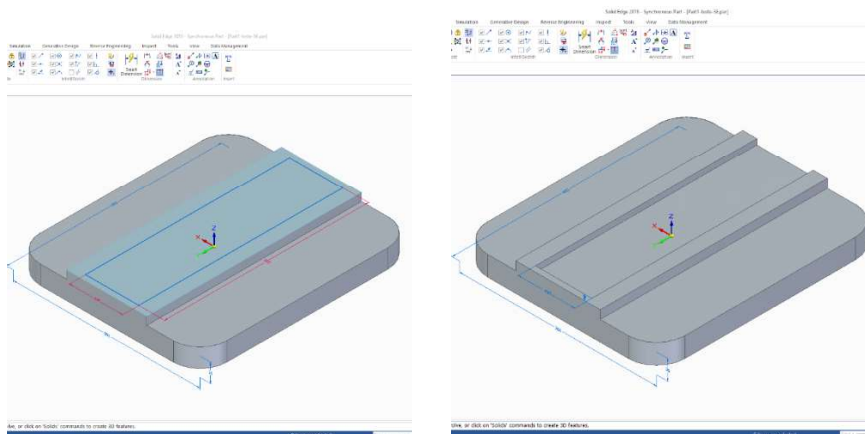


a)

b)

Figura 3.5 - a) Edição de uma superfície numa figura 3D; b) Aspetto final.

Com a ferramenta *Extrude*, é possível criar caixas ou entalhes de uma forma fácil e rápida, bastando para isso definir o plano de trabalho, desenhar a forma que se pretende cortar e seleccionar a face a mover (Figura 3.6).



a)

b)

Figura 3.6 - a) Área seleccionada com o *Extrude Cut*; b) Resultado obtido.

Uma vez que o *Solid Edge*® tem a capacidade de importar desenhos provenientes de outros programas de desenho, foi importado o logotipo do ISEC® (Figura 3.7) o qual tinha sido desenhado no programa *MasterCAM*® e guardado na extensão *.DXF que o *Solid Edge*® reconhece.

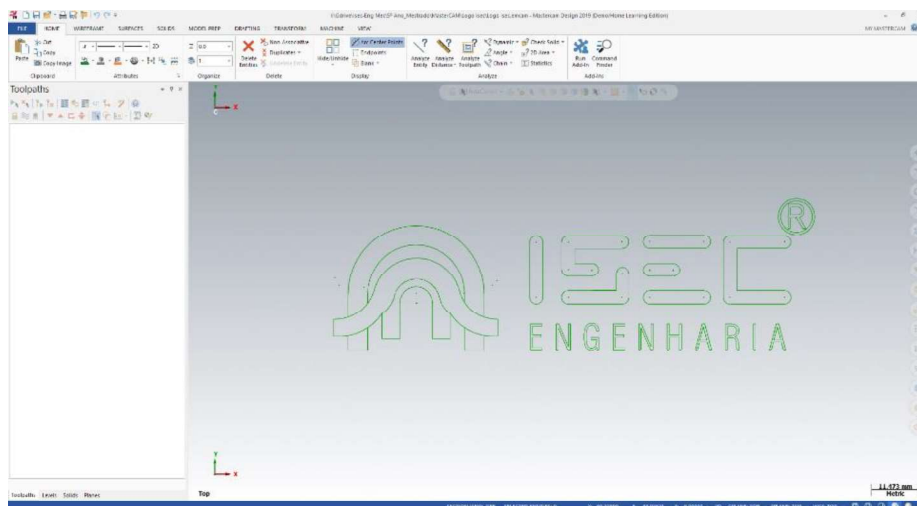


Figura 3.7 - Logotipo *ISEC*[®] no *MasterCAM*[®].

Após ser importado e editado o logotipo, foi aplicado no componente (Figura 3.8).

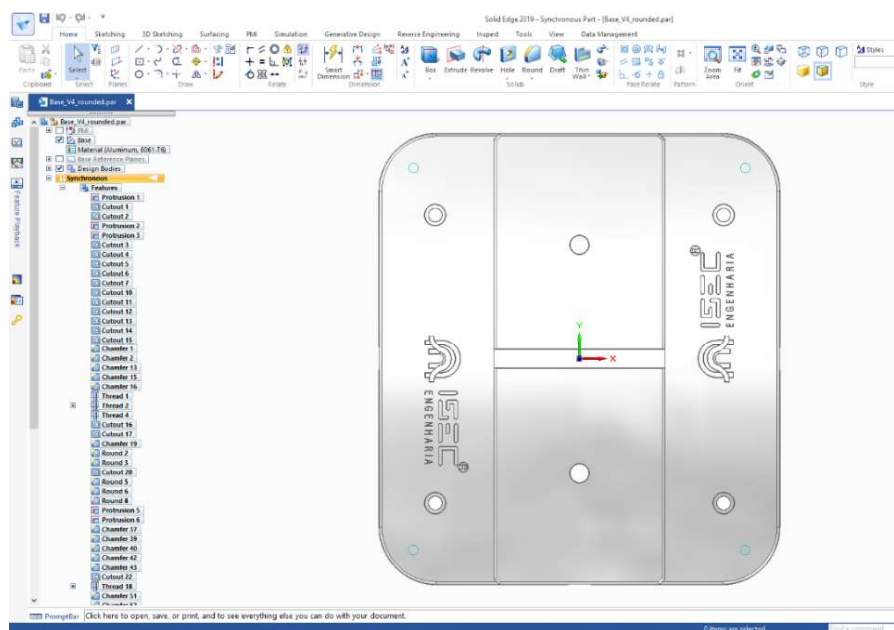


Figura 3.8 - Logotipo *ISEC*[®] aplicado na Base.

Alguns dos componentes utilizados na montagem foram importados de ficheiros já existentes em bases de dados e posteriormente editados para cumprirem os requisitos da montagem. Como exemplo refira-se o caso da porca T (Figura 3.9), proveniente de uma base de dados de ficheiros CAD, o *GRABCAD*, a qual encaixa nas ranhuras da mesa do centro de maquinagem, sendo utilizada para fixar a base à mesa. Uma grande vantagem deste programa é a capacidade de tratar ficheiros CAD externos como se fossem nativos sendo assim possível alterar dimensões e chanfros na porca T.

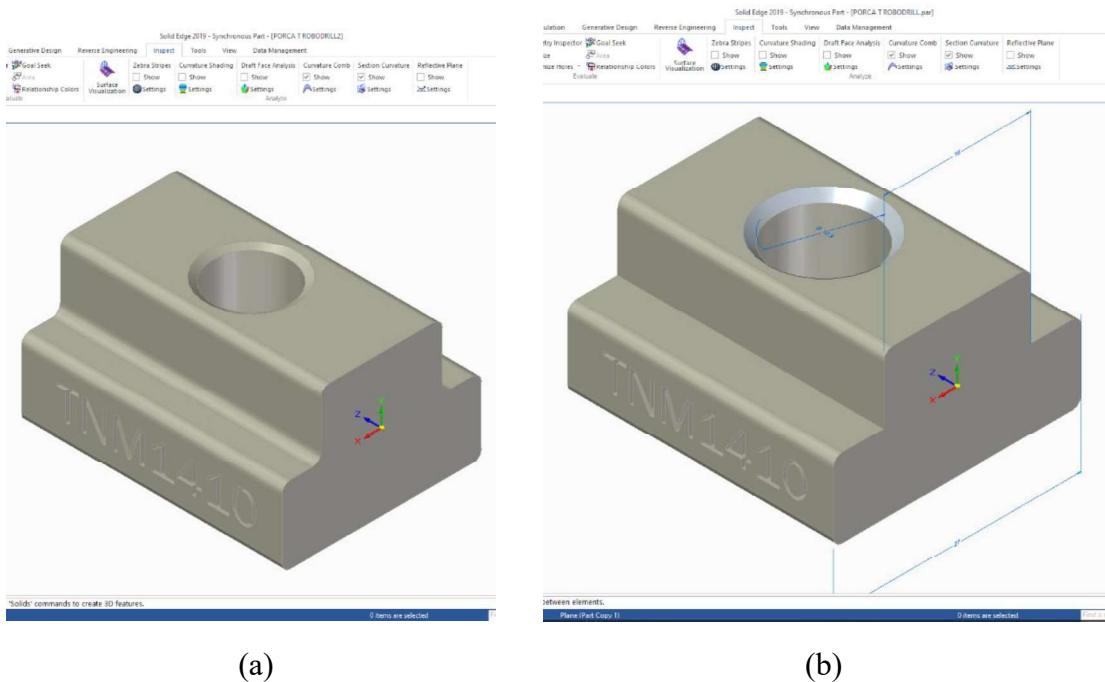


Figura 3.9 - Exemplo de edição de ficheiro CAD de importado. (a) - Original; (b) – Editado.

Todos os parafusos utilizados na montagem (Figura 3.10) foram importados também do *GRABCAD*, pois são inseridos na montagem de forma direta sem qualquer tipo de alteração, uma vez que são interpretados como peças nativas, diminuindo assim o tempo de projeto.

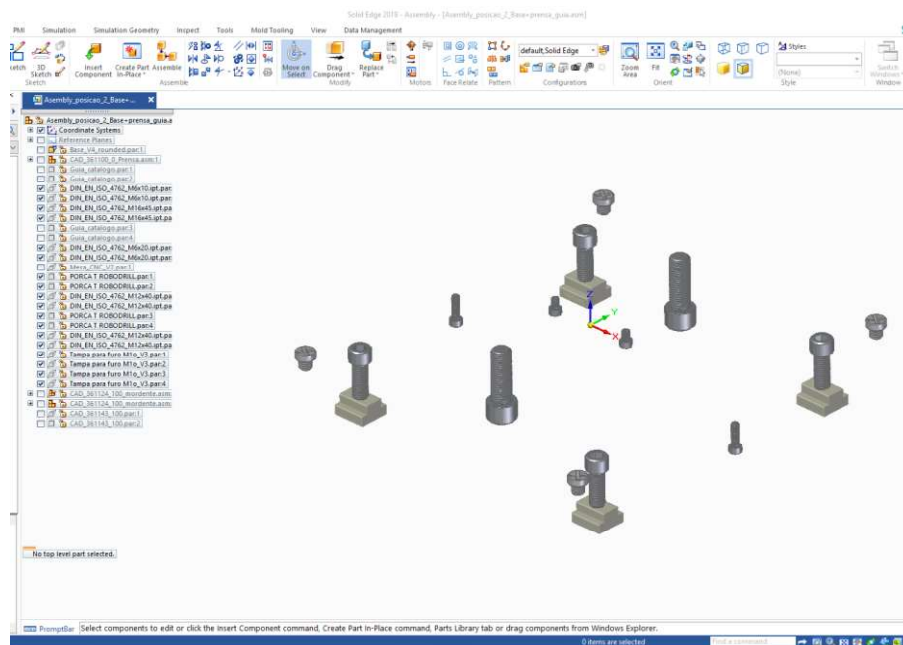
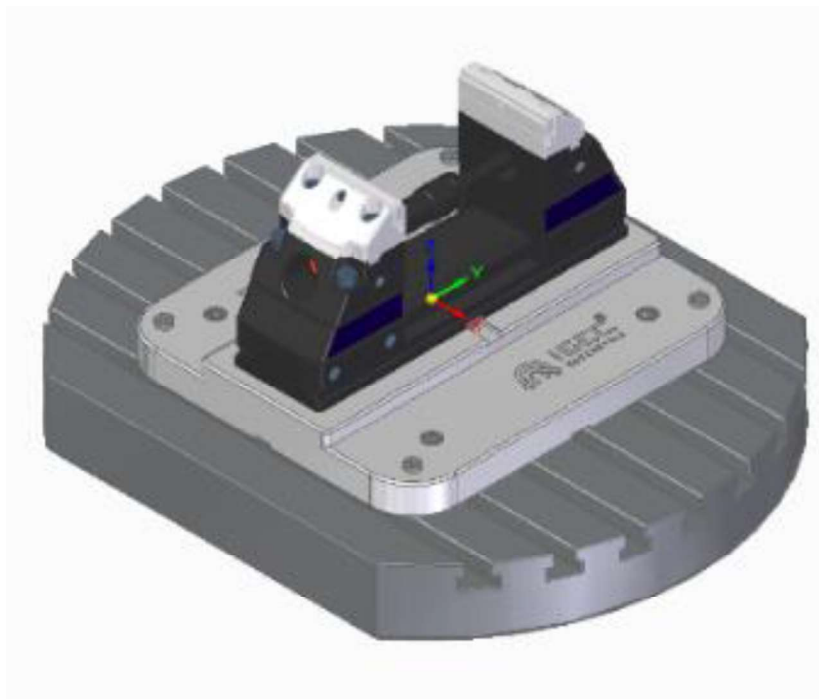


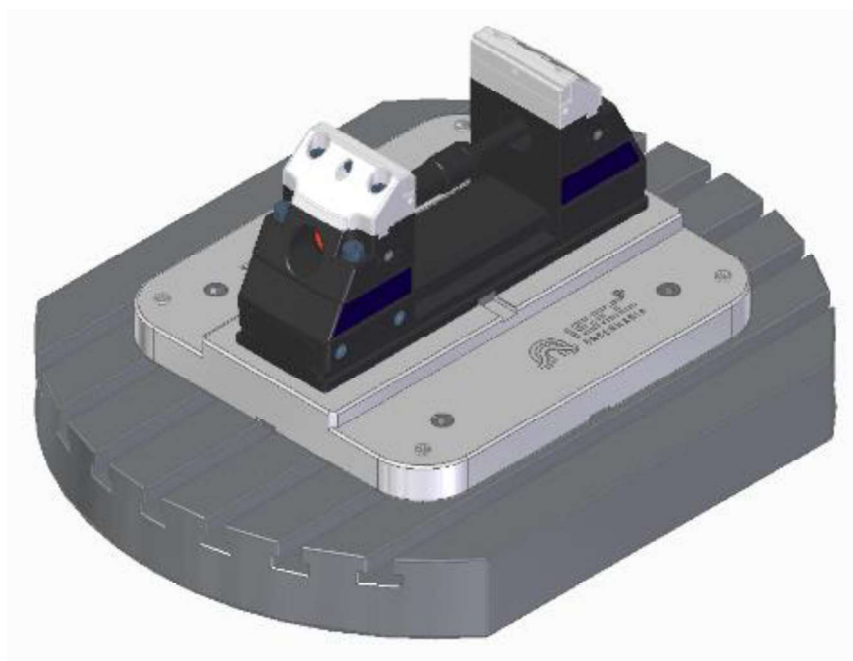
Figura 3.10 - Parafusos importados *GRABCAD* utilizados na montagem.

Quando se chega à fase de juntar várias peças numa montagem ou de testar o componente que se está a desenvolver numa montagem, é possível verificar se existe alguma interferência com os restantes componentes e criar um modelo 3D com o aspeto final do conjunto (Figura 3.11), na qual se observa montada sobre a mesa de trabalho do centro de maquinagem, a base que foi

projetada e desenhada. Assente na base, encontra-se o modelo 3D da prensa Garant XPENT 361100, a qual foi importada a partir do catálogo do fabricante. Para esta montagem foram importados desenhos 3D provenientes de fornecedores, como o caso da prensa e os seus acessórios, para assim testar todos os encaixes.



a)



b)

Figura 3.11 - Montagem da base com a prensa nas duas posições previstas no projeto. (a) Base e Prensa montada transversalmente aos rasgos da mesa; (b) Base e Prensa montada paralela aos rasgos da mesa.

Depois de todos os componentes estarem colocados nos respectivos lugares, foi realizado um teste de interferência, por forma a verificar a existência de interferências entre todos os componentes utilizados na montagem. Com recurso à ferramenta *Check Interference*, que se encontra disponível no menu *Inspect*, realizou-se a análise, verificando-se que não existe qualquer tipo de interferência, como se pode verificar na Figura 3.12.

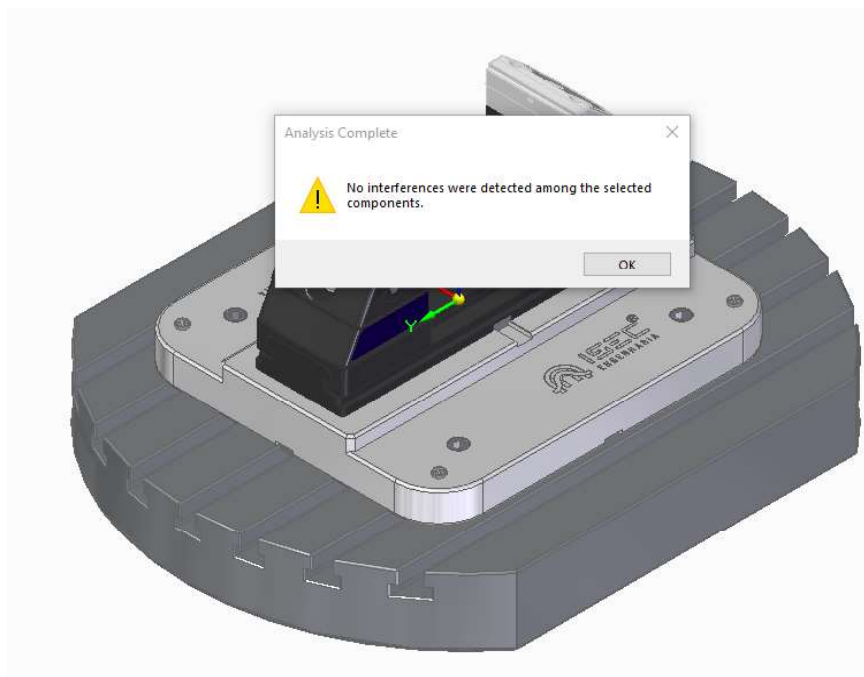


Figura 3.12 - Resultado do teste de interferências.

Após ter sido confirmada a funcionalidade da base foi criada uma imagem 3D realista com o recurso à ferramenta *KeyShot* (Figura 3.13). Assim pode-se apresentar uma imagem com o aspeto real do que vai ser produzido.

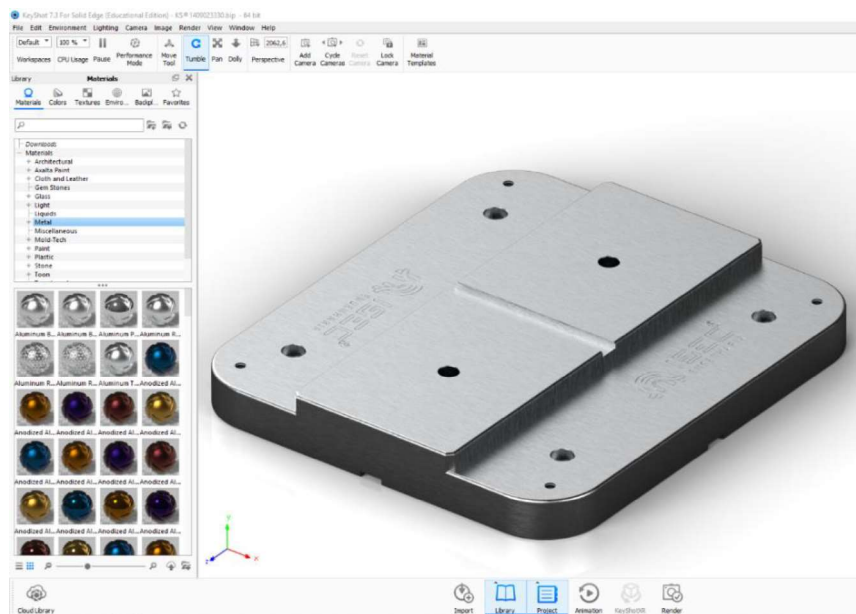


Figura 3.13 - Criação da imagem real da base

Esta ferramenta é fácil de usar e bastante intuitiva, permitindo escolher o material a utilizar, o tipo de fundo, podendo mesmo ser escolhida uma imagem real e posicionar o componente nela. É também possível selecionar o tipo de iluminação, de modo a salientar os pormenores mais importantes, entre outros. Assim têm-se uma imagem com um aspeto igual ou quase igual ao componente real (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Imagem 3D da Base.

O projeto desenvolvido teve como principal requisito a garantia que a montagem e ligação da prensa à base e da base à mesa de trabalho, fosse possível com o perfeito alinhamento entre as faces da prensa com o sistema de eixos do centro de maquinagem, o qual em linguagem corrente de maquinagem se designa de “desempeno da prensa”.

Entre as inúmeras possibilidades existentes para realizar o sistema de fixação **Mesa de Trabalho/Base/Prensa**, após diversas iterações na geometria para tornar mais simples e funcional a utilização da base, nomeadamente o rápido e simples “desempenho” da prensa, optou-se pela inclusão dos seguintes elementos que se enumeram em seguida (Figura 3.15):

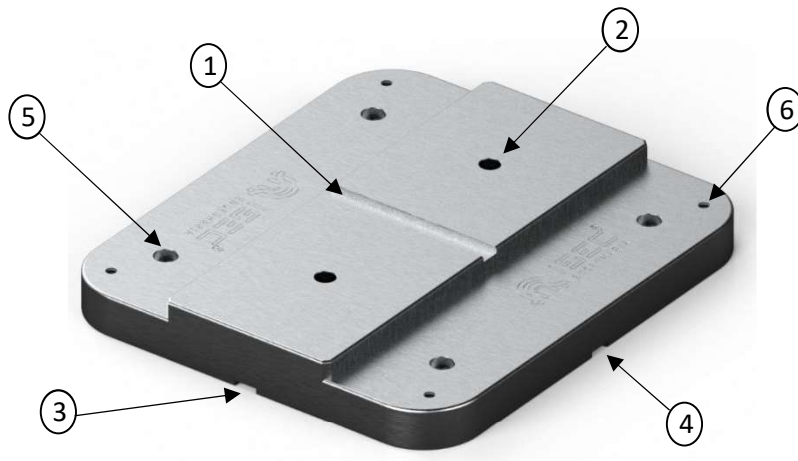


Figura 3.15 - Elementos de fixação.

1- Canal com tolerânciamento justo deslizante (H7/g6) para colocar guia que faz o alinhamento com a prensa.

2- Furação (2 furos) para aplicar parafusos de fixação rígida da base aos furos roscados existentes na prensa.

3- Canal com tolerânciamento justo deslizante (H7/g6) para colocar 2 guias, cada uma delas nos extremos do canal, com a função de efetuarem o alinhamento da base com a mesa de trabalho, quando a prensa é aplicada paralela aos rasgos da mesa.

4- Canal com tolerânciamento justo deslizante (H7/g6) para colocar 2 guias, cada uma delas nos extremos do canal, com a função de efetuarem o alinhamento da base com a mesa de trabalho, quando a prensa é aplicada transversalmente aos rasgos da mesa.

5- Furação (4 furos) para aplicar parafusos de fixação rígida da base às porcas T roscadas (apresentadas na figura 3.9), as quais se encontram encaixadas nos rasgos da mesa de trabalho. Estes furos servem para fixar a base, quer esta se encontre montada paralelamente ou transversalmente à mesa de trabalho.

6- Furação (4 furos) para aplicar temporariamente olhais para movimentar base ou aplicar tampas roscadas que evitam a intrusão de aparas e outros contaminantes durante a maquinação.

Na figura 3.16 encontra-se a vista explodida do sistema Mesa de Trabalho/Base/Prensa, na qual é possível melhor esclarecer o modo como são aplicados os elementos de guiamento/alinhamento e de fixação. O desenho técnico da vista explodida legendada, encontra-se em tamanho real no Anexo A1.

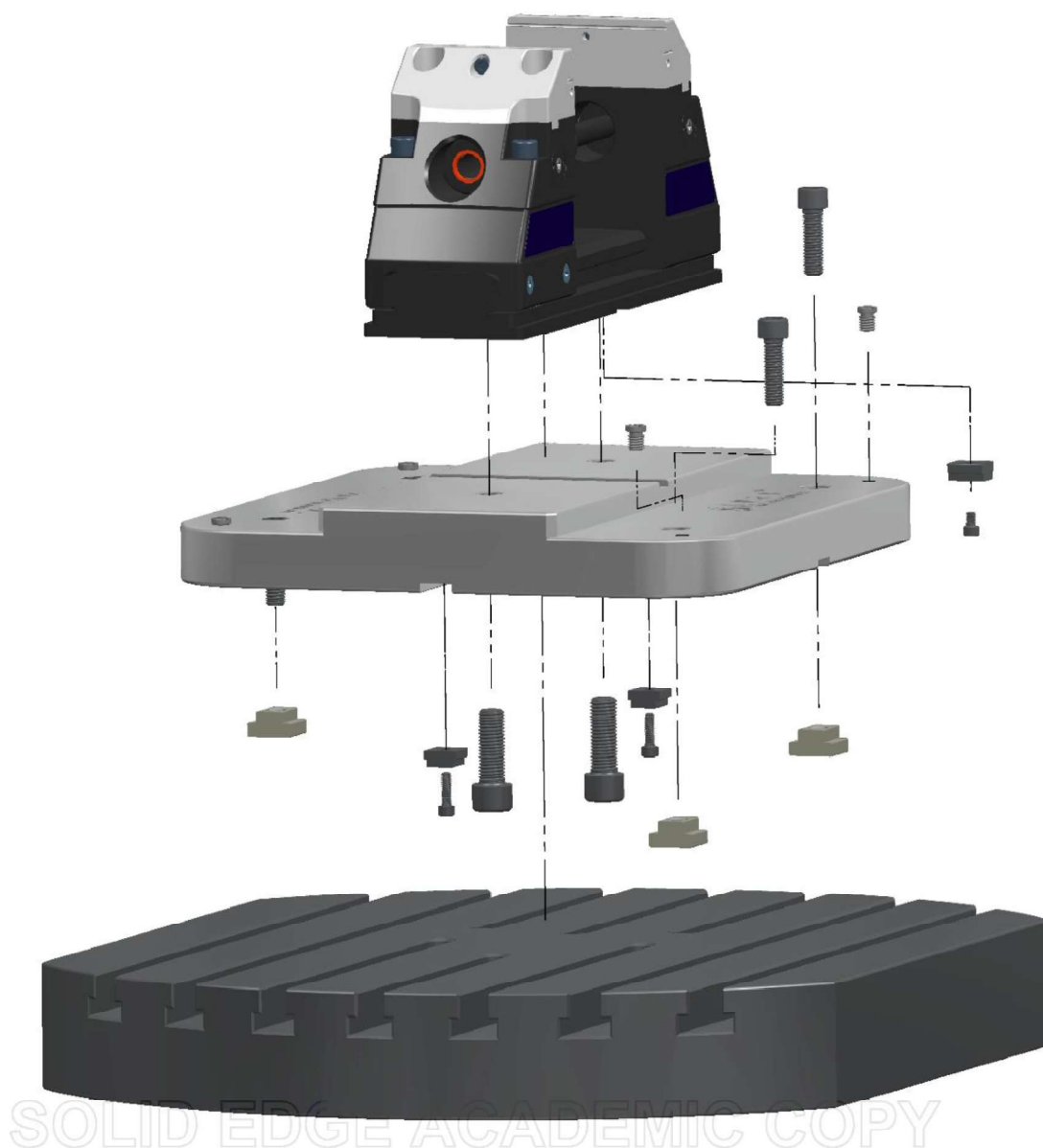


Figura 3.16 - Vista explodida do sistema **Mesa de trabalho/Base/Prensa.**

No final, quando a Base se encontra pronta para a produção, são gerados os desenhos 2D utilizados na produção e servirem para documentarem no final a base produzida. Existe uma ferramenta dedicada para criar desenhos 2D (*ISO Metric Draft*) que permite obter os desenhos desde o mais simples ao mais complexo, onde é muito fácil e prático colocar as várias vistas.

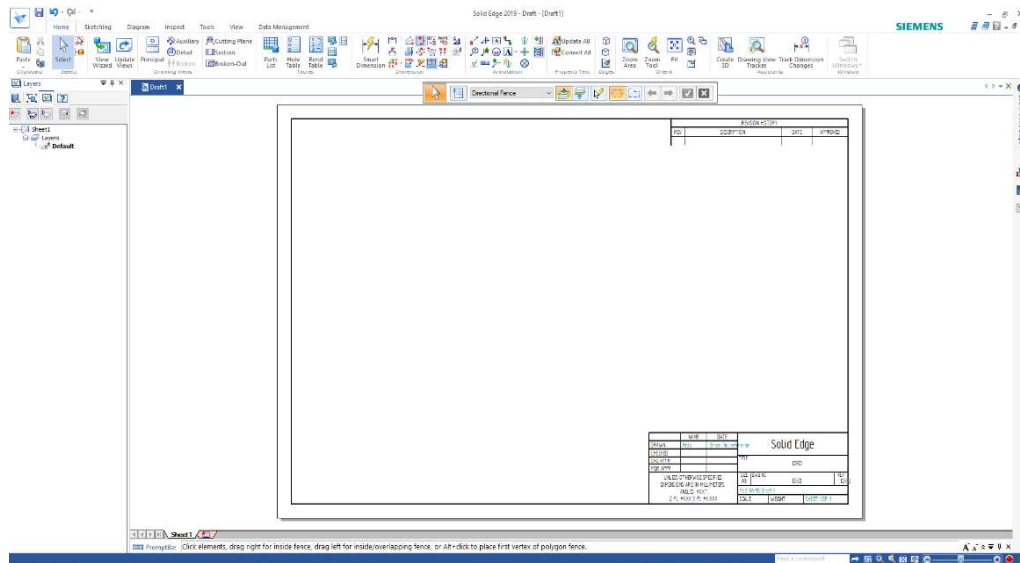


Figura 3.17 - Ambiente de desenho 2D.

Quando se importa a peça para colocar as vistas, aparece uma barra de opções onde é possível selecionar a opção *Drawing View Modify*, onde se dispõem de vistas pré-definidas, que respeitam as normas escolhidas para o desenho (método 1º diedro), ou simplesmente pode-se escolher as vistas que se pretende apresentar, personalizando assim a colocação das vistas de forma a que melhor se adapte ao componente, conforme representado na Figura 3.18.

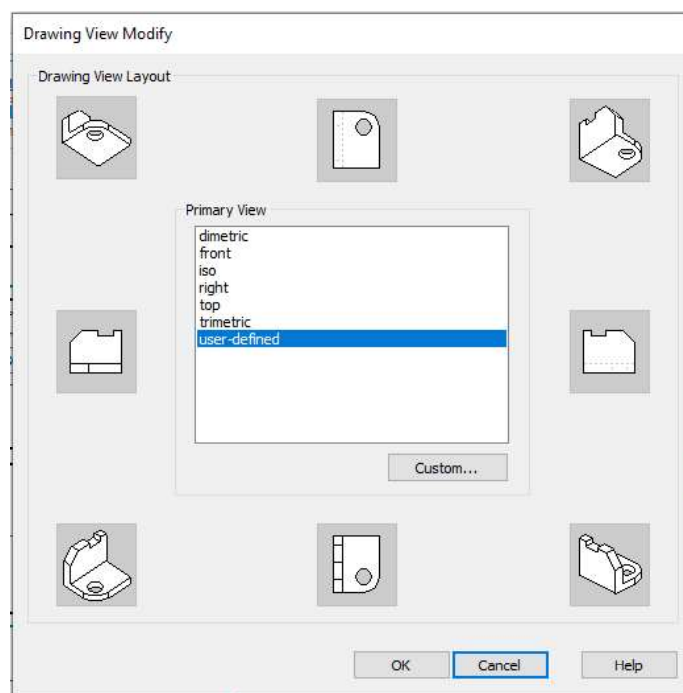


Figura 3.18 - Menu das Vista no desenho 2D.

Depois de serem escolhidas as vistas a colocar no desenho, é possível ainda colocar cortes parciais, detalhes de modo a tornar mais fácil a perceção dos pormenores que constituem o componente e colocar as respetivas dimensões/cotas, as quais podem ser inseridas de forma automática com o recurso à ferramenta *Retrieve Dimensions*. Seleciona-se a ferramenta e ao

indicar a vista pretendida, são colocadas todas as dimensões existentes na peça. Caso exista uma vista que possa estar em duplicado, é detetado o erro e não são colocadas as dimensões. Numa fase final, devem ser organizadas as dimensões/cotas, eliminando as desnecessárias, colocando as restantes de forma correta e perceptível.

Podem ainda ser introduzidas cotas de forma manual, tendo o *Solid Edge*® uma funcionalidade que permite simplificar as cotas para uma determinada anotação, como se pode observar na Figura 3.19.

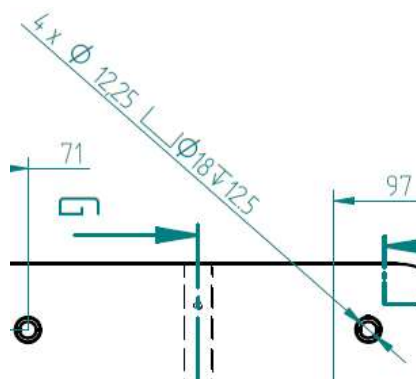
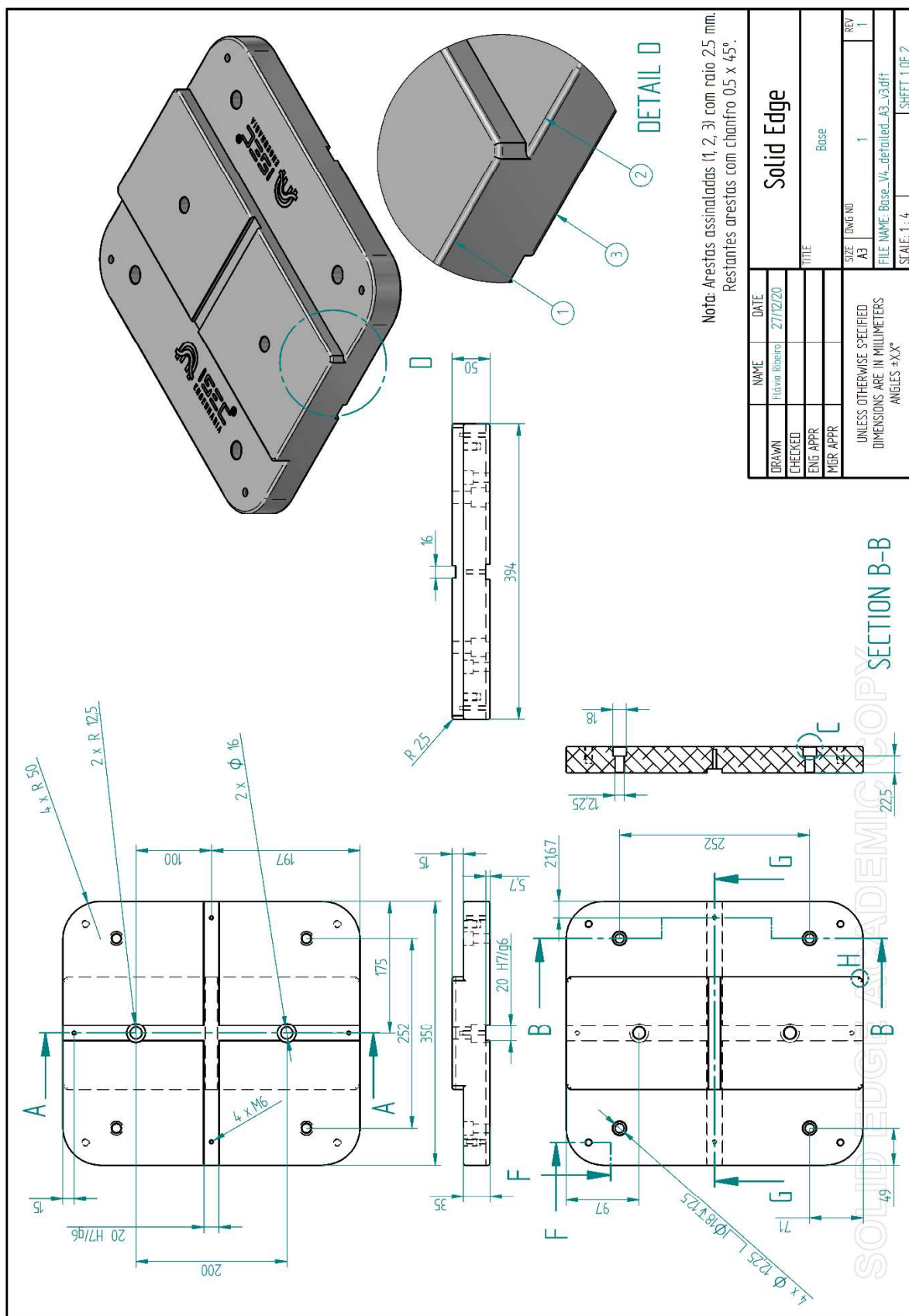


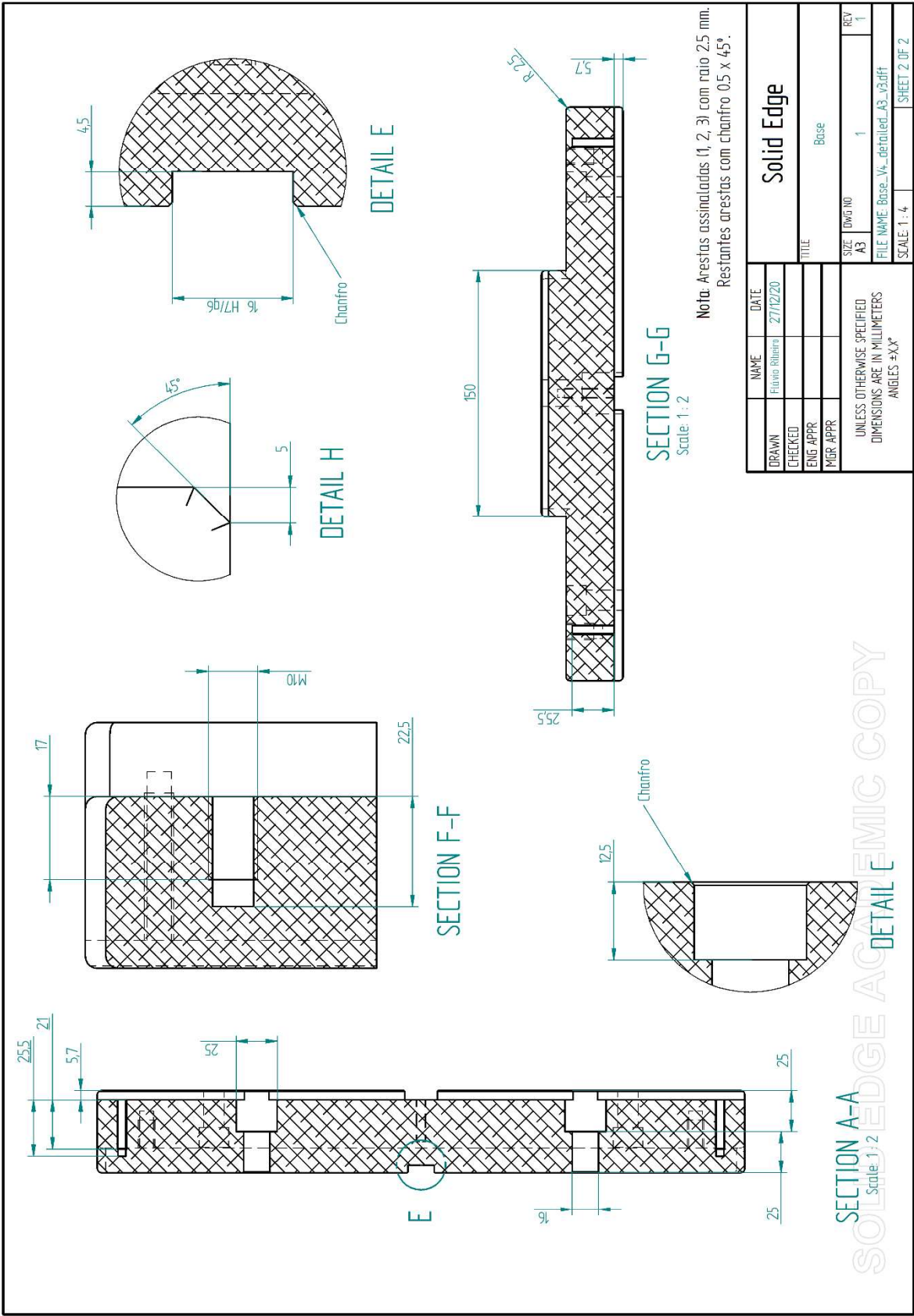
Figura 3.19 - Exemplo de cotação do *Solid Edge*®.

Assim é possível simplificar a anotação das dimensões do furo, em que se têm quatro furos com Ø 12.55 mm, com um rebaixe com Ø 18 mm e profundidade de 12.5 mm.

Os documentos técnicos representados na Figura 3.20, encontram-se disponíveis no tamanho real para consulta no anexo A2.



(a)



(b)

Figura 3.20 - (a) Desenho 2D da Base; (b) Folha com os detalhes e pormenores.

3.2. Ciclos de maquinagem e Fabrico da Base

3.2.1. Programação dos ciclos no *MasterCAM*®

Por forma a passar para a produção da Base recorreu-se ao programa *MasterCAM*® (Figura 3.21) de modo a definir os ciclos de maquinagem e criar o respetivo código CNC utilizado na operação de corte por arranque de apara. Optou-se por não detalhar exaustivamente a componente de programação com o *MasterCAM*® atendendo ser um software na qual o Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC apresenta um conhecimento e experiência consolidada nesta área, considerando-se suficiente focar os aspetos mais focados neste trabalho em específico.

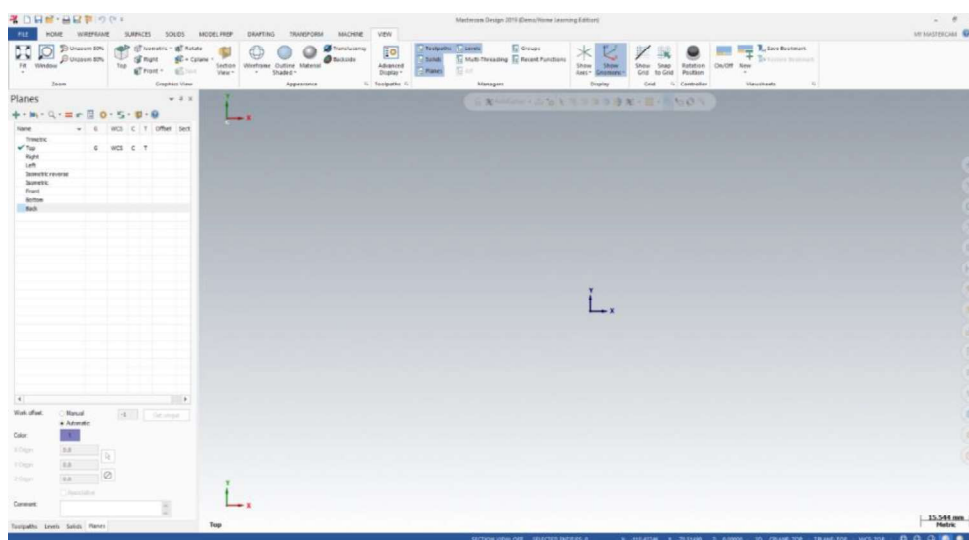
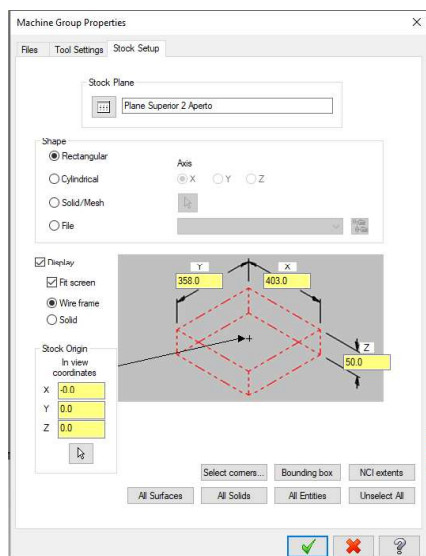
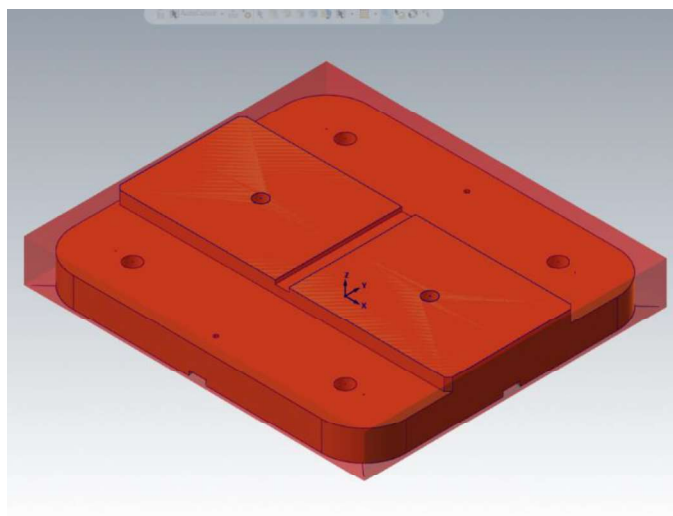


Figura 3.21 - Ambiente trabalho *MasterCAM*®.

Na primeira etapa foi importada para o programa *MasterCAM*® a geometria CAD desenhada no *Solid Edge*. Começou-se por definir de forma virtual o bloco de material (*Stock Setup*) utilizado para a simulação da maquinagem (Figura 3.22). O *Stock Setup* definido tem as dimensões iniciais do bloco de material utilizado, ou seja, 403 x 358 x 50 mm e foi definido neste bloco inicial as dimensões finais da peça de 394 x 350 x 50 mm de maneira a simular de forma correta todo o processo de maquinagem.



a)



b)

Figura 3.22 - a) Definição do *Stock Setup*, b) *Stock Setup* com inclusão da base a obter.

A peça foi posicionada para começar a programar o primeiro aperto, em que o zero peça foi definido no centro da face superior da peça, como demonstrado na Figura 3.23.

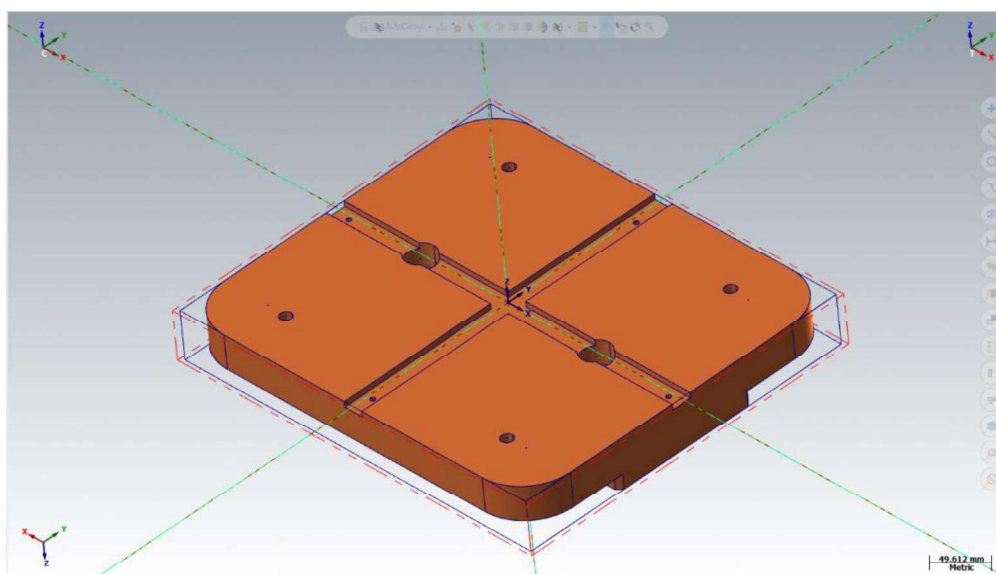


Figura 3.23 - Localização do zero peça no 1º aperto.

Todas as ferramentas utilizadas durante a programação dos ciclos de maquinagem estão discriminadas na tabela 3.1. Na Figura 3.24 encontra-se apresentada a geometria de cada uma das ferramentas efetivamente utilizada e na tabela 3.2 estão indicados os parâmetros de corte utilizados para cada uma das ferramentas.

Tabela 3.1 - Características das ferramentas utilizadas neste trabalho.

Número da ferramenta	Descrição da ferramenta
1	Fresa de topo plano de Ø 16 mm de 4 gumes
2	Fresa de topo plano de Ø 10 mm de 2 gumes
3	Fresa para chanfros a 45° (Ø superior de 8 mm)
4	Broca de Ø 5.16 mm
5	Macho M6 com canais helicoidais
6	Broca de Ø 12 mm
7	Fresa de Bolear de 2.5 mm de raio
8	Broca de 8.70 mm
9	Macho M10 com canais helicoidais
10	Fresa de gravação cónica 60°
11	Fresa de ponta esférica de Ø 1 mm



Figura 3.24 - Geometria das ferramentas utilizadas neste trabalho.

Tabela 3.2 - Parâmetros de corte das ferramentas utilizadas. (Sandvik Coromant, 2019).

Número da ferramenta	Número de gumes de corte	Velocidade de Corte [m/min]	Avanço por dente [mm/dente]	Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade de Avanço [mm/min]
1	4	200	0.1	3979	1591.6
2	2	314	0.07	10000	1400
3	4	251	0.0375	10000	1500
4	—	80	0.09	4935	450
5	3	18	1	955	955
6	1	80	0.2	2122	424.4
7	4	157	0.05	10000	2000
8	2	60	0.06	2195	263.4
9	2	15	1.5	477	715.5
10	1	113	0.16	5995	959.2
11	4	19	0.03	5900	800

Na Figura 3.25 encontra-se algumas das ferramentas menos usuais onde é possível observar com maior detalhe as geometrias de corte, como a fresa de bolear (a), fresa para chanfros (b) e Macho M6 com extração de aparas por meio do canal em hélice (c).

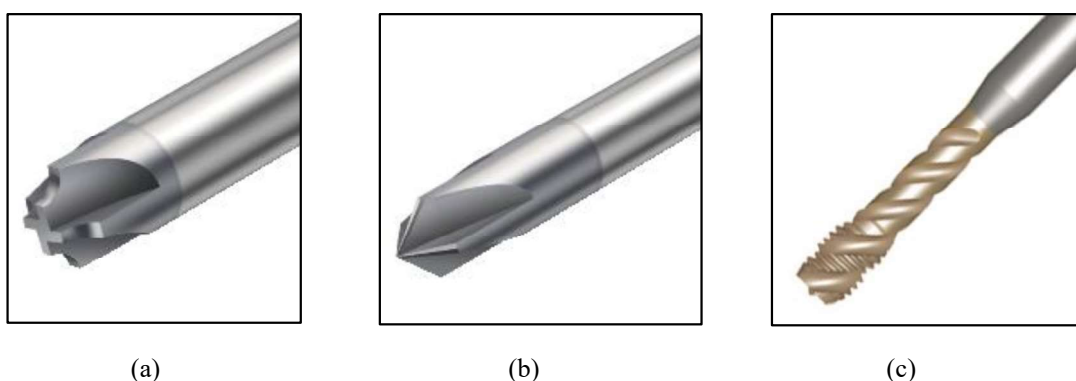


Figura 3.25 - Pormenor dos gumes de corte das ferramentas 3, 5 e 7 da Tabela 3.1.

Para iniciar o processo de programação dos ciclos de maquinagem, começou-se por criar um diretório onde são agrupadas as operações programadas (*Toolpath Group*) para cada um dos apertos utilizados, por forma a organizar e agrupar os ciclos de maquinagem e as operações de cada um dos apertos necessários para produzir a base.

Criou-se um *Toolpath Group-1* para o primeiro aperto, representado na Figura 3.26, onde vão ficar todos os ciclos de maquinagem para esta posição de trabalho.



Figura 3.26 - Ciclos de maquinagem utilizados no 1º Aperto.

Tendo em consideração que a base tem uma geometria bastante regular, formada essencialmente por superfícies planas horizontais e verticais, optou-se por utilizar maioritariamente ciclos de maquinagem 2D, com a exceção de alguns ciclos em que se recorreu a operações de maquinagem 3D. Assim sendo, foram utilizadas as seguintes operações de maquinagem para o primeiro aperto:

- **Contour (2D)**, utilizado no ciclo nº1 e nº 3, com uma profundidade de corte máxima (*Depth cuts*) de 26 mm (deixando o resto a altura da peça para maquinar no segundo aperto) e com o recurso a multipasses em que foi utilizada uma fresa de topo plano Ø 16 mm deixando uma sobreespessura de 0.25 mm para acabamento posterior.
No ciclo nº 2 e nº 4 de acabamento foi também utilizado uma operação de **Contour (2D)** utilizando uma fresa de topo plano de Ø 10 mm de;
- **Contour (2D)**, ciclo nº 13 para maquinar os cantos da peça, com recurso uma fresa de topo plano com 4 gumes com 16 mm, seguido de um **Contour (Ramp)**, ciclo nº 14 para realizar o acabamento nos cantos recorrendo a uma fresa de topo plano de Ø 10 mm
O resultado obtido nesta fase encontra-se apresentado na Figura 3.27.

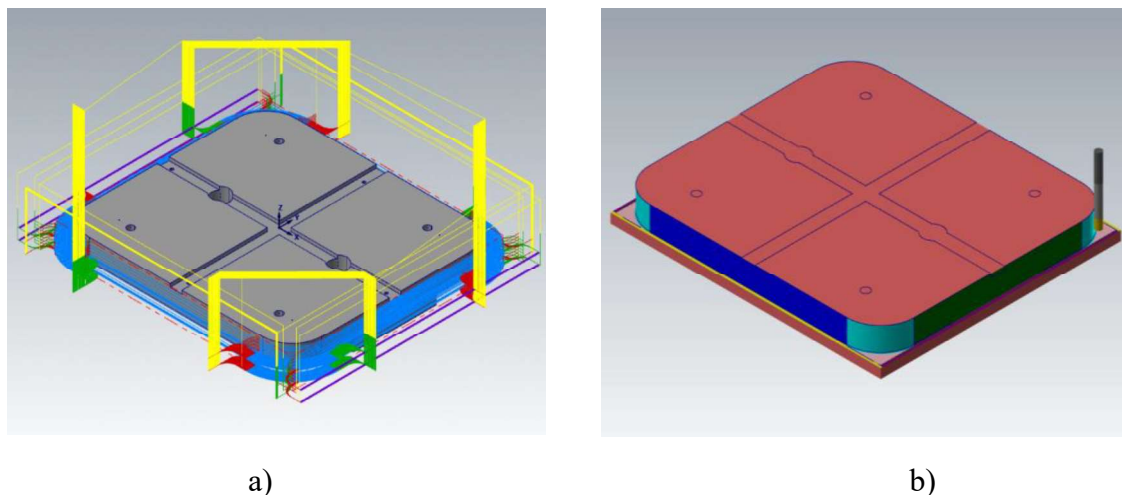


Figura 3.27 - a) Trajetória das ferramentas nas operações de desbaste e acabamento das superfícies laterais, b) Simulação da maquinagem das superfícies laterais.

- Contour (2D Chanfer)**, ciclo nº 10 e nº 17, para fazer os chanfros de 45° com recurso à fresa de chanfrar de 45°;
Contour (2D), ciclo nº 18 e nº 19 para fazer um chanfro boleado com a fresa de Bolear com raio de 2.5 mm;
- Pell Mill 2D dinâmico**, utilizado no ciclo nº 5 e nº 6 para maquinar os canais onde vão encaixar as guias.
Contour (2D), ciclo nº 8 nº 9 utilizado para acabar os canais das guias para a tolerância H7/g6 (deslizante à mão, para movimentos guiados com exatidão). Para estes dois ciclos foi utilizada uma fresa de topo plano de 2 gumes com 10 mm. Para obter a tolerância desejada, na operação de desbaste foi definida uma sobreespessura de 0.25 mm em que na operação de acabamento vai sendo retirado pequenas quantidades de material e testando o encaixe da guia, até se atingir a dimensão desejada para o ajuste pretendido (Figura 3.28)

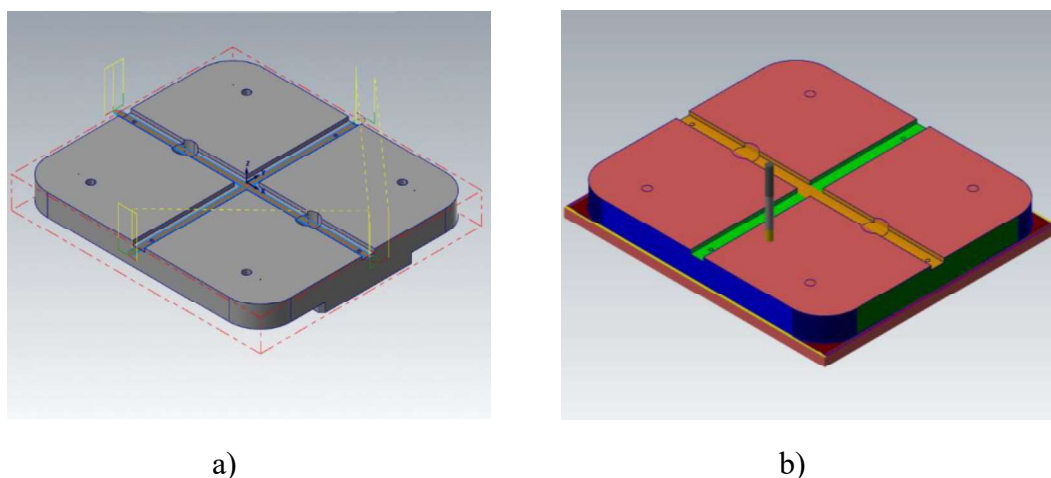


Figura 3.28 - a) Trajetória das ferramentas executada para abertura dos canais das guias, b) Simulação da maquinagem dos canais para as guias.

- **Circle Mill**, ciclo nº 7 utilizado para abrir as caixas circulares onde vão ser colocados os parafusos M16 em que se vai utilizar uma fresa de topo plano com 4 gumes com 16 mm.
- **Peck Drill**, no ciclo nº 11 onde são executados os furos com um diâmetro de 5.16 mm com recurso a broca de 5.16 mm, seguido uma operação de roscar, **Tap**, ciclo nº 12 em foi utilizado um macho M6 com canais helicoidais; **Peck Drill**, no ciclo nº 15 e nº 16, utilizando no primeiro a broca de 5.16 mm para fazer um furo guia e no segundo uma broca de 12 mm de HSS.

As Figuras 3.29 e 3.30 ilustram os ciclos de maquinagem aplicados e o resultado obtido no final das operações executadas no 1º aperto.

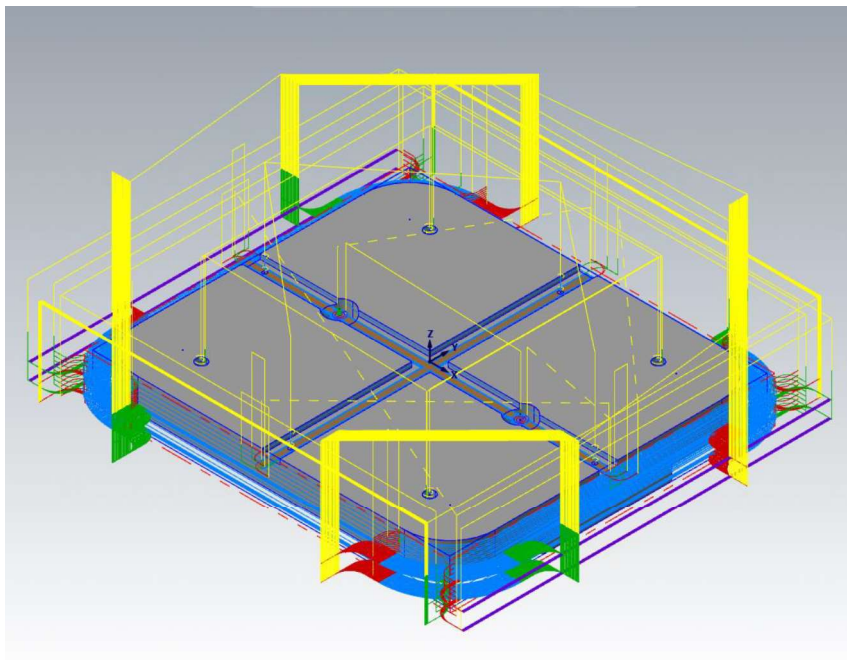


Figura 3.29 - Simulação das trajetórias das ferramentas do 1º Aperto.

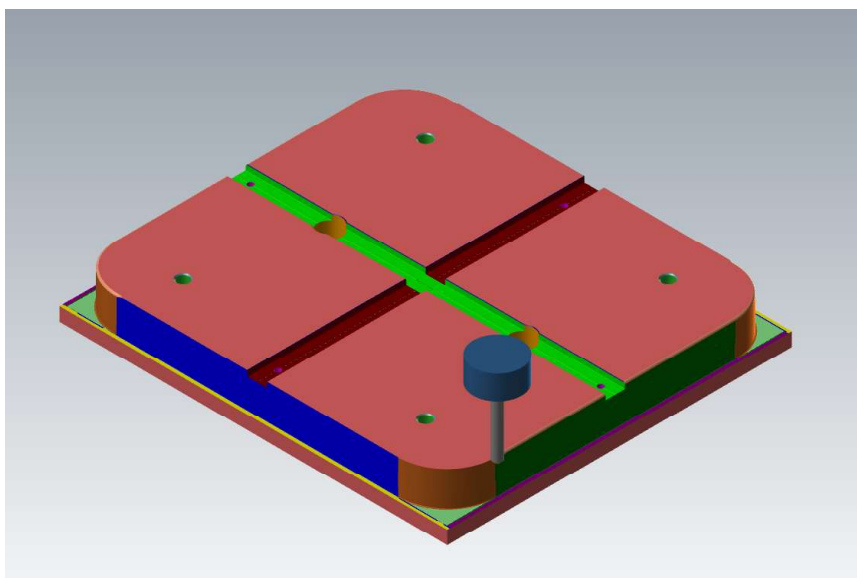


Figura 3.30 - Simulação da maquinagem do 1º Aperto.

Para o segundo aperto foi criado também um *Toolpath Group-2* onde se vão agrupar os ciclos de maquinagem e operações para este aperto, conforme representado na Figura 3.31.



Figura 3.31 - Ciclos de maquinagem do 2º Aperto.

Neste segundo aperto vão ser utilizadas maioritariamente operações de maquinagem 2D pelas mesmas razões apresentadas para o 1º aperto, tendo se recorrido em alguns casos a ciclos de maquinagem 3D por trazerem vantagens na maquinagem e no acabamento.

As operações utilizadas durante o segundo aperto são:

- **Surface High Speed Area roughing**, ciclo nº 20 com a operação para proceder ao desbaste das superfícies e assim obter duas superfícies laterais de menor altura, usando para o efeito uma fresa de Ø 16 mm; utilizou-se um ciclo **Surface High Speed Raster**, ciclo nº 21 por forma a realizar o acabamento das superfícies horizontais, usando para o efeito uma fresa de Ø 10 mm. *É também utilizada o ciclo Raster na superfície onde a prensa vai assentar de modo a conferir um aspeto visual uniforme à peça final, cujo resultado é apresentado na Figura 3.32.*

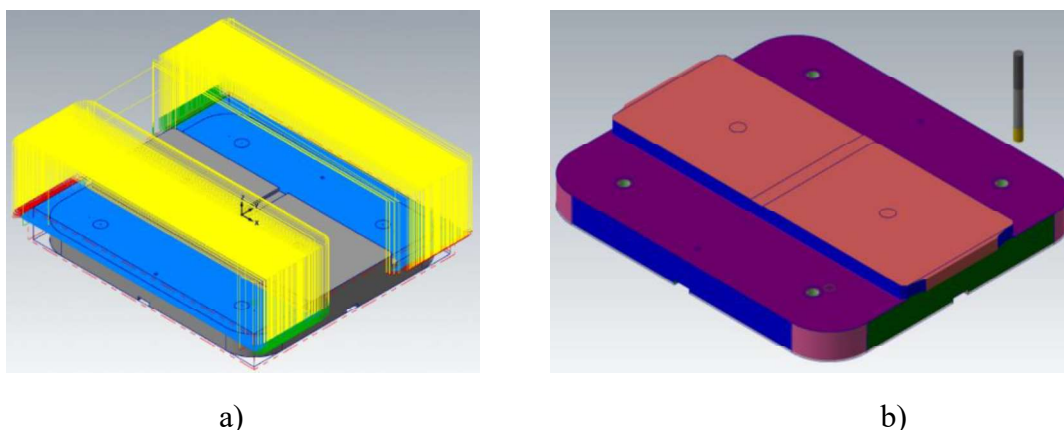
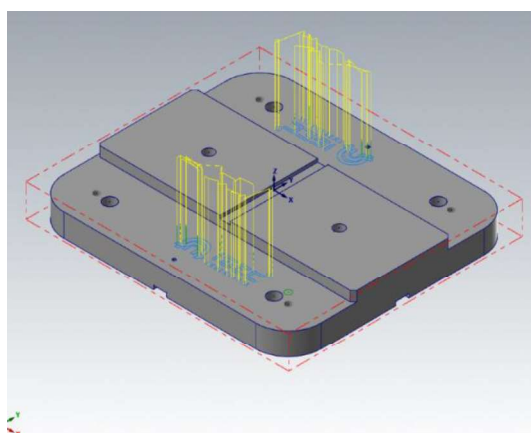
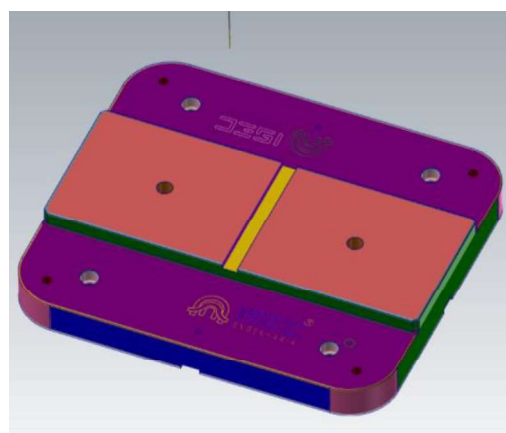


Figura 3.32 - a) Trajetórias das ferramentas dos ciclos nº 20 e nº 21, b) Simulação do processo de maquinagem de a) .

- **Contour (Ramp)**, ciclo nº 22 para realizar o acabamento das superfícies verticais com recurso a uma fresa de Ø 10 mm. O ciclo *Contour (Ramp)* foi também utilizado para realizar caixas de Ø 18 mm (ciclo nº 23), com a fresa de Ø 10 mm.
Contour (Ramp), ciclo nº 30 para realizar o acabamento das superfícies laterais, ciclo nº 31 para maquinar os furos de Ø 16 mm onde a prensa vai ser fixa. Nestes dois ciclos foi utilizada uma fresa de Ø 10 mm.
- **Contour (2D chamfer)**, ciclo nº 24 para obter os chanfros nas caixas dos furos de Ø 18 mm; *Contour (2D)*, ciclo nº 25 para obter as arestas boleadas com de 2.5 mm com uma fresa de bolear;
- **Peck Drill**, ciclo nº 26 para realizar os furos para a rosca M10 com recurso a uma broca com Ø 8.7 mm; *Tap*, ciclo nº 27 para abrir rosca para colocar os olhais, utilizado um macho M10;
- **Peel Mill 2D**, ciclo nº 28, para maquinar o canal onde vai encaixar a guia que está na prensa e vai garantir que esta vai ficar alinhada com a base, sempre que a prensa seja desmontada e volte mais tarde a ser montada, garantindo que esta fica sempre na mesma posição. Para realizar o acabamento deste canal e conferir o ajuste de H7/g6, foi utilizado o ciclo *Contour 2D*, ciclo nº 29, tendo sido deixado no ciclo anterior 0.25 mm de sobreespessura para acabamento. Foram realizadas várias passagens em que se retirou pequenas quantidades de material até atingir as dimensões desejadas da tolerância. Nestes dois ciclos foi utilizada uma fresa de Ø 10 mm.
- **Engraving**, ciclo nº 36 e nº 39, utilizado para gravar as letras de “Engenharia” com o recurso a uma fresa de gravação com ângulo de ponta de 60°.
Contour (2D), ciclos nº 37, nº 38, nº 40 e nº 41 utilizados para gravar o logo e letras do ISEC® com recurso a uma fresa de ponta esférica de Ø 1mm. O resultado dos ciclos descritos encontra-se apresentada na Figura 3.33.



a)



b)

Figura 3.33 - Trajetória das ferramentas no logo e letras ISEC®, b) Simulação da maquinagem da gravação do logo e letras ISEC® e resultado final da maquinagem do 2º aperto.

Após a programação e verificação de todos os ciclos de maquinagem, passou-se para a fase de produção da Base. Para tal, para cada um dos ciclos programados foi executado o pós-processamento, etapa na qual é gerado o código CNC correspondente aos movimentos a realizar pelas respetivas ferramentas, bem como todas as operações acessórias (troca de ferramenta, ativação da refrigeração, definição dos parâmetros de corte, etc.)

3.2.2. Maquinagem da Base

No fim de ser gerado o código CNC de todos os ciclos programados, passou-se para a produção da Base em que foi utilizada a máquina CNC HAAS UMC 750SS que está instalada no laboratório de Biomecânica do ISEC[®], representada na Figura 3.34, e na qual a Base vai ser utilizada no futuro.



Figura 3.34 - Máquina utilizada, HAAS UMC 750SS.

O material utilizado para produção da base foi a liga de alumínio AW 5083 retificado (Figura 3.35), proveniente de chapas/placas de alumínio de precisão fundidas, que tem uma excelente estabilidade dimensional, uma característica muito importante na aplicação da Base, aliado a um baixo nível de tensão residual interna que faz com se reduza bastante a deformação da chapa/placa durante a maquinagem, evitando desta forma operações adicionais para correção dessas deformações. Este tipo de alumínio é utilizado na indústria aeronáutica e espacial bem como nas ferramentas de calibração. O material foi encomendado com as seguintes dimensões 403 x 358 x 50 mm. Com uma altura retificada a 50 mm, que é a altura definida para a Base, por forma a garantir que as duas faces opostas são paralelas entre si e evitar desperdício de material ao maquinar as faces para as tornar retificadas e paralelas.



Figura 3.35 - Bloco inicial de material para produzir a Base.

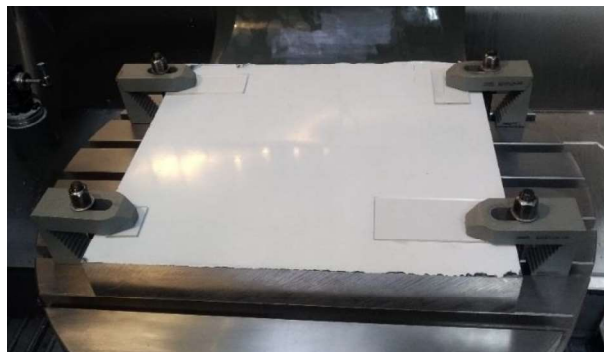
Durante o processo de maquinagem da Base foi utilizado fluído de corte, pois na maquinagem de ligas de alumínio é importante a sua utilização uma vez que é normal surgirem problemas de adesão ou acumulação de material (empapar) na aresta de corte das ferramentas.

Este fluído de corte é constituído por um óleo de corte solúvel numa solução aquosa, formando uma emulsão leitosa utilizada como lubrificante e líquido de refrigeração da ferramenta/peça para evitar problemas durante a maquinagem, tais como o aumento da temperatura de corte e adesão da peça à ferramenta, melhorando assim o resultado final dos componentes produzidos.

Passou-se para a maquinagem do primeiro aperto, fixando o bloco de alumínio a ser utilizado na produção da base. Para fixar o bloco de material foram utilizados grampos planos, AMF 6314 Z – 14 x 100, com umas pequenas proteções de acrílico de modo a não marcar as superfícies retificadas, conforme representado na Figura 3.36. Foi utilizada uma chave dinamométrica para apertar o bloco com 70 Nm para fixar e garantir que a peça não se movimentava durante o processo de maquinagem.



a)



b)

Figura 3.36 - a) Grampos utilizados para fixar o bloco b) Bloco fixo com os Grampos.

De seguida, com o recurso a uma sonda de transmissão de sinal ótico (Renishaw® *OMP40-2*), representada na Figura nº 3.37, recorrendo a programas incluídos no centro de maquinagem, foi calculado o zero peça de forma automática.



Figura 3.37 - Procedimento para o cálculo do Zero Peça com sonda Renishaw.

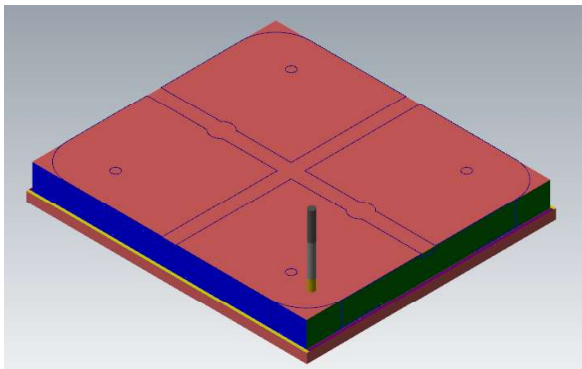
No passo seguinte foi iniciada a maquinagem, começando por executar o desbaste de duas faces laterais, ciclo nº 1, com recurso a uma fresa de Ø 16 mm. No ciclo nº 2, para o acabamento destas faces, foi utilizada uma fresa de Ø 10 mm como representado na Figura 3.38.



Figura 3.38 - Maquinagem das faces, ciclo nº2.

Após se maquinarem duas das faces, os grampos foram mudados de posição, de modo a que a fixação da peça permitisse a execução das próximas operações (ciclos nº 3 e nº 4 iguais aos mencionados anteriormente, alterando apenas a geometria selecionada), mudou-se um grampo de cada vez para evitar que a peça se movimentasse tendo sido colocadas as mesmas proteções de acrílico para não marcar as superfícies ao reapertar os grampos. Esta configuração de fixação

da peça permite também maquinar os canais (Figura 3.41), onde será ajustada a guia representada na Figura 3.40.



a)



b)

Figura 3.39 - a) Simulação da maquinação das faces laterais. b) Maquinação das faces laterais da Base.

As guias possibilitam alinhar a Base com a mesa, permitindo que quando for colocada a base na mesa, esta vá sempre ficar na mesma posição, independente do número de vezes que seja montada/desmontada, garantindo que esta fica sempre paralela ao eixo do X ou ao eixo Y, consoante a forma de montagem.



Figura 3.40 - Guia utilizada na montagem que faz o alinhamento da Base com a mesa do centro de maquinação.

Para estas operações, (ciclo nº 5 e nº 6), recorreu-se a uma operação dinâmica de alta velocidade (*2D High Speed Peel Mill*), em que se maquinaaram os canais a uma profundidade final de 5.7 mm e uma largura próxima do 20mm pois optou-se por deixar uma espessura de 0.25mm nas laterais para acabamento, para posteriormente obter o ajustamento pretendido. (Figura 3.41).

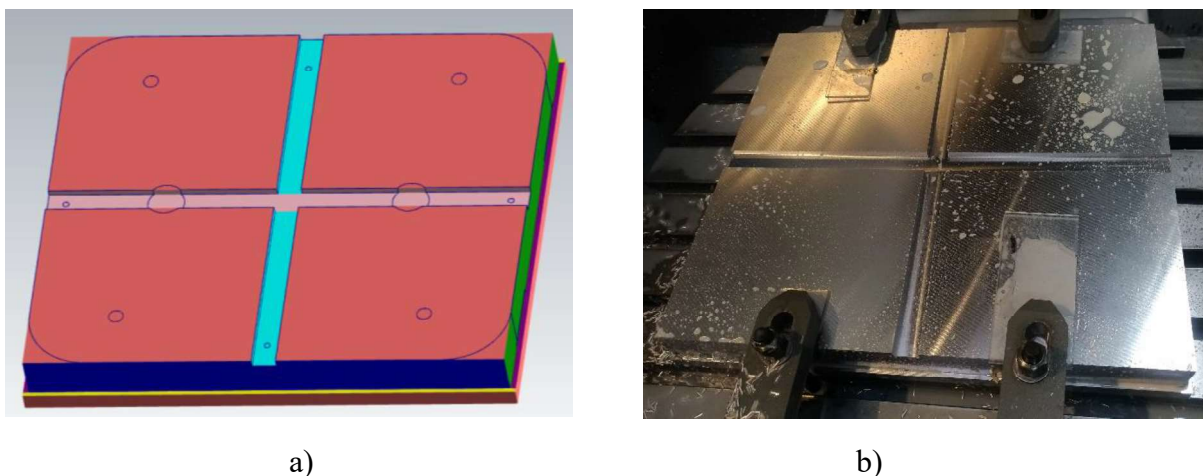


Figura 3.41 - a) Simulação da abertura das caixas para as guias, b) Caixas para as guias maquinadas.

Numa etapa posterior foram maquinadas as caixas que vão alojar a cabeça dos parafusos M16 que vão fixar a prensa à Base, ciclo nº 7, com recurso a uma operação de *Circle Mill* e utilizando uma fresa de Ø 10 mm (Figura 3.42).

Nos ciclos nº 8 e nº 9, foi executado o acabamento na caixa das guias, recorrendo a uma operação de fresamento de contornos (*Contour (2D)*), utilizando para o efeito uma fresa de Ø 10 mm. Estas caixas tem um ajuste H7/g6 (para movimentos guiados com exatidão), representada na Figura 3.40, foi previamente adquirida com as superfícies calibradas.

No ajustamento H7/g6, a largura da caixa tem uma cota nominal de 20 mm com uma cota mínima de 20.000 e máxima de 20.021 mm. A Guia tem uma cota nominal de 20 mm, no qual a cota mínima é de 19.080 e máxima de 19.093 mm.

Para atingir estas especificações executaram-se várias passagens de corte, retirando pequenas quantidades de material, testando a cada passagem o encaixe da Guia, de modo a verificar quando seriam encontradas as cotas necessárias.

Como foi mantido no desbaste uma espessura de 0.25 mm, no acabamento retirou-se 0.01 mm a cada passagem. Após cada passagem tentou-se encaixar a Guia e verificar o encaixe de modo a perceber se este estava perto da cota pretendida, até ser obtido o ajuste pretendido. Foram realizados chanfros a 45° com 0.5 mm de altura nas arestas interiores das caixas (Figura 3.42).



Figura 3.42 - Caixas para encaixe das guias, onde se encontram os chanfros realizados nas arestas interiores.

No interior das caixas produzidas, junto às extremidades, foram efetuados furos para fixar as guias nas suas posições, (ciclo nº 11). No ciclo nº 12, recorreu-se a uma operação de roscar (*Tap*) para abrir rosca M6 até uma profundidade de 21 mm (Figura 3.43).

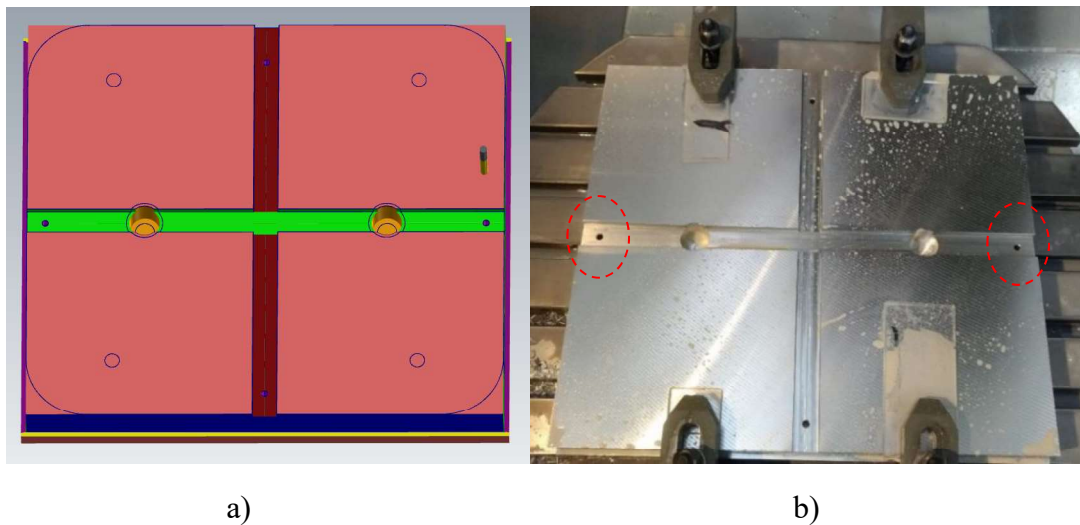


Figura 3.43 - a) Simulação das caixas para os M16 e furos M6, b) Maquinagem dos ciclos simulados em a).

Após voltar a reajustar os Grampos, reposicionando-os para se conseguir maquinar os 4 furos de $\varnothing 12$ mm, procedeu-se primeiramente à operação de desbaste dos cantos da Base (ciclo nº 13), realizando posteriormente uma operação de acabamento (ciclo nº14).

Com os ciclos nº 15 e 16, foram realizados os 4 furos de $\varnothing 12$ mm representados na Figura 3.44.

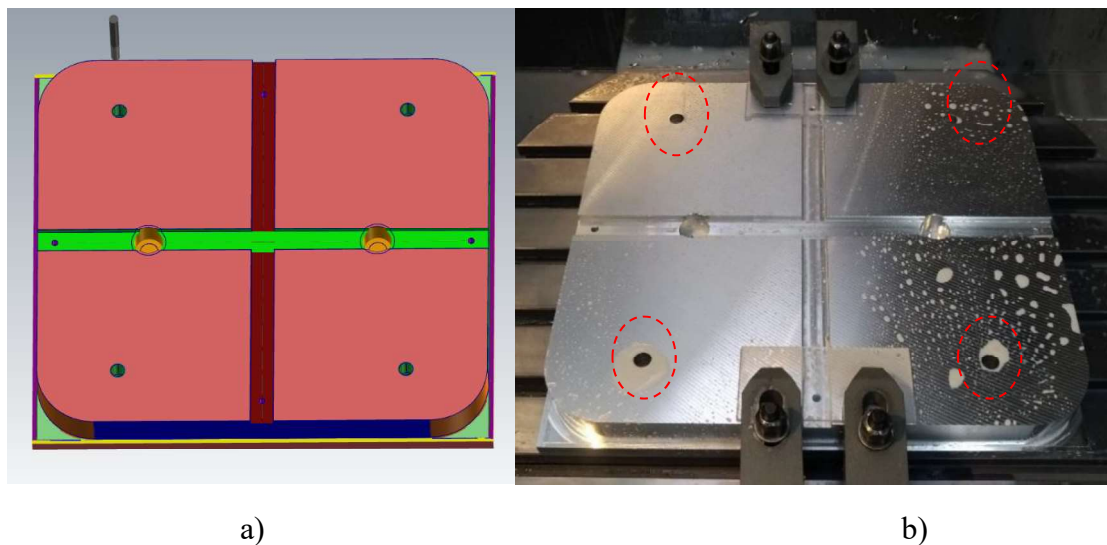


Figura 3.44 - a) Simulação da maquinagem dos furos de Ø 12mm e dos cantos, b) Maquinagem dos furos Ø 12 mm e dos cantos.

Como operações finais foram realizados os chanfros e o boleado nas restantes arestas da peça. No ciclo nº 17 maquinou-se os chanfros a 45° com 0.5 mm para os furos de Ø 12 mm.

Para as arestas exteriores da base, optou-se por maquinar um boleado com raio de 2.5 mm, (ciclos nº18 e 20) utilizando uma fresa de bolear (Figura 3.45), terminando assim a maquinagem do primeiro aperto (Figura 3.46).

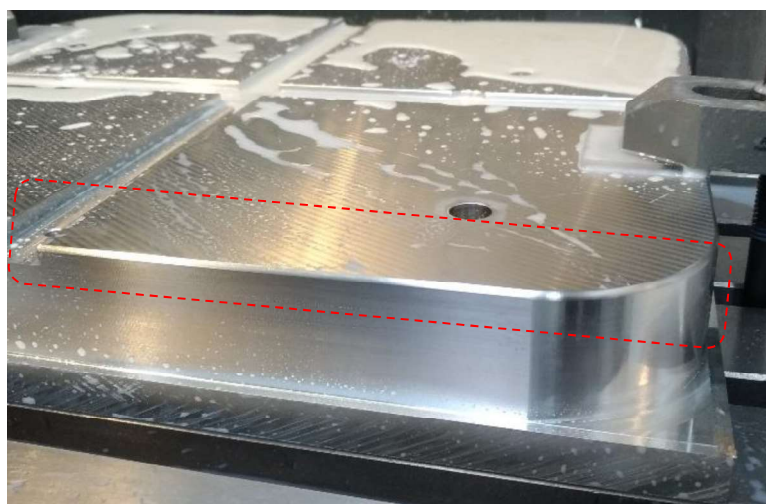


Figura 3.45 - Boleado realizado nas arestas exteriores da Base.

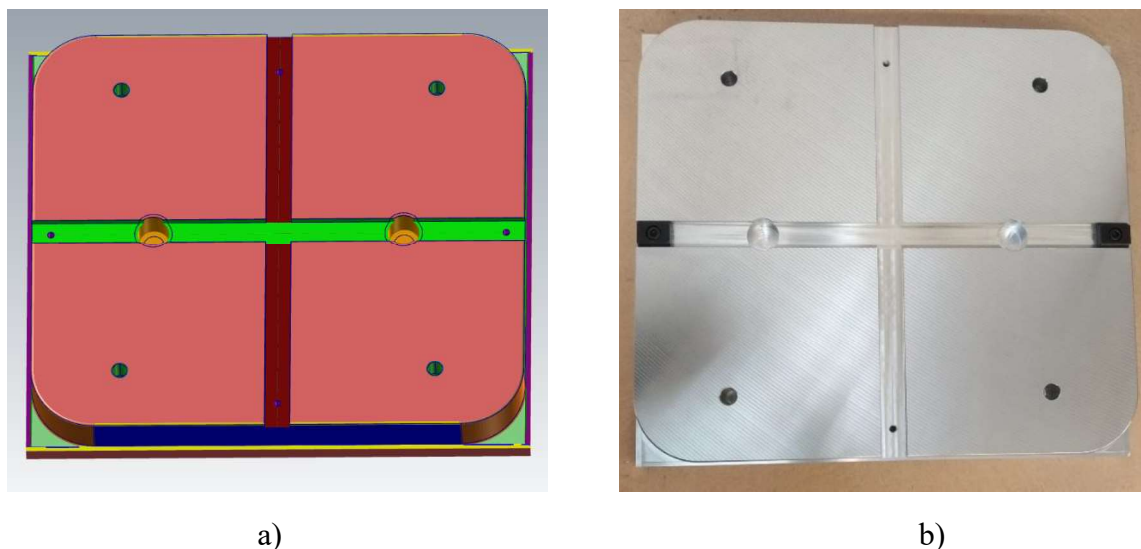


Figura 3.46 - a) Simulação de todos os ciclos do 1º Aperto, b) Ciclos do 1º Aperto executados, com as 2 guias montadas.

Na maquinação do segundo aperto, as guias foram utilizadas para manter a Base alinhada com o eixo do X, uma das posições finais em que a base vai ser utilizada, garantido assim que os próximos ciclos de maquinação vão ficar corretamente posicionados e que a peça fica com as dimensões corretas.

A primeira abordagem feita após a fixação da peça, consistiu na realização do desbaste de 2 faces laterais e dos cantos da peça. (Figura 3.47).



Figura 3.47 - Desbaste dos cantos.

Foram mudados os grampos de lugar, para se proceder ao desbaste e acabamento das 2 restantes faces laterais. No ciclo nº 20, foi executado o desbaste em altura, de modo a permanecer a parte central, onde será acoplada a prensa, mais elevada. (Figura 3.48).

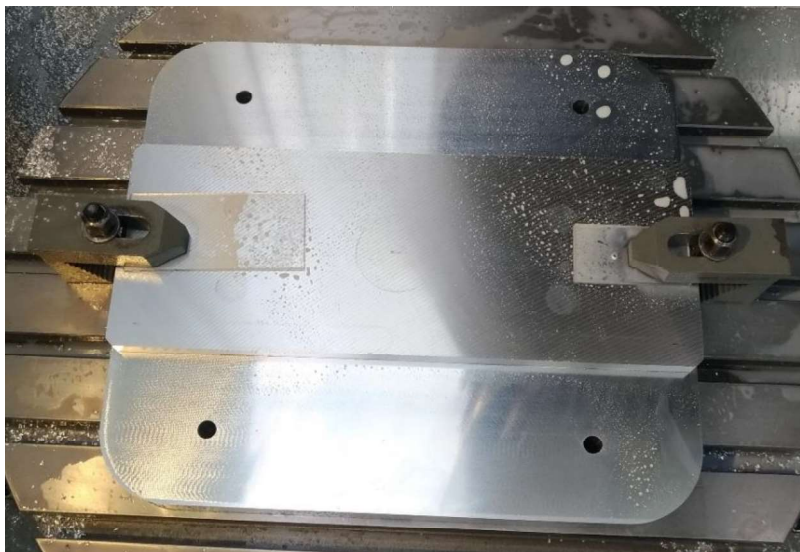
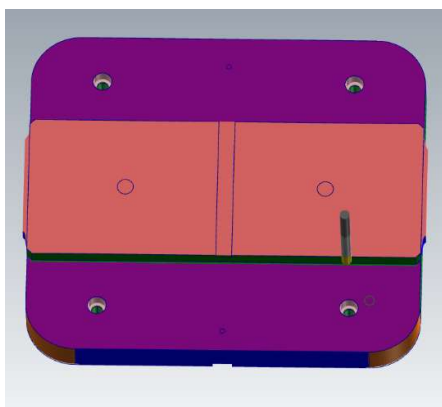


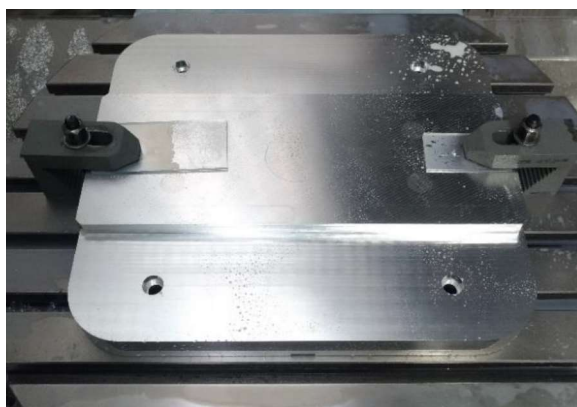
Figura 3.48 - Desbaste em altura (ciclo nº20).

Para o acabamento, no ciclo nº21, recorreu-se a uma operação que têm a particularidade de criar um efeito visual na superfície maquinada. Após cada passagem fica uma marca constante e uniforme, formando um padrão.

No ciclo nº 22 foi realizado o acabamento das superfícies verticais. As caixas dos 4 furos com $\varnothing$ de 18 mm, ciclo nº 23, onde vão encaixar as cabeças dos parafusos M12 foram maquinadas nesta altura, como representado na Figura 3.49.



a)



b)

Figura 3.49 - a) Simulação dos ciclos para obter as 4 caixas de $\varnothing$ 18 mm para os furos; b) Resultado obtido com a maquinação das 4 caixas dos furos.

No ciclo nº 24, realizou-se os chanfros a 45° com a 0.5 mm nos rebaixas com $\varnothing$ 18 mm (para os parafusos M12). Nas arestas exteriores, ciclo nº 25, realizou-se um boleado com raio 2.5 mm, como representado na Figura 3.50.



Figura 3.50 - Chanfro de 45° com 0.5 mm e boleado com raio de 2.5 mm.

No ciclo nº 26 foi utilizada uma operação de furação seguida no ciclo nº 27, de uma operação para abrir uma rosca M10, tendo como objetivo colocar olhais para facilitar no manuseamento da Base (Figura 3.51).



a)



b)

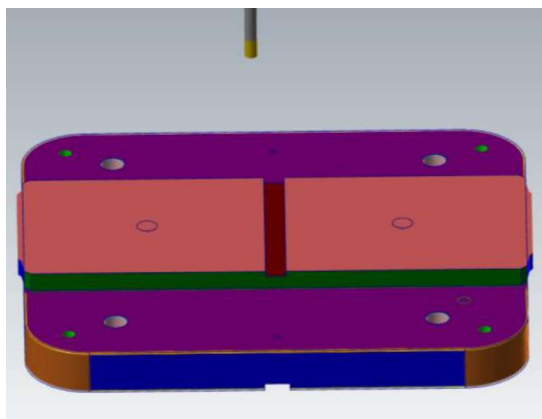
Figura 3.51 - a) Furos com rosca M10 para os olhais; b) Aplicação dos Olhais (numa fase final).

Sendo que as partes principais já foram maquinadas, utilizou-se um comparador mecânico com uma base magnética acoplada ao eixo do Z para confirmar que as superfícies laterais estavam paralelas ao eixo do X, uma vez que a Base está encaixada com as guias na mesa de trabalho (Figura 3.52).



Figura 3.52 - Análise do alinhamento da base com a mesa de trabalho.

A próxima etapa consistiu em maquinar o canal para a guia que está na prensa e que garante o alinhamento entre esta e a Base (Figura 3.53). No ciclo nº 28 foi executada a maquinação do canal mantendo uma sobreespessura de 0.25 mm para acabamento posterior, de modo a permitir obter o ajustamento desejado. Como já foi explicado na elaboração dos canais anteriores para garantir o ajuste de H7/g6, no ciclo nº 29 foi retirando pequenas quantidades de material até se atingirem as dimensões pretendidas



a)



b)

Figura 3.53 - Comparação entre simulação a) e maquinação b) das operações realizadas até ao ciclo nº 29.

Como se observa na imagem seguinte, para proceder às restantes operações de maquinagem foram utilizados os furos de fixação da Base para a fixar à mesa, (Figura 3.54).

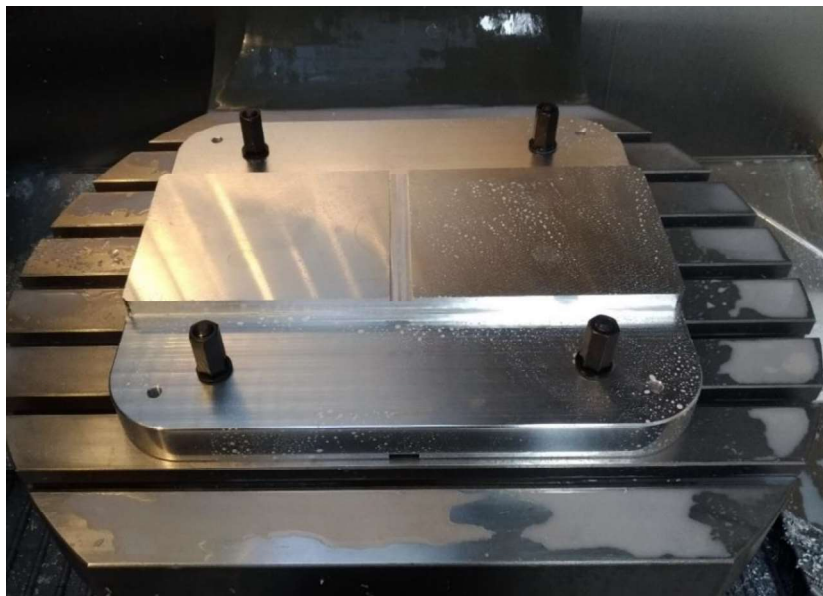


Figura 3.54 - Alteração da fixação da Base.

No ciclo nº 30 realizou-se o acabamento das faces laterais e no ciclo nº 31 foi realizado na superfície mais elevada os 2 furos com $\varnothing$ de 16 mm, os quais vão permitir a ligação da base à mesa por intermédio de parafusos, (optou-se por retirar mais 0.1 mm no diâmetro para garantir uma pequena folga para colocar com maior facilidade o parafuso) (Figura 3.55).

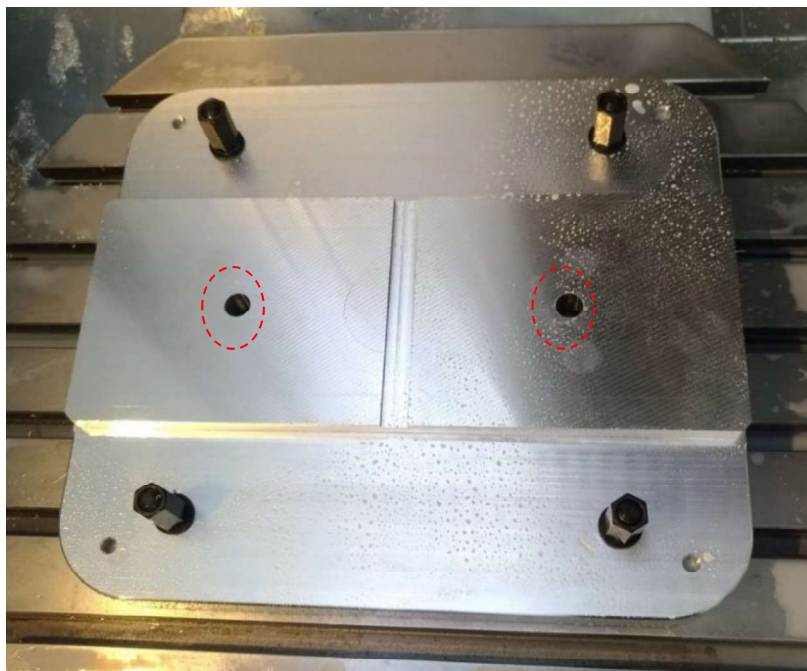


Figura 3.55 - Furos para parafusos M16.

O ciclo nº 32 foi utilizado para conferir à peça um acabamento uniforme com um padrão caracterizado pelos parâmetros de maquinagem seleccionados (Figura 3.54).



a)



b)

Figura 3.56 - Aspeto da superfície final, a) Pormenor do padrão criado pelo *Raster*, b) Vista geral da peça.

Nas etapas seguintes procedeu-se à maquinagem dos chanfros para as arestas dos furos de Ø 16mm e nas arestas da caixa da guia (ciclos nº 33 e 34). Para as arestas exteriores do topo, no ciclo nº 35, foi realizado o boleado, como representado na Figura 3.57 e Figura 3.58.



Figura 3.57 - Pormenor dos chanfros e do acabamento das superfícies.



Figura 3.58 - Aspetto quase final das superfícies da base.

O passo final consistiu na gravação do logótipo do ISEC (Figura 3.59), sendo o resultado final da simulação e maquinação do 2º aperto apresentado na Figura 3.60.



Figura 3.59 - Logótipo ISEC®.

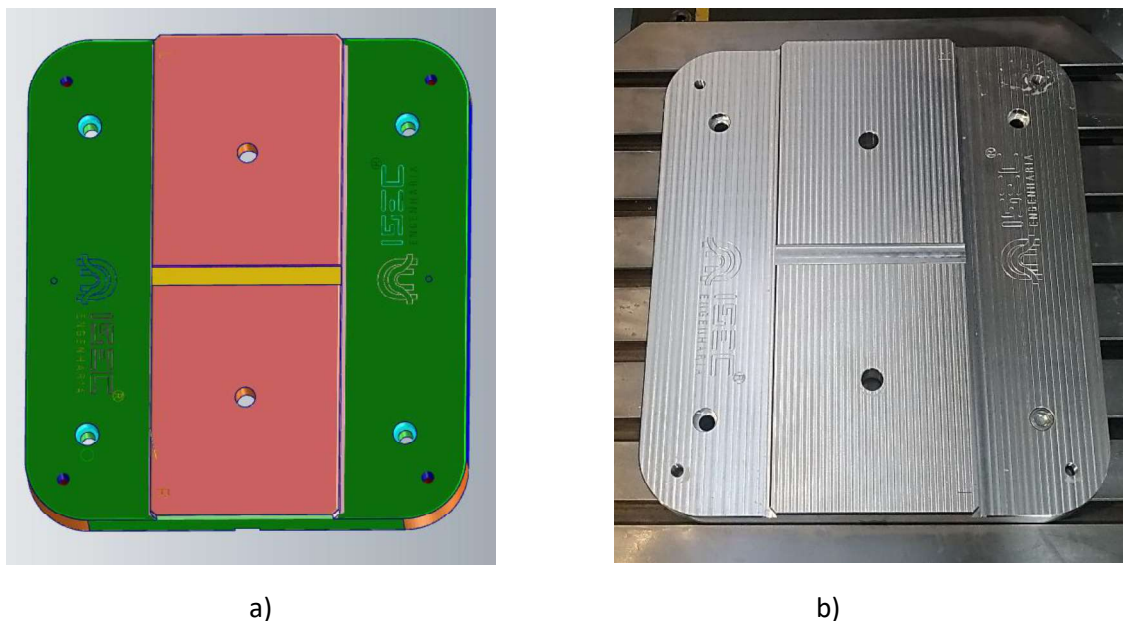


Figura 3.60 - a) Simulação de todas as operações realizadas no 2º Aperto, b) Maquinagem de todas as operações do 2º Aperto.

Na Base foram gravadas a letra L e R, para indicar o lado esquerdo e direito, respetivamente, para que a Base ser montada na mesma posição, como representado na Figura 3.61.

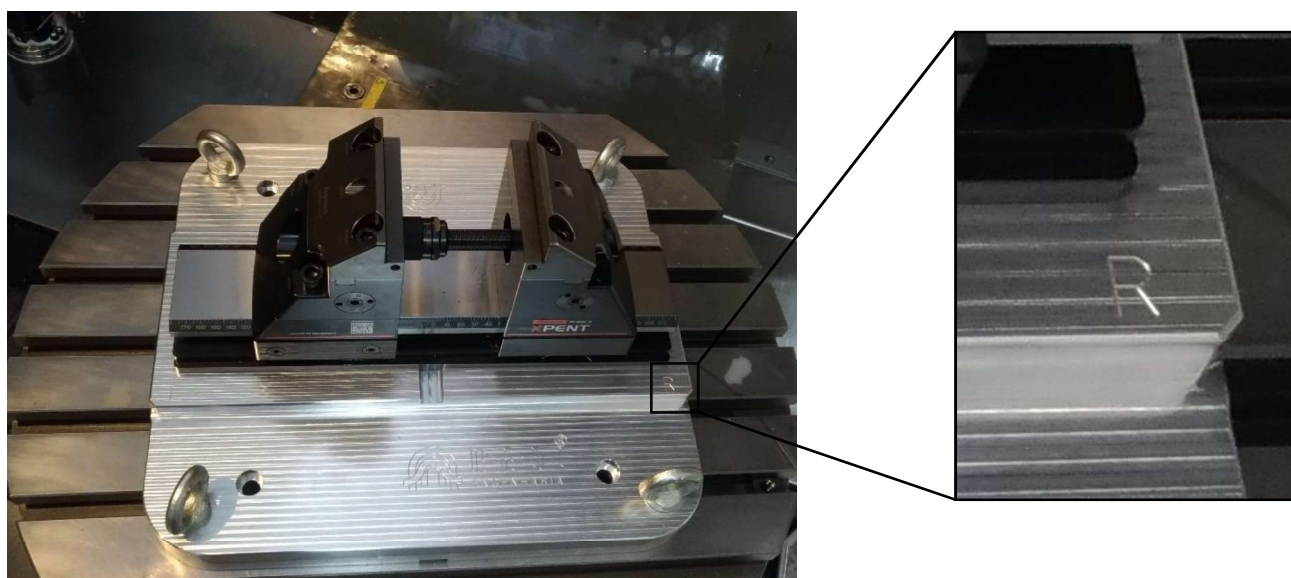


Figura 3.61 - Pormenor da identificação da posição da Base.

Para fixar a base à mesa de trabalho foram utilizados 4 parafusos M12 x 50 com as porcas T para encaixar na mesa e assim fixar a base (Figura 3.62). Na Figura 3.63 é possível observar a face da base que fica em contacto com a mesa de trabalho do centro de maquinagem e a Figura 3.64 apresenta a ligação final Mesa de Trabalho / Base / Prensa.



Figura 3.62 - Parafusos M12 e Porcas T utilizadas.



Figura 3.63 - Versão final do fundo da Base.



Figura 3.64 - Aspecto final da parte superior da Base e aplicação.

4. INTERLIGAÇÃO DO *SOLID EDGE*[®] COM AS TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D

Como mencionado anteriormente, o *Solid Edge*[®] tem a capacidade de trabalhar com ficheiros provenientes de outros softwares de desenho 3D, possibilitando exportar ficheiros parcialmente configurados para a produção por adição (impressão 3D). Os componentes foram produzidos com recurso à tecnologia de Fabrico por filamento fundido (FFF) em que o material usado foi o filamento de PLA da marca *FlashForge*[®].

Após a conclusão da produção da Base, para evitar que se depositassem aparas durante a maquinagem de componentes nos furos têm com função aplicar os olhais de transporte, reparou-se que seria vantajoso colocar uma tampas nos furos com rosca M10.

Neste sentido, recorreu-se ao aplicativo *GrabCAD*, tendo sido importado para o *Solid Edge*[®] um parafuso M10 de cabeça cilíndrica tipo Umbrako, representado na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Conjunto de parafusos de cabeça cilíndrica tipo Umbrako disponíveis na aplicação *GrabCAD*.

De modo a explorar a interligação do *Solid Edge*[®] com as tecnologias de impressão 3D, para além do fabrico do parafuso M10, foram também desenhados provetes para serem produzidos através do método descrito anteriormente (Figura 4.2). A produção destes provetes tem como objetivo explorar, de forma superficial, a possibilidade de produzir componentes com a introdução de reforços externos, durante o fabrico com uma impressora 3D. A comparação das propriedades mecânicas obtidas nos provetes produzidos com e sem reforço foram determinadas por intermédio da realização de ensaios de tração.



Figura 4.2 - Geometria do Provete produzido por impressão 3D.

4.1. Modelação dos componentes a produzir por impressão 3D

O ficheiro respeitante ao parafuso M10 importado para o *Solid Edge*® é aberto como peça isométrica (Figura 4.3).

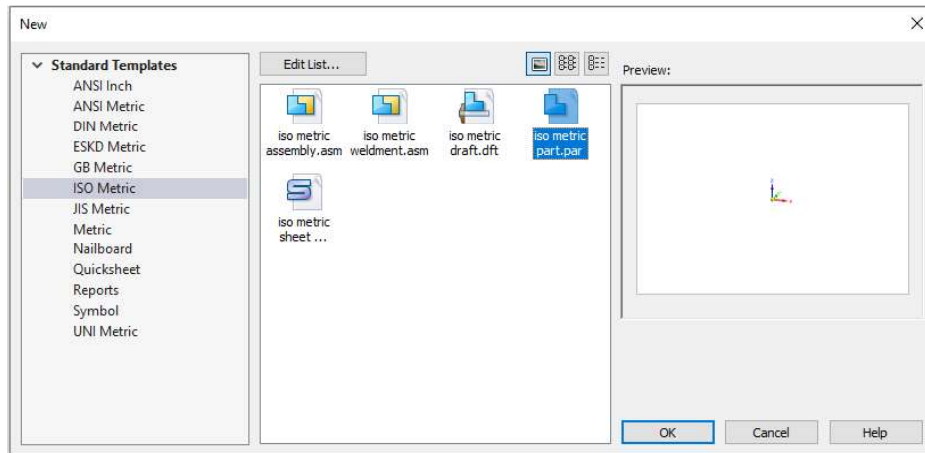


Figura 4.3 - Escolha do formato de trabalho com o ficheiro importado.

Após o ficheiro ser importado, pode ser editado como se fosse uma peça nativa, utilizando todas as ferramentas disponíveis para desenho, como representado na Figura 4.4. No desenvolvimento deste trabalho foram equacionadas diversas modificações no parafuso importado, conforme a Figura 4.5.

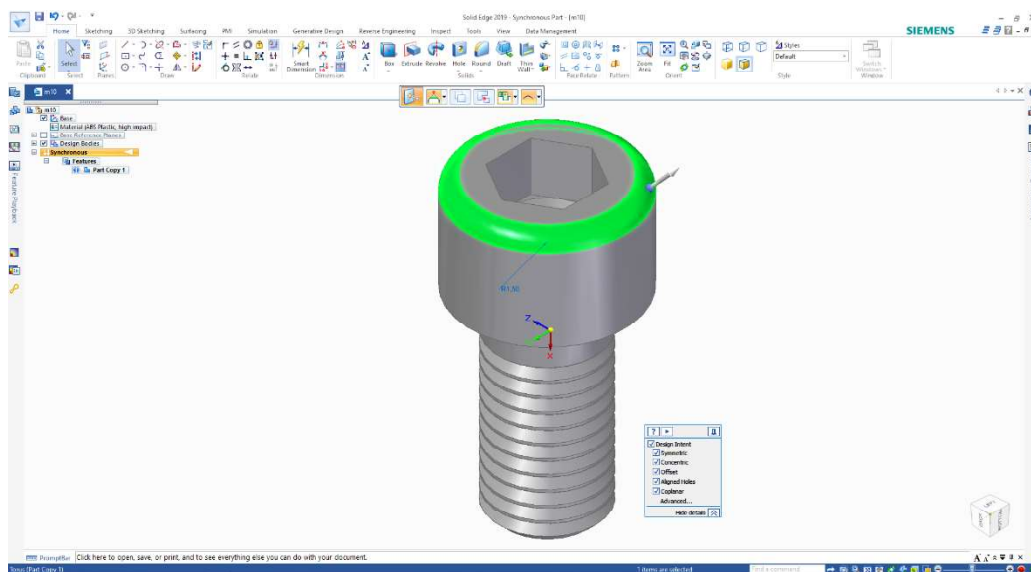


Figura 4.4 - Parafuso pronto para edição.

No final da alteração, após várias versões, algumas delas exemplificadas na Figura 4.5, optou-se pelo parafuso com geometria representada na Figura 4.6, o qual é um modelo mais compacto.

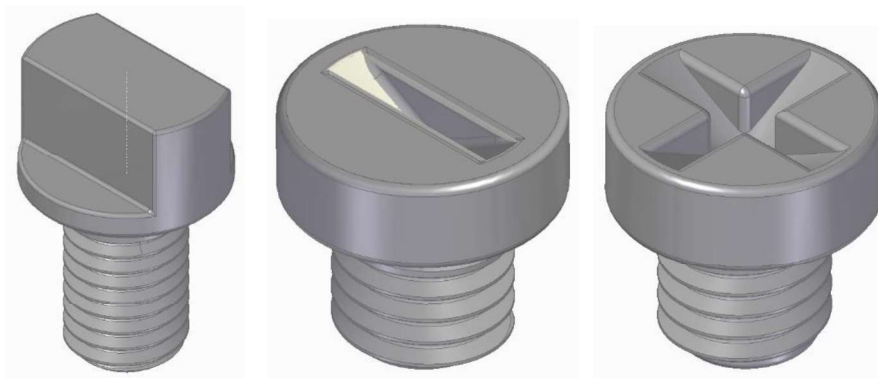


Figura 4.5 - Algumas das versões de tampas roscadas ponderadas.

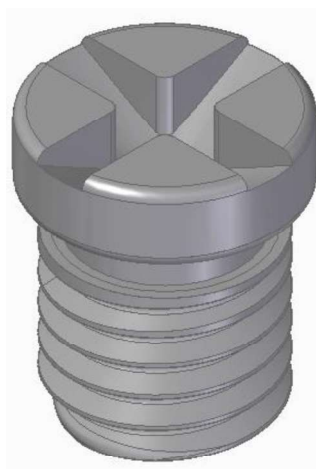


Figura 4.6 - Aspeto final da tampa roscada M10 a aplicar na base da prensa.

Chegado a este resultado validado, foi elaborado o desenho técnico, o qual encontra-se disponível no Anexo A 3. Posteriormente, a tampa foi gravada com a extensão STL (Figura 4.7), para depois ser lida pelo programa da impressora 3D.

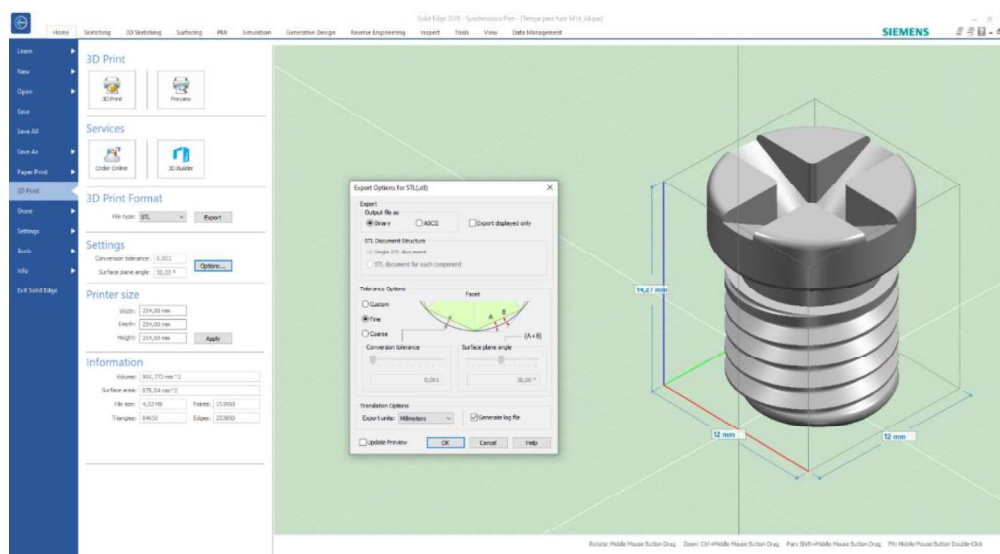


Figura 4.7 - Procedimento para criar ficheiro com extensão STL.

Relativamente ao provete para tração, a geometria do provete foi baseada na norma ASTM D638 – 10 (2010), mas com as dimensões adaptadas para o equipamento utilizado na produção por prototipagem rápida utilizado. As dimensões encontram-se representadas na Figura 4.8.

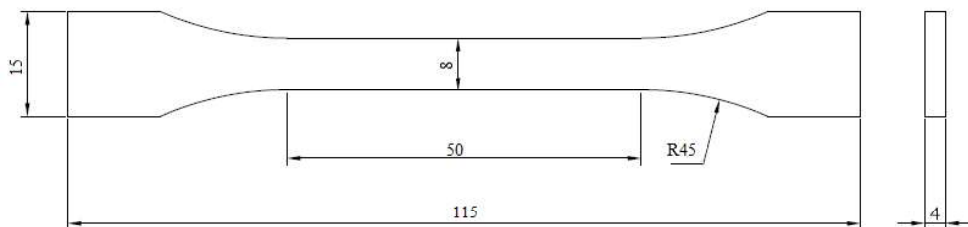
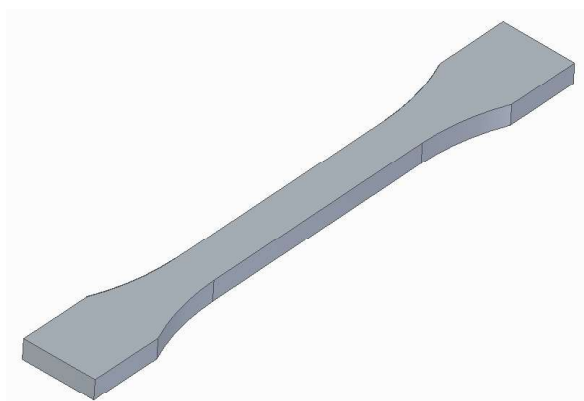
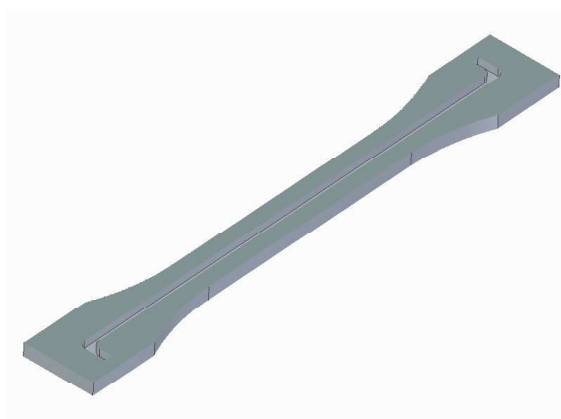


Figura 4.8 - Dimensões utilizadas no desenho do provete de tração.

Foi desenhado um provete normal com as dimensões referidas anteriormente, e um outro que possui uma caixa interior, que interrompendo o processo de deposição vai ser colocado um reforço, prosseguindo posteriormente a impressão 3D (Figura 4.9).



a)



b)

Figura 4.9 - a) Provete normal, b) Provete com caixa para inclusão do reforço.

O reforço utilizado foi um arame de aço de $\varnothing 1.6$ mm com 113 mm de comprimento, tendo o formato representado na Figura 4.10.



Figura 4.10 - Arame de reforço utilizado.

Da mesma forma como mencionado anteriormente para a tampa M10, a geometria do provete foi exportada em formato STL para depois ser lida pelo programa da impressora e ser imprimido.

Os desenhos técnicos dos provetes, estão disponíveis no Anexo A4.

4.2. Impressão dos Componentes

Para a impressão da Tampa Roscada M10 e dos Provetes, recorreu-se à utilização de uma impressora 3D, *FlashForge Guider II* (Figura 4.11) a qual é uma impressora 3D FFF (*Fused Filament Fabrication*) já de gama profissional, a qual contém uma plataforma aquecida, mantendo assim a temperatura constante da peça a ser imprimida. Desta forma é evitada a contração do material, caso este arrefecesse durante a impressão, podendo assim inviabilizar ou distorcer o resultado final.

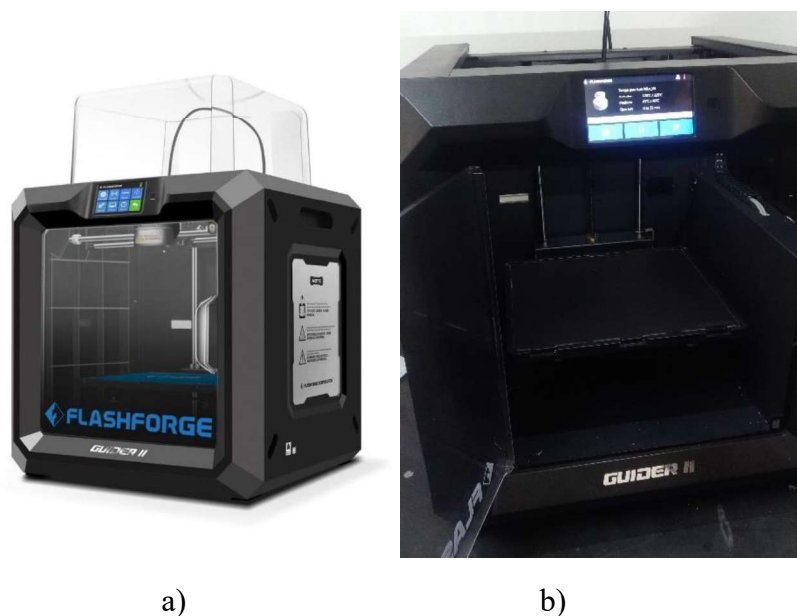


Figura 4.11 - a) Impressora 3D *FlashForge Guider II*, b) Mesa e área de impressão.

Foi utilizado para importar os ficheiros para a impressora com os parâmetros corretos o programa *FlashPrint* (Figura 4.12) da própria marca da impressora, a *FlashForge*®.

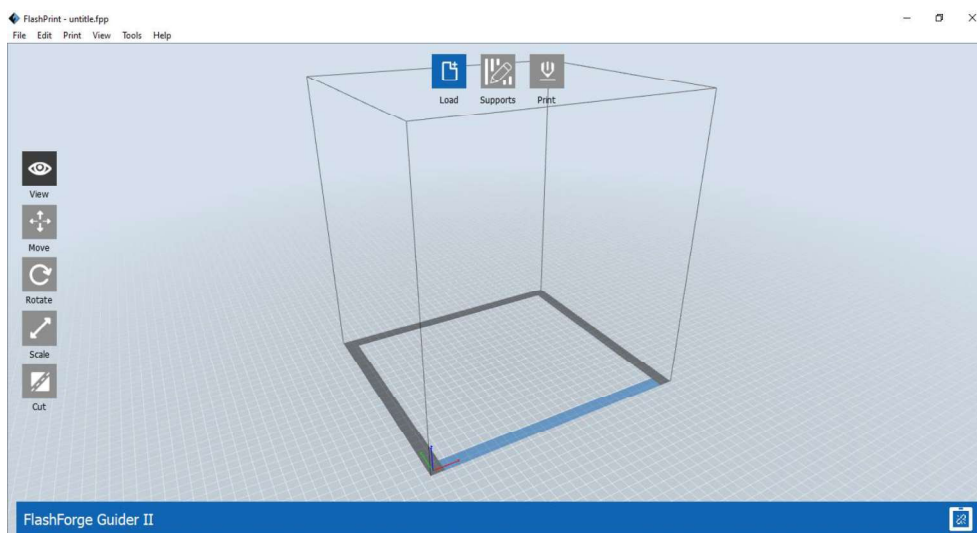


Figura 4.12 - Ambiente de trabalho do programa *FlashPrint*.

Foi importado o ficheiro da tampa para a área de trabalho, posicionou-se para impressão, selecionando os seguintes parâmetros:

- Qualidade de impressão alta;
- Enchimento interior com padrão triangular;
- Enchimento numa proporção de 50% do volume total.

Para garantir a impressão correta da geometria, foram colocados suportes, optando também pela utilização do “*Raft*”, que cria uma área de contacto maior com a mesa, para evitar que a peça se descole durante a impressão, visto que é uma peça pequena com pouca área de contacto, como representado na Figura 4.13.

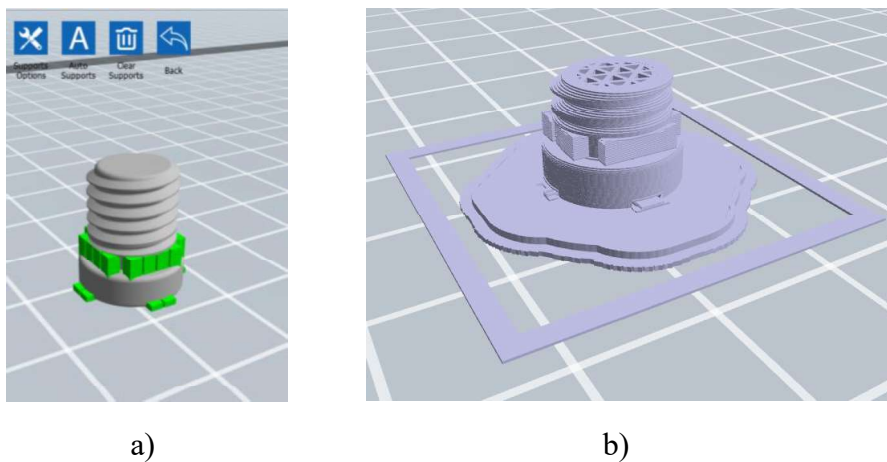


Figura 4.13 - a) Suportes para impressão, b) Padrão triangular de enchimento e o *Raft* utilizado.

O ficheiro com a extensão GX da tampa roscada M10 é exportado para o programa da impressora onde se pode visualizar a simulação de uma pré-impressão e analisar camada a camada todo o processo (Figura 4.14).

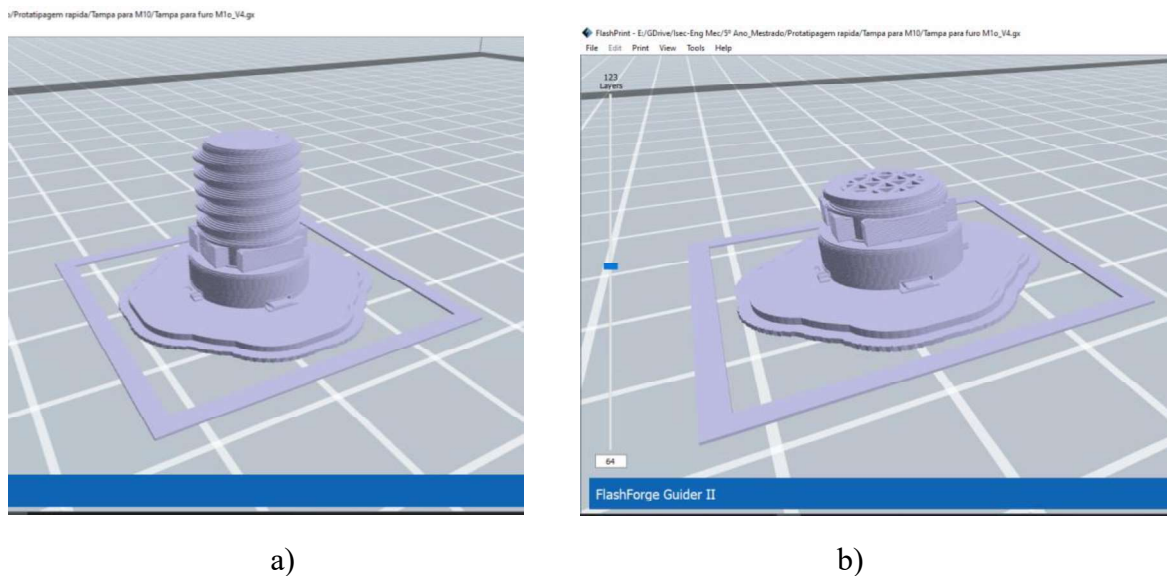


Figura 4.14 - a) Aspeto da simulação, b) Análise das várias camadas.

Após carregar o ficheiro relativo ao componente a produzir, é mostrada a informação no ecrã do tempo de impressão e as temperaturas a que estão a plataforma e a cabeça de extrusão, conforme representado na Figura 4.15.

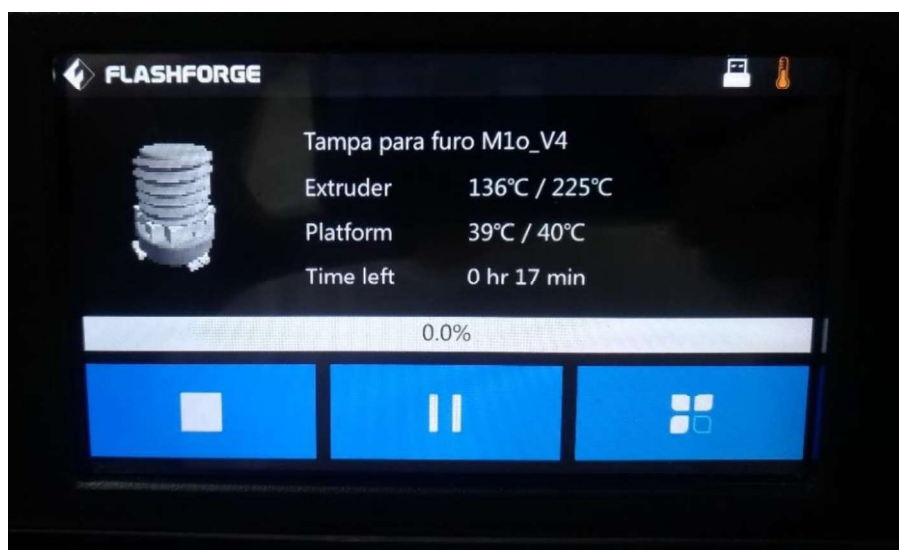


Figura 4.15 - Detalhes de impressão fornecidos pela impressora.

O primeiro passo na impressão passa por criar o *Raft* para dar mais estabilidade na impressão da peça, como podemos verificar na Figura 4.16, uma área muito superior à dimensão do parafuso que foi imprimida na base.

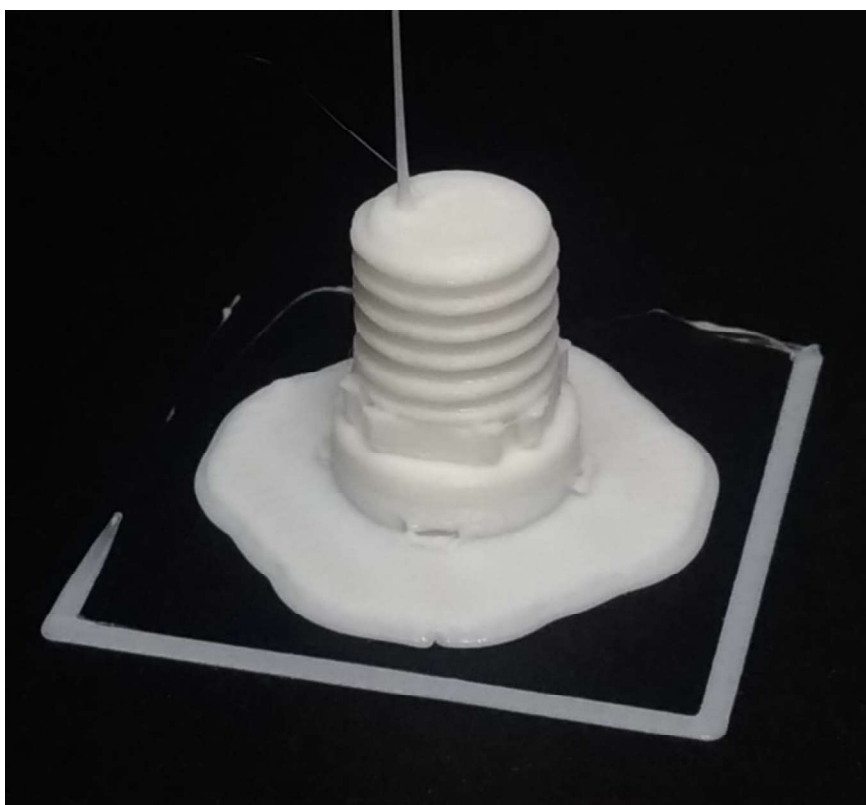


Figura 4.16 - Impressão finalizada da Tampa M10.

Após a impressão estar concluída, foi removido o *Raft* e os suportes obtendo-se a peça que está representada na Figura 4.17.

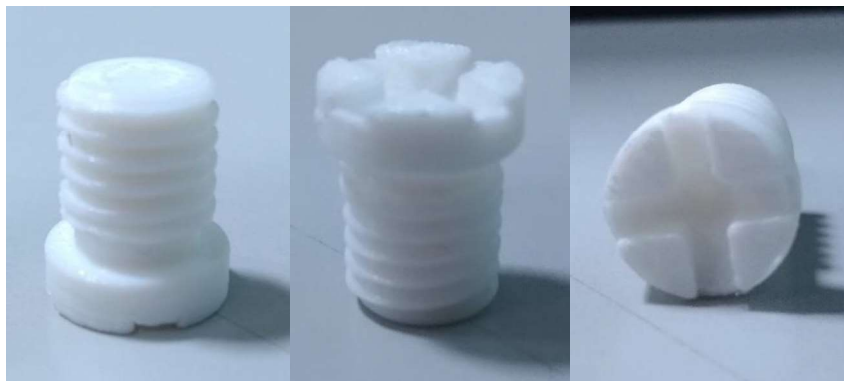


Figura 4.17 - Resultado final da Tampa Roscada M10.

Após algumas impressões de teste, nas quais se verificou que a rosca necessitava de alguma folga adicional pois a rosca da tampa rosçada estava muito justa, sendo difícil de a aparafusar, procedeu-se ao ajuste dimensional da impressão da peça, compensando em -0.30 mm no ajuste externo (Figura 4.18). Assim foi possível imprimir uma rosca que permite ser aplicada com facilidade.

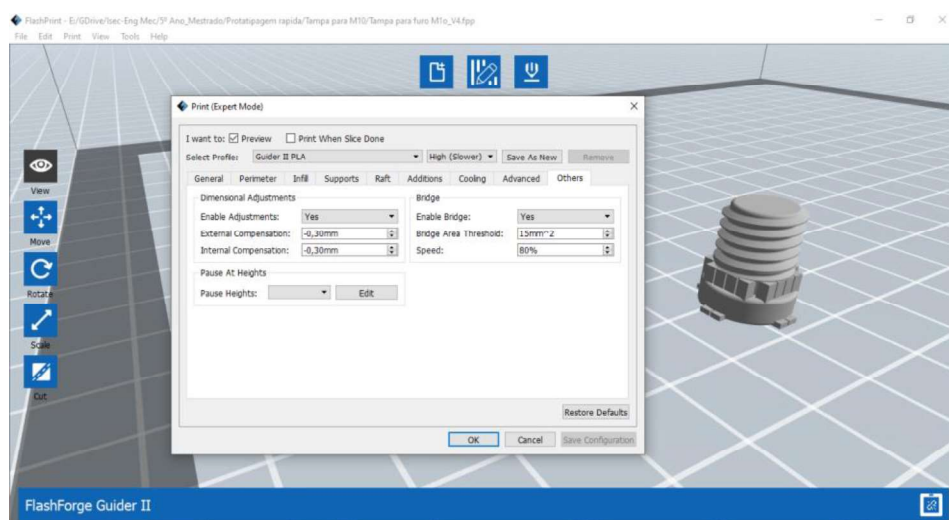
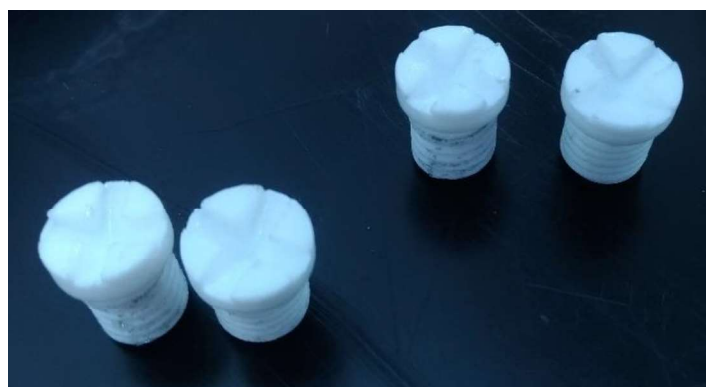


Figura 4.18 - Ajuste dimensional de impressão efetuado.

Num passo final foi realizado o teste na Base para se verificar se o ajuste de parâmetros estava correto, (Figura 4.19), reimprimiu-se as restantes Tampas Roscadas M10.



a)



b)

Figura 4.19 - a) Teste da Tampa Roscada M10, b) 4 Tampas Roscadas M10 que vão ser utilizadas na Base.

O topo da Tampa Roscada M10 foi projetado e desenhado de modo a ser compacto e possibilitar a montagem/desmontagem de forma simples, como representado na Figura 4.20.



Figura 4.20 - Exemplo de aplicação da tampa roscada.

Procedeu-se à montagem das tampas na Base, obtendo-se assim o resultado final da aplicação, como representado na Figura 4.21.



Figura 4.21 - Aplicação final das Tampas Roscadas M10.

No que diz respeito ao fabrico dos provetes, procedeu-se de forma semelhante, colocando na posição correta para imprimir o provete (Figura 4.22).

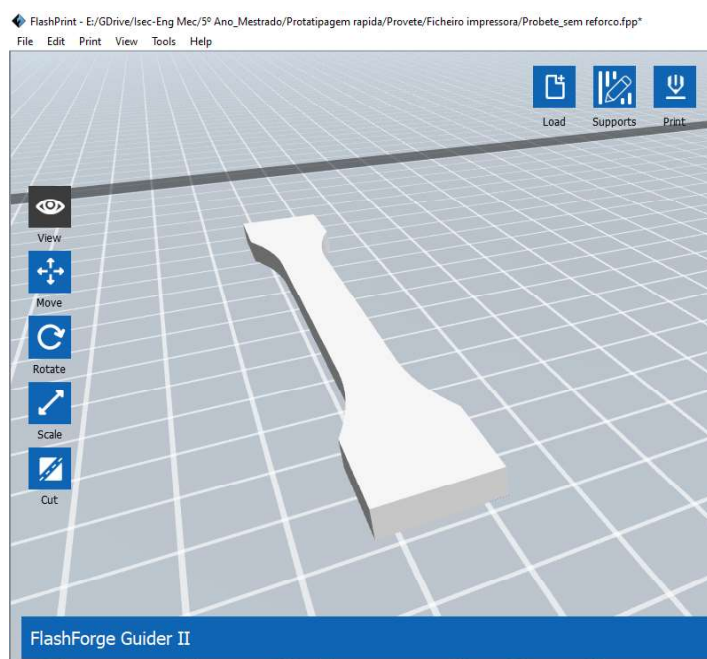
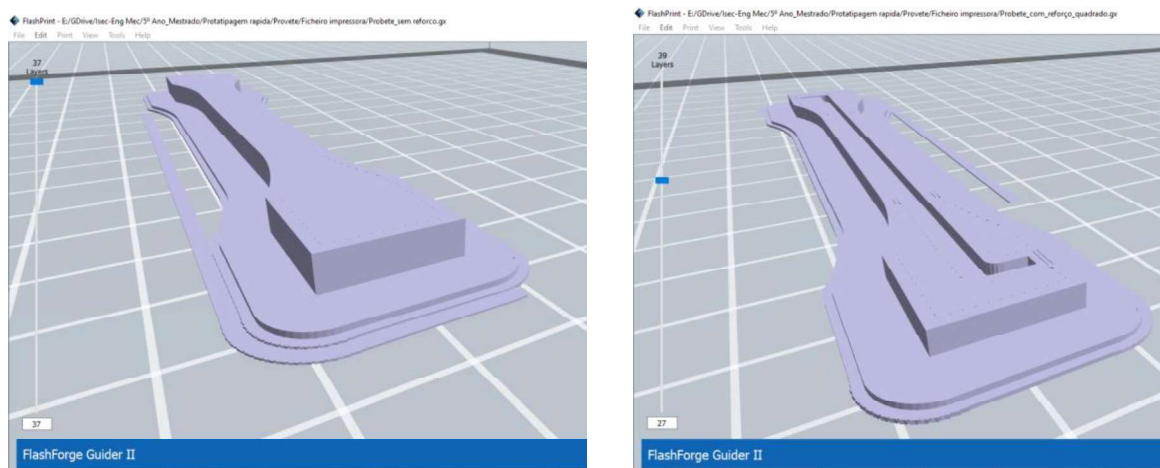


Figura 4.22 - Provette para impressão.

Uma vez que o provete tem como objetivo a realização de ensaios de tração, foi utilizado um padrão de enchimento em linha com uma densidade de enchimento de 100% e com o padrão de enchimento em linha, com inclinação de 45° face ao eixo horizontal, de modo a que o interior do provete fosse completamente preenchido. Nesta impressão não foi necessário a utilização de suportes, pois a peça não necessita.

Recorreu-se também neste componente à utilização do *Raft* para criar uma maior área de contacto e evitar que a peça se descole da área de impressão (Figura 4.23).



a)

b)

Figura 4.23 - a) Provete sem reforço, b) Provete para aplicação de reforço.

Na Figura 4.24 é possível observar um estágio da produção do provete, onde é também visível a função do *Raft* em reforçar a adesão do provete à mesa de impressão.



Figura 4.24 - Processo de impressão do provete.

O processo de impressão dos dois provetes é semelhante, com a exceção de que no provete com reforço realiza-se uma pausa na impressão quando faltam 2.8 mm de altura para o fim da

impressão (Figura 4.25), tendo como objetivo colocar o reforço (Figura 4.26), e de seguida retoma-se a impressão.

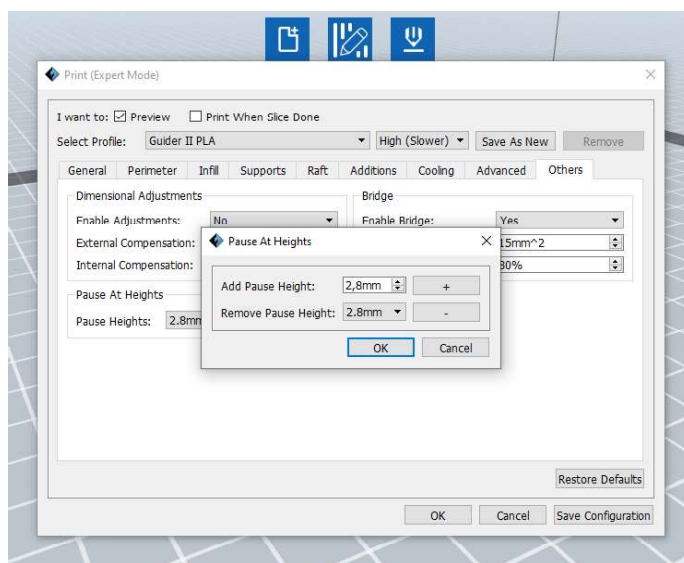


Figura 4.25 - Configuração da pausa para colocar o reforço.



a)



b)



c)

Figura 4.26 - a) Pausa para colocar reforço, b) reforço, c) Reforço colocado.

Para retomar a impressão do provete, basta carregar na opção para resumir a impressão que aparece no ecrã da impressora, prosseguindo normalmente o processo (Figura 4.27).

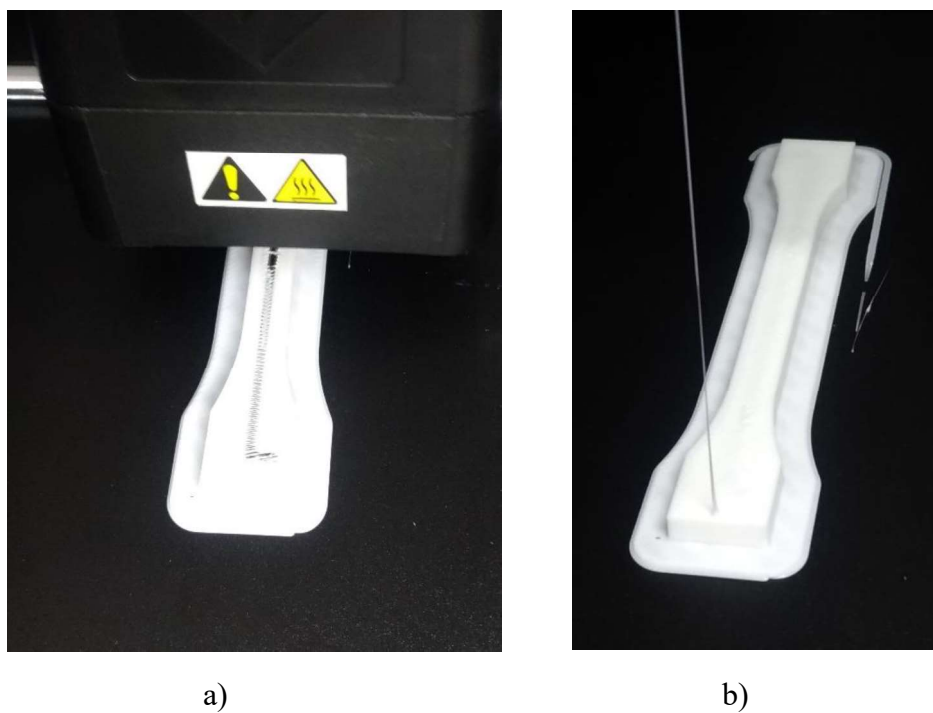


Figura 4.27 - a) Retoma da impressão após colocação do reforço, b) Impressão concluída.

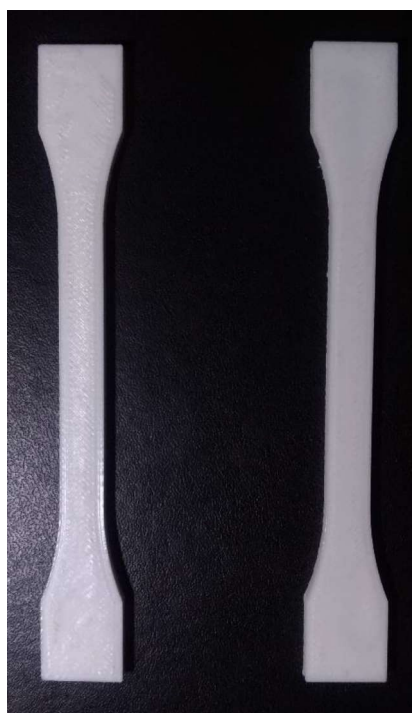


Figura 4.28 - Aspeto final dos provetes com e sem reforço.

5. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PROVETES PRODUZIDOS POR IMPRESSÃO 3D

Os provetes produzidos através do processo de produção por adição de material, descrito no capítulo 4, teve como objetivo de realizar ensaios de tração para determinar as propriedades mecânicas dos provetes produzidos. Num estudo com algumas semelhanças realizado por E. Ebel e T. Sinnemann (Ebel & Sinnemann, 2014), produziram provetes em ABS e PLA com os métodos de deposição “line Pattern” e “Honeycomb Pattern”, sendo posteriormente avaliadas as propriedades mecânicas determinadas por intermédio do ensaio de tração.

No caso de presente trabalho, foi utilizado na deposição o material PLA com um padrão de enchimento em linha com uma densidade de enchimento de 100%, com inclinação de 45° face ao eixo horizontal, introduzindo no interior um elemento de reforço, tendo em vista avaliar o potencial deste método para melhorar a resistência mecânica dos materiais poliméricos, elevando o patamar de utilização de produtos produzidos por impressão 3D.

Os testes para determinar as propriedades mecânicas dos provetes com e sem reforço, foram realizados numa máquina universal de ensaios *INSTRON 5584* (Figura 5.1) a qual possui uma célula de carga e um extensómetro que permitem medir a carga e o alongamento e assim determinar as correspondentes tensões e deformações impostas.



Figura 5.1 - Máquina *INSTRON 5584* utilizada nos ensaios.

Na Tabela 5.1 encontram-se as propriedades do PLA utilizado no trabalho e disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 5.1 - Propriedades do PLA utilizado na impressão dos provetes para o ensaio de tração. (FlashForge, 2020)

Parameter Texture	Printing Temp.	Printing Speed	Suggested Printing Layer Resolution	Specification	Tensile Strength	Flexural Strength	Flexural Modulus	Impact Strength (IZOD, 23°C)	Elongation at Break	Distortion Temp.
PLA	190 ~ 220°C	60 ~ 90 mm/s	0,1 ~ 0,2 mm	0,5kg/1,0kg	≥ 60 MPa	≥ 60 Mpa	≥ 2500 Mpa	≥ 16 J/m (ASTM D256)	≥ 3%	≥ 55°C

O reforço utilizado consistiu num fio de arame de aço de Ø 1.7 mm e comprimento de 110 mm do qual não eram conhecidas as propriedades, tendo por isso sido realizados ensaios de tração para determinar as principais propriedades mecânicas do fio de aço (Figura 5.2).

Após se preparar o equipamento, foram realizados 2 testes distintos ao fio de arame que vai servir de reforço.

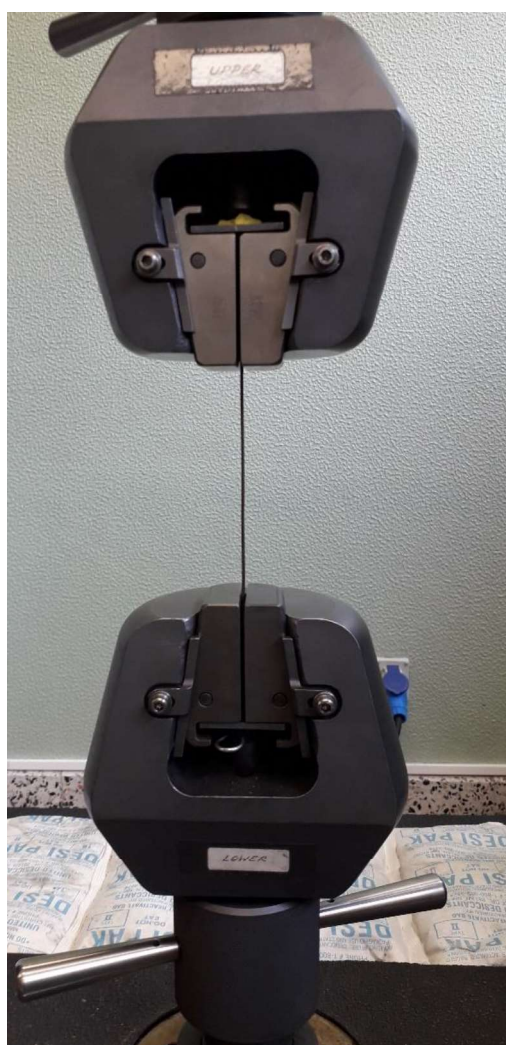


Figura 5.2 - Ensaio de tração no fio de arame.

Os valores resultantes dos ensaios foram exportados para um ficheiro Excel por forma a serem tratados e representados em forma de gráficos. Os ensaios foram realizados impondo uma velocidade constante de deslocação do travessão de 3 mm/min, até ocorrer a rotura nos provetes.

A tensão de tração convencional é calculada pela seguinte equação (Equação 1)

$$\sigma_{conv} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

F – Força (N)

A_0 – Área transversal do provete (m^2)

σ_{conv} – Tensão Convencional (Pa)

Esta equação define que a resistência mecânica é o resultado da razão entre a Força (F) aplicada ao arame e a área resistente (A_0) do arame.

A área do fio de arame é calculada pela seguinte equação (Equação 2).

$$A_0 = \pi \times r^2 \quad (2)$$

r – Raio da seção circular (m^2)

Para os provetes, a área é calculada pela seguinte equação (Equação 3).

$$A_0 = L \times E \quad (3)$$

L – Largura do provete (m)

E – Espessura do provete (m)

A deformação convencional (ε) é expressa pela Equação 4, com o resultado em percentagem (%) (Equação 5) quando multiplicada por 100.

$$\varepsilon_{conv} = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{conv} = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (5)$$

ΔL_0 – Variação de comprimento relativo ao comprimento inicial (mm)

L_0 – Comprimento inicial de referência do extensómetro (mm)

ε_{conv} – Deformação convencional (%)

As curvas força/alongamento do fio de arame encontram-se representadas no gráfico da figura seguinte (Figura 5.3) onde se pode ver que se obteve resultados semelhantes.

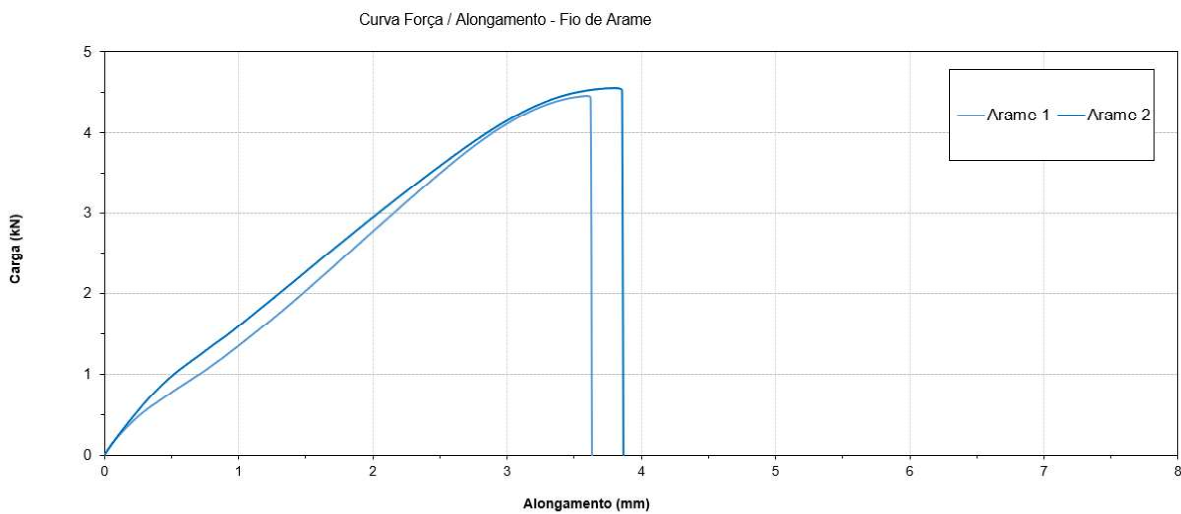


Figura 5.3 - Gráfico força/alongamento realizados no fio de arame.

Com base nos dados da curva força/alongamento e nas equações 1 e 5 foram calculados os valores da tensão e deformação convencional, cujas curvas se encontram representadas na Figura 5.4. Relativamente as curvas tensão/deformação real, estas foram determinadas com base nas equações 6 e 7, as quais se encontram igualmente representadas na Figura 5.4.

Com estes ensaios verificamos que com uma carga de 4.5 kN o fio de arame 1 apresenta um alongamento de 3.6 mm e o fio de arame 2 apresenta um alongamento de 3.9 mm. Ou seja, o fio de arame apresenta tensão de rotura de aproximadamente 2000 MPa, para a qual corresponde um alongamento à rotura de cerca de 3,5%.

A correção dos valores convencionais fica a dever-se a ser considerado no ensaio convencional que a seção inicial do provete bem como o comprimento inicial se mantêm constante durante todo o ensaio, o que na verdade não é exatamente assim, principalmente em materiais dúcteis como os materiais poliméricos e metálicos, sendo estas correções expressas nas curvas reais.

$$\sigma_{real} = \sigma_{conv} \times (1 + \varepsilon_{conv}) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{conv}) \quad (7)$$

ε_{real} – Deformação real (%)

σ_{conv} – Tensão real (Pa)

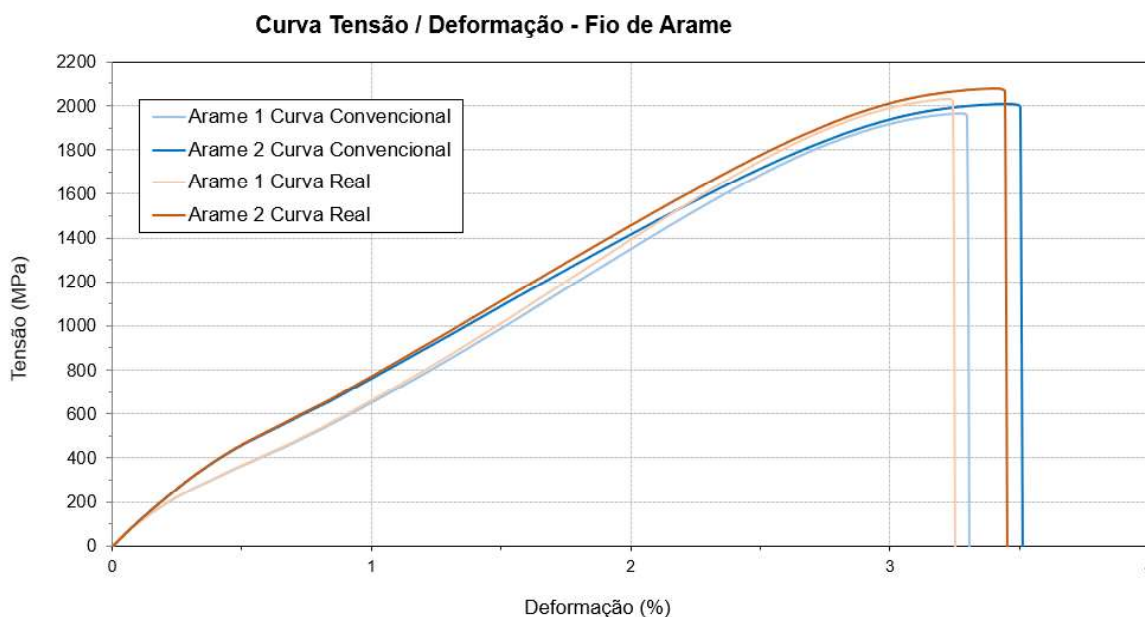


Figura 5.4 - Gráfico da Tensão/Deformação do fio de arame.

Podem assim comparar os valores convencionais e reais da deformação, em que para o Arame do ensaio 1 obteve-se deformação e tensão convencional de 3.3% e 1965 MPa, respetivamente, e com a aplicação das fórmulas a deformação e tensão real de 3.25% e 2029 MPa, respetivamente. Para o Arame do ensaio 2 obteve-se deformação e tensão convencional de 3.5% e 2007 MPa, respetivamente, e com a aplicação das fórmulas a deformação e tensão real de 3.45% e 2076 MPa, respetivamente.

No que diz respeito aos provetes em PLA, estes foram fixos em mordentes de geometria plana e acoplado um extensómetro, conforme representado na Figura 5.5.



Figura 5.5 - Fixação dos provetes em PLA.

Em primeiro lugar foi realizado o ensaio até à rutura do provete sem reforço, sendo apresentado na Figura 5.6 a fratura após o ensaio.

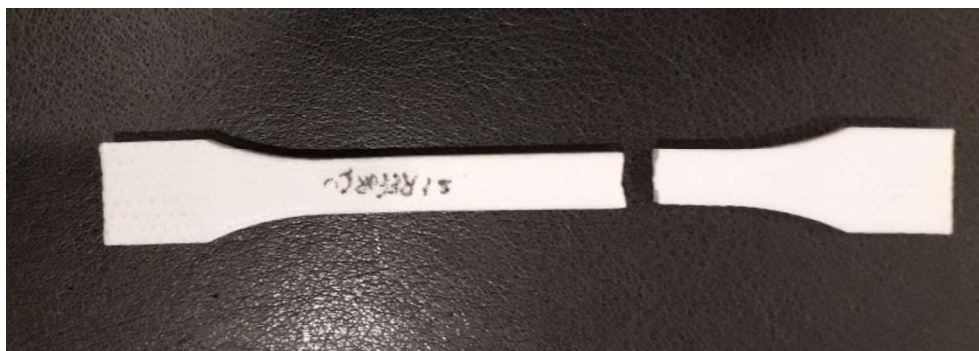


Figura 5.6 - Provette sem reforço após ensaio.

Do mesmo modo, foi realizado o ensaio ao provete com reforço, tendo sido verificado que a rotura apenas ocorreu no material polimérico e não no reforço, como se observa na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Resultado visual do ensaio do provete com reforço

Para se perceber melhor qual o efeito do reforço no provete, foi removido o material polimérico de uma das faces até chegar ao reforço de arame, como representado na Figura 5.8.



a)



b)

Figura 5.8 - a) Formato do reforço antes do ensaio; b) Visualização do reforço após o ensaio.

Foi possível verificar que durante o ensaio existiu uma deformação do reforço e também um escorregamento, como representado nas imagens anteriores (Figura 5.8 a) e b)).

A Figura 5.9 apresenta os gráficos de tensão/deformação convencional e real para os provetes com e sem reforço.

Observa-se que com a adição de reforço foi obtida uma maior resistência mecânica no provete, mas bastante inferior à resistência mecânica do fio de arame. Desta análise é possível concluir que o fio de arame contribui para aumentar resistência mecânica do conjunto, contribuindo também para uma ligeira maior ductilidade.

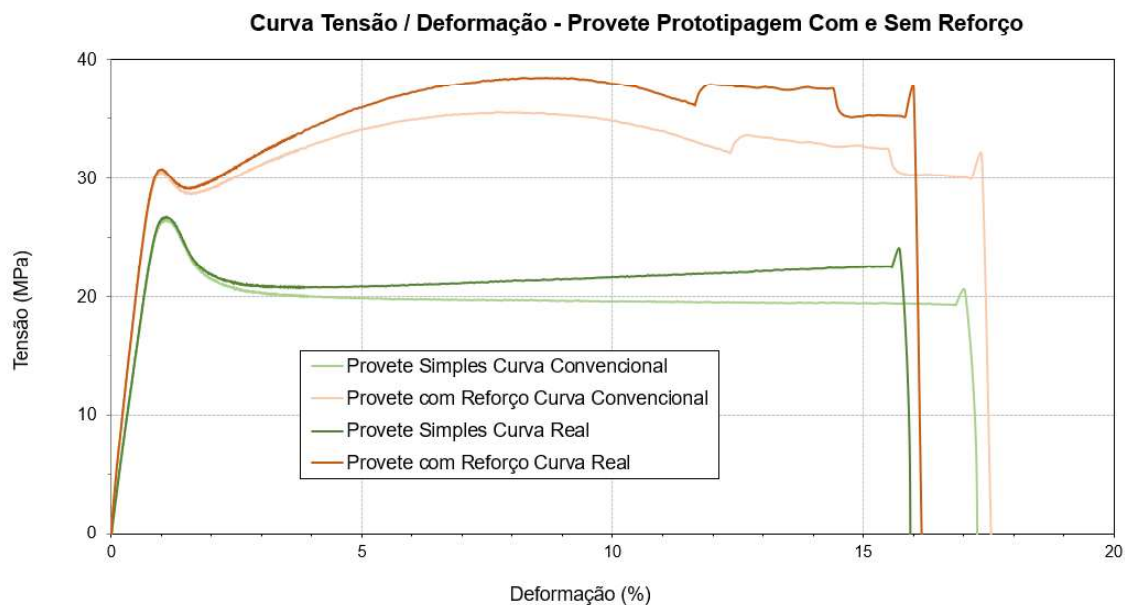


Figura 5.9- Gráfico da Tensão/Deformação dos provetes

No ensaio do provete reforçado, ocorreu durante o ensaio uma alteração temporária e involuntária na velocidade definida para deslocação do travessão que impõe a deformação no provete. Esse efeito é observado nas curvas convencional e real do provete reforçado, sendo caracterizado por uma alteração na evolução da resistência mecânica, aproximadamente entre 12 e 14% de deformação. Passado este período, a curva tensão/deformação retomou a evolução normal.

Para o provete sem reforço, na curva convencional, foi obtida uma tensão máxima e deformação na rotura de 26.41 MPa e 17.25% respetivamente. Os valores respetivos da tensão máxima e deformação na rotura reais foram de 26.71 MPa e 15.9%, respetivamente.

Para o provete com reforço, na curva convencional, foi obtida uma tensão máxima e deformação na rotura de 35.50 MPa e 17.5% respetivamente. Os valores da tensão e deformação reais foram de 38.45 MPa e 16%, respetivamente.

Observa-se que a diferença entre os valores convencionais e reais é mais acentuada nos provetes de PLA do que no ensaio do fio de arame, pois o material polimérico PLA sendo mais dúctil, torna mais visível a diminuição de seção durante o ensaio.

6. CONCLUSÃO

Com a realização deste projeto foi possível estudar algumas das ferramentas que o *Solid Edge*[®] disponibiliza de uma forma prática. Conclui-se assim que este é um software versátil, fácil de utilizar por ter uma interface gráfica simples e com um aspeto visual semelhante a outros softwares existentes no mercado, proporcionando assim uma fácil adaptação do utilizador. Fornece ainda um conjunto de ferramentas de aprendizagem bastante prático para iniciantes/amadores que queiram trabalhar com este software.

O *Solid Edge*[®] é uma ferramenta de trabalho bastante completa que permite elaborar um projeto desde a realização do esboço até ao produto final, com a capacidade de criar uma imagem realista do produto para ser apresentado ao cliente ou mesmo a apresentação de um modelo 3D com o recurso de uma aplicação para dispositivos móveis, permite realizar uma demonstração do produto final no local onde este vai ser implementado sem a necessidade de construir um protótipo. Têm a capacidade de trabalhar também com a componente elétrica, como a cabelagem, PCB e integrá-los na componente mecânica por forma a diminuir eventuais falhas, aumentando a comunicação entre os vários departamentos intervenientes no projeto.

Para a edição de componentes 3D ou 2D provenientes de outros softwares de desenho, o *Solid Edge*[®] demonstrou capacidade e facilidade de trabalho, muito fluido e simples de utilizar, essencialmente porque trata os componentes importados como peças nativas, tornando todo o processo muito mais simples e rápido, aumentando assim a produtividade. Da experiência adquirida pode-se afirmar que é viável trabalhar com ficheiros 2D que foram criados no *MasterCAM*[®], apesar de existir aqui alguma dificuldade inicial no *Solid Edge*[®] para reconhecer o desenho.

Para a produção da Base recorreu-se ao *MasterCAM*[®] uma vez que é um software já bastante estudado, com longa experiência de utilização no DEM/ISEC[®], verificando-se uma perfeita interligação com o *Solid Edge*[®], tendo sido utilizado esse conhecimento para produção da Base em CAD/CAM. Durante este processo foi possível explorar as técnicas de ajustamento, as quais foram utilizadas para maquinar as caixas das guias da Base, as quais requeriam um ajustamento H7/g6 para um movimento guiado com exatidão.

O *Solid Edge* possui funcionalidades relativas à impressão 3D do componente com uma opção que permite solicitar a impressão através de um serviço *Cloud-based 3D printing* em que disponibiliza uma cotação do valor de produção da peça em alguns materiais e os prazos e custos de transporte, sem se sair do *Solid Edge*[®], uma vez que este têm uma interligação com a 3YOURMIND.

No que diz respeito à utilização do *Solid Edge*[®] para posterior impressão 3D, o software demonstrou ser prático e rápido para a produção de tampas roscadas a serem utilizadas na Base. Foi ainda possível a impressão de provetes com inclusão de um material metálico de reforço no seu interior, com posterior caracterização das propriedades mecânicas dos materiais obtidos, demonstrando-se desta forma uma outra possível área de estudo e desenvolvimento. Depois de realizados os ensaios de tração dos provetes e analisados os dados obtidos, verificou-se uma melhoria nas propriedades do provete reforçado, apesar de ter sido observado que existiu escorregamento do reforço no interior do provete.

Como sugestão de futuros trabalhos poder-se-á explorar mais aprofundadamente as funcionalidades da componente de impressão 3D relacionadas com o *Solid Edge*® explorando a produção de outros componentes, bem como utilizar outro tipo de filamento de impressão.

Podem também ser realizados outros ensaios mais aprofundados ou mesmo diferentes ensaios como os ensaios de dureza, impacto, flexão, etc., de modo a perceber o comportamento deste material quando solicitado a esses esforços.

Explorar a capacidade de maquinagem de componentes produzidos através de impressão 3D (produção por adição de material) de modo a obter dimensões mais precisas e melhor qualidade superficial.

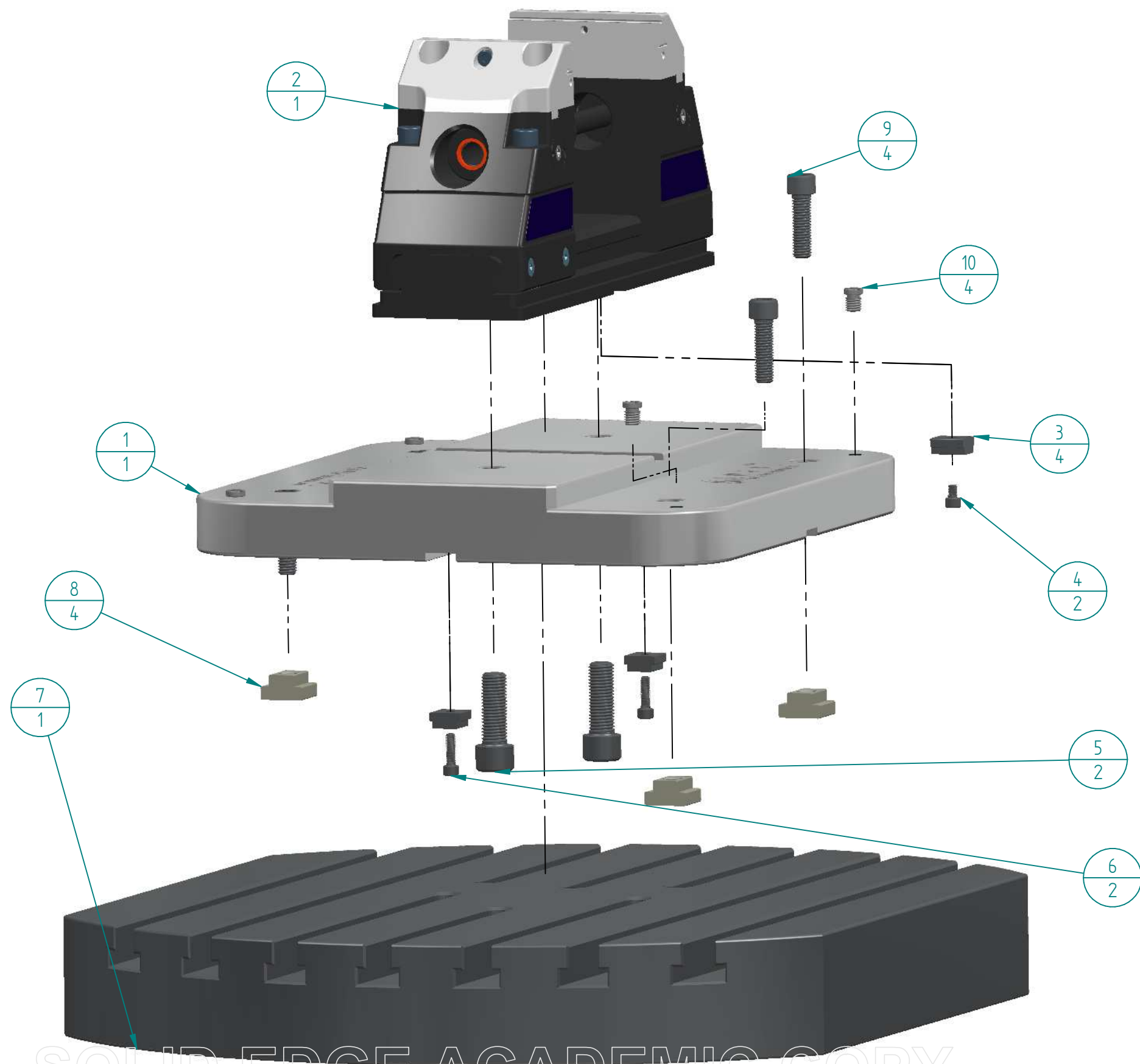
7. Referências Bibliográficas

- BIM A+ (2019). <https://bimaplus.org/news/the-very-beginning-of-the-digital-representation-ivan-sutherland-sketchpad/> (página internet oficial), Portugal.
- Cadenas PARTsolutions (2020). <https://partsolutions.com/60-years-of-cad-infographic-the-history-of-cad-since-1957/>. Cadenas PartSolutions 3D catalogs (página internet oficial), USA. Consultado Fevereiro 2019.
- Ebel, E. e Sinnemann, T. (2014). Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties. RTEjournal, Vol. 2014 ([urn:nbn:de:0009-2-38722](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0009-2-38722))
- FlashForge 3D Printer, (2020). <https://www.flashforge.com/>. Flashforge Corporation. (página internet oficial), China.
- GRABCAD Community (2019). <https://grabcad.com/library>. Página de comunidade de CAD. (página internet oficial), USA.
- My Brighton and Hove, (2017). <https://www.mybrightonandhove.org.uk/topics/technology/inventions/technology>. First European NC Machine Tool. (página internet oficial) Consultado em 2019
- Proconcept sistemas (2018). <https://www.proconcept.com.br/2018/07/18/a-historia-do-software-cad/>. Proconcept sistemas, empresa de sistemas na área de CAD, CAE e PLM (página internet oficial), Brasil.
- Rebelo, C. (2009). Apontamentos da Unidade Curricular de Fundamentos de Ciências dos Materiais. Coimbra: ISEC.
- Sandvik Coromant (2019). <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/tools.aspx> (página internet oficial).
- Solid Edge (2019). <https://solidedge.siemens.com/en/>. Siemens Digital Industries Software (página internet oficial), Global. Consultado em novembro de 2019.
- Solid Edge History, (2018). <https://blogs.sw.siemens.com/solidedge/solid-edge-history-v1-to-v5/>. Blog oficial da Siemens Digital Industries Software (página internet oficial), USA. Consultado em novembro de 2019
- Solid Edge History, (2018). <https://blogs.sw.siemens.com/solidedge/solid-edge-history-v6-to-v10/>. Blog oficial da Siemens Digital Industries Software (página internet oficial), USA. Consultado em novembro de 2019
- Solid Edge ST9 – Central de Documentos Siemens – Ingenuity for life, (2019). <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/support/docs.html>. Central de documentos da Siemens. (página internet oficial), Portugal.
- Tornincasa, S Di Monaco, F. (2010). *THE FUTURE AND THE EVOLUTION OF CAD*. 14th international Research/Expert Conference” Trends in the Development of Machinery and Associated Technology “TMT 2010, Mediterranean Cruise

8. Anexos

A1 – Desenho da vista explodida com legendas

Em virtude de o desenho ser de um formato diferente, este encontra-se na página seguinte.



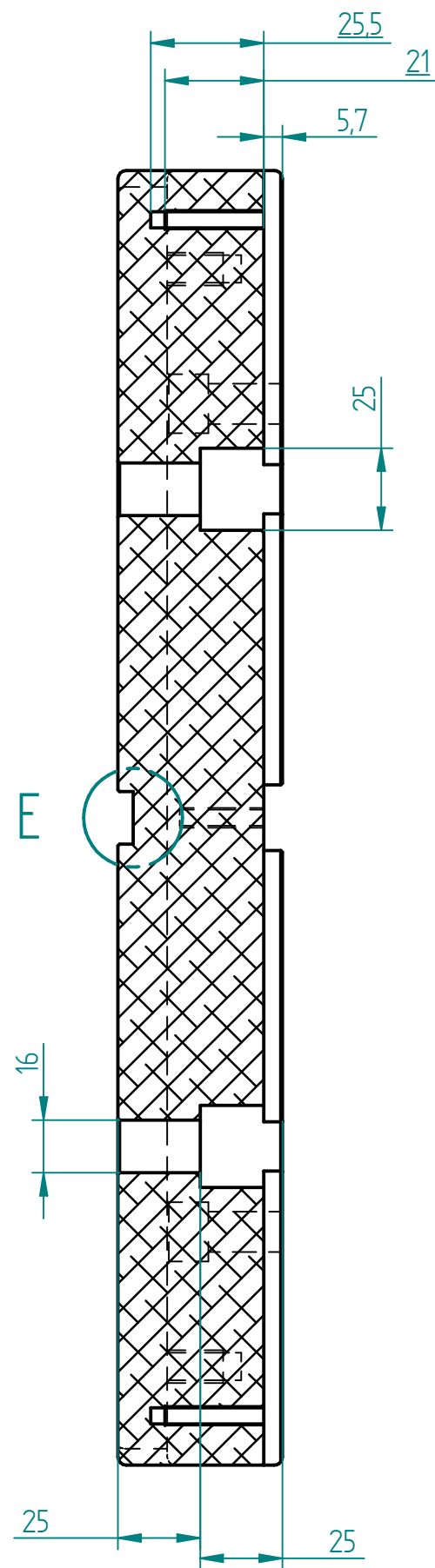
Item Number	File Name	Quantity
1	Base	1
2	Conjunto Prensa	1
3	Guia	4
4	Parafuso M6 x 10	2
5	Parafuso M16 x 45	2
6	Parafuso M6 x 20	2
7	Mesa CNC	1
8	Porca T	4
9	Parafuso M12 x 40	4
10	Tampa Roscada M10	4

	NAME	DATE	Solid Edge		
DRAWN	Flávio Ribeiro	30/12/2020	TITLE		
CHECKED			Vista explodia da montagem		
ENG APPR			SIZE A3		
MGR APPR			DWG NO 1		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±X.X°			REV 1		
			FILE NAME: Exploded view com lista.dft		
			SCALE: 1 : 3	SHEET 1 OF 1	

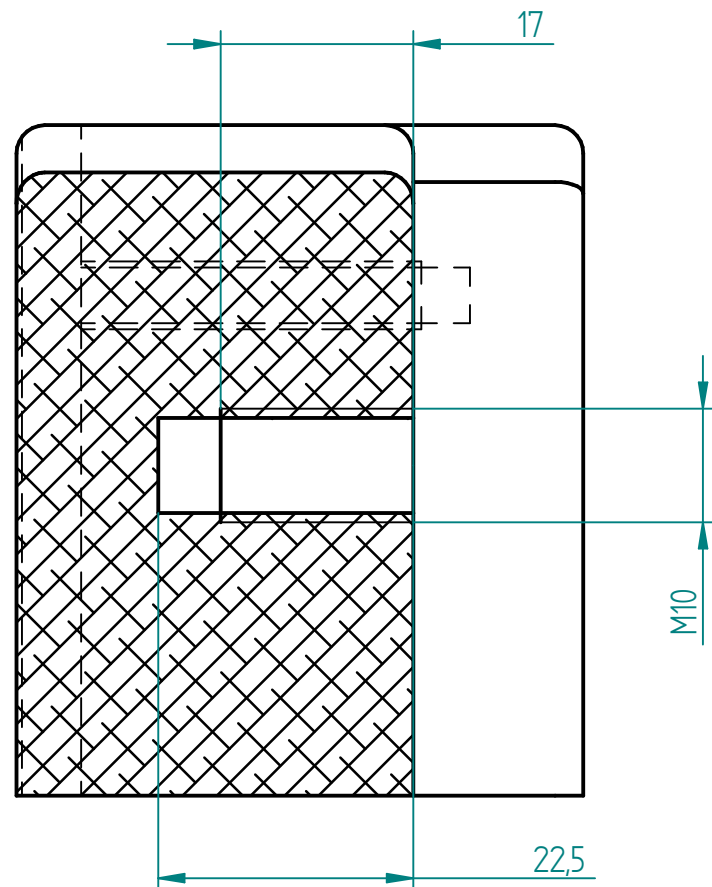
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

A2 – Desenhos técnicos da Base

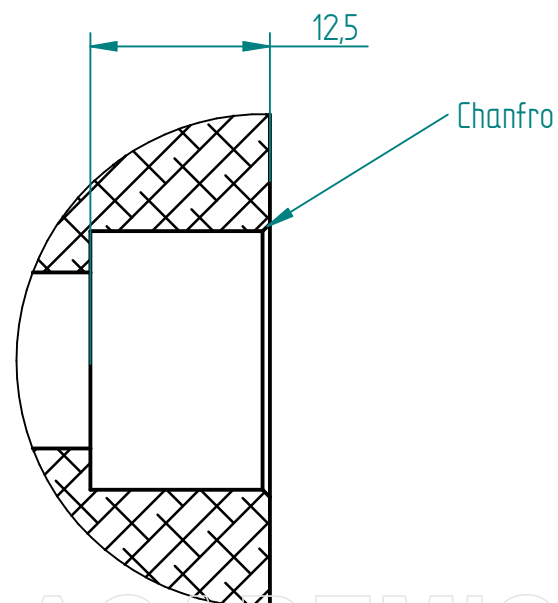
Em virtude de os desenhos serem de um formato diferente, estes encontram-se nas páginas seguintes.



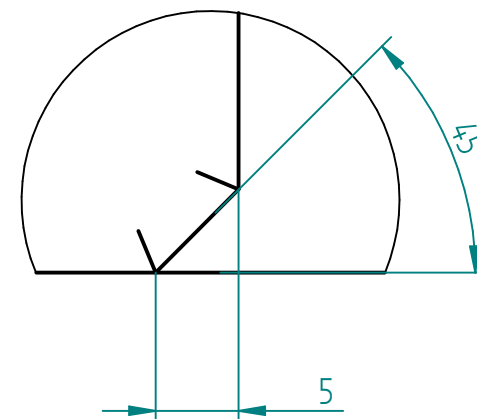
SECTION A-A
Scale: 1 : 2



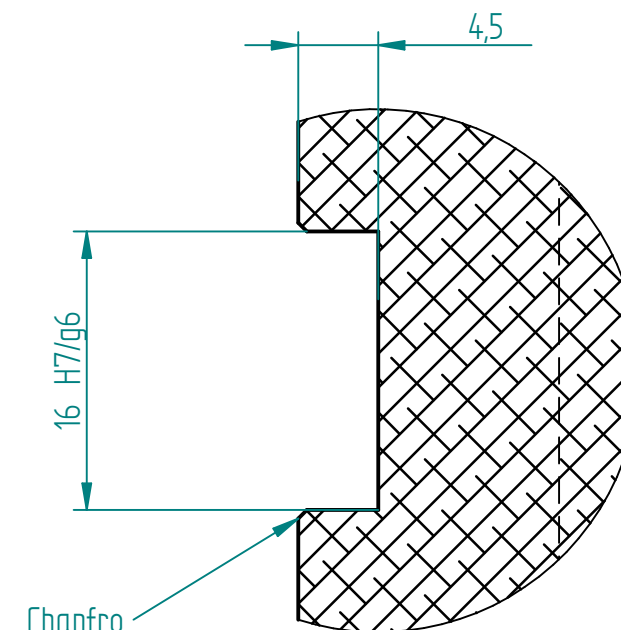
SECTION F-F



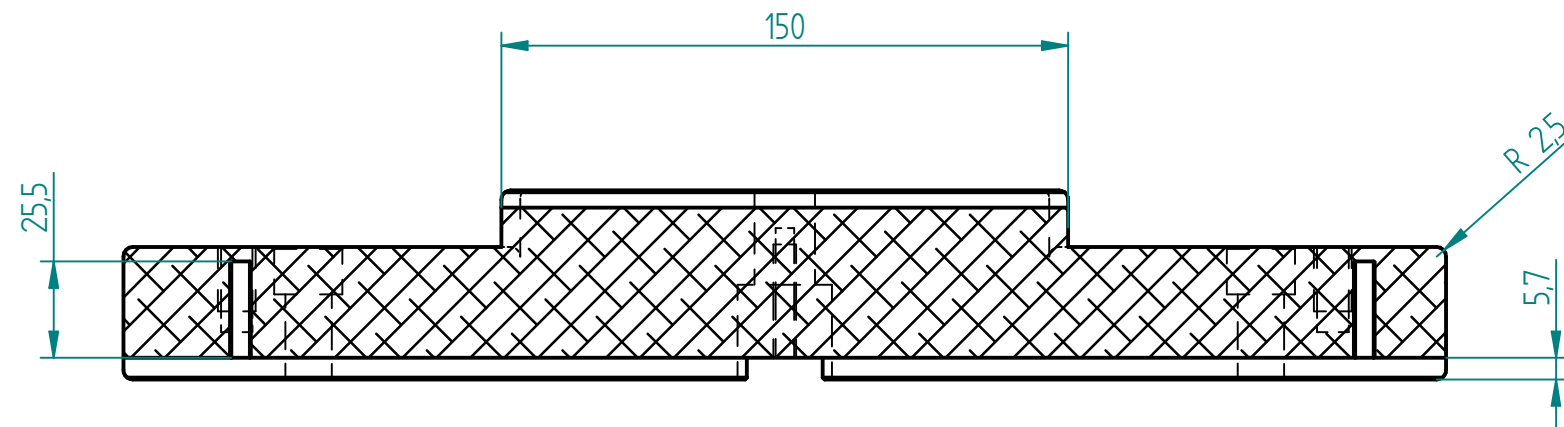
DETAIL C



DETAIL H



DETAIL E



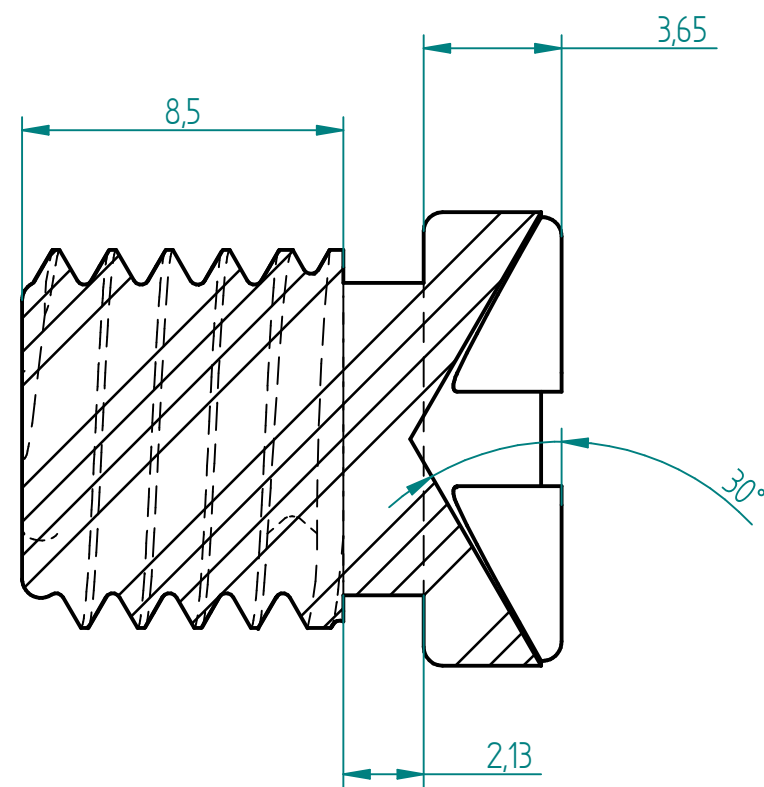
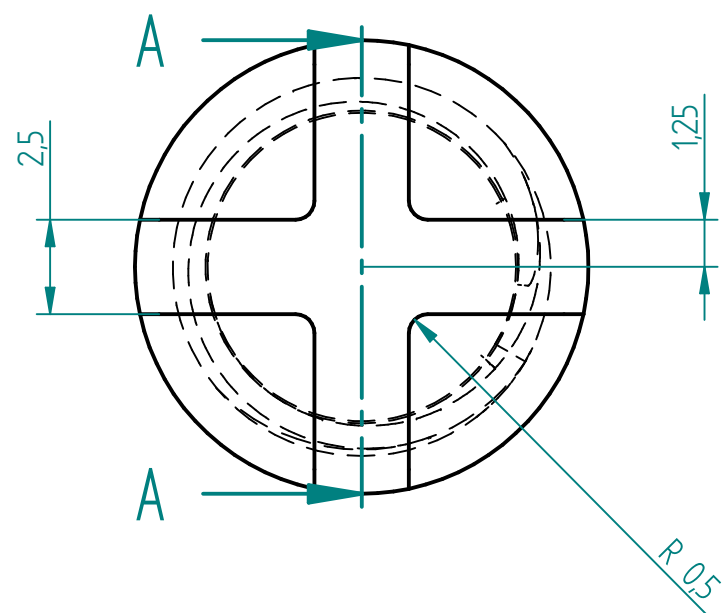
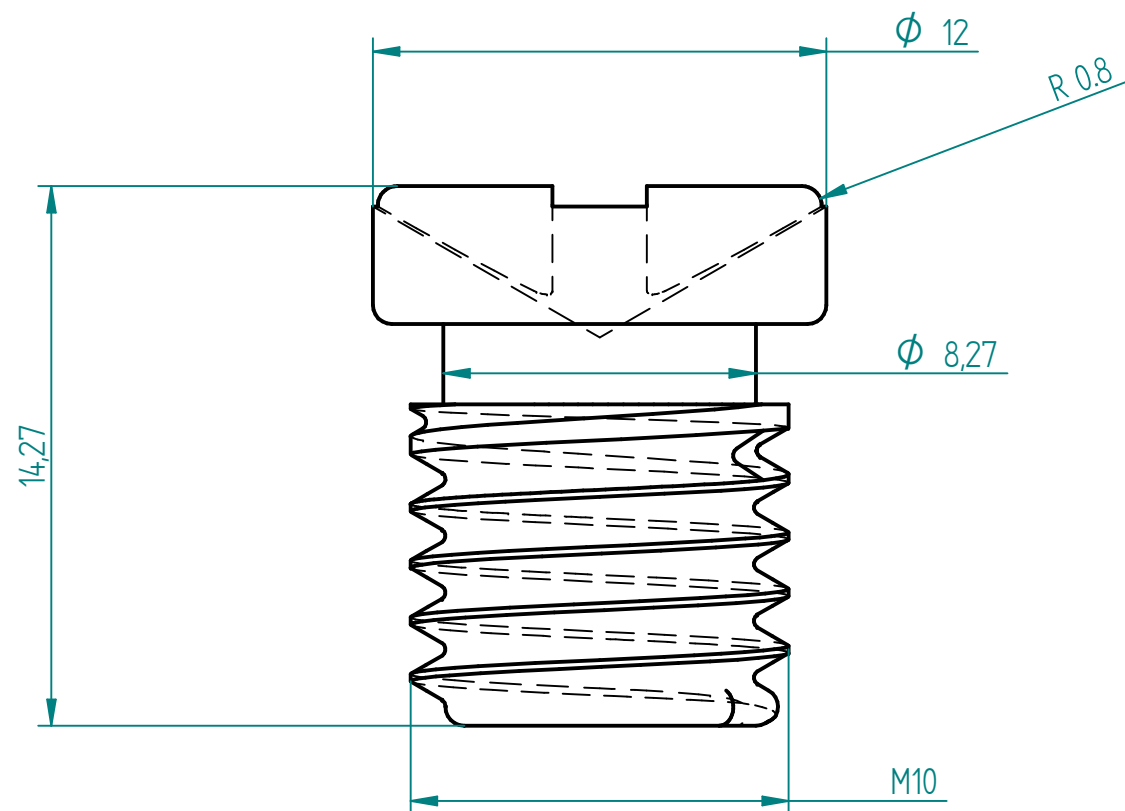
SECTION G-G
Scale: 1 : 2

Nota: Arestas assinaladas (1, 2, 3) com raio 2.5 mm.
Restantes arestas com chanfro 0.5 x 45°.

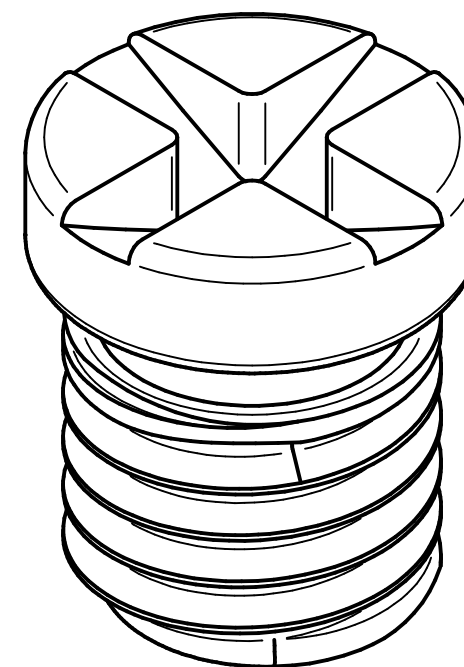
			Solid Edge		
DRAWN	NAME	DATE	TITLE		
CHECKED	Flávio Ribeiro	27/12/20			
ENG APPR					
MGR APPR					
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±X.X°			SIZE	DWG NO	REV
			A3	1	1
			FILE NAME: Base_V4_detailed_A3_v3_detalhes.dft		
			SCALE: 1 : 4		SHEET 2 OF 2

A3 –Desenho técnico da Tampa Roscada

Em virtude de o desenho ser de um formato diferente, este encontra-se na página seguinte



SECTION A-A

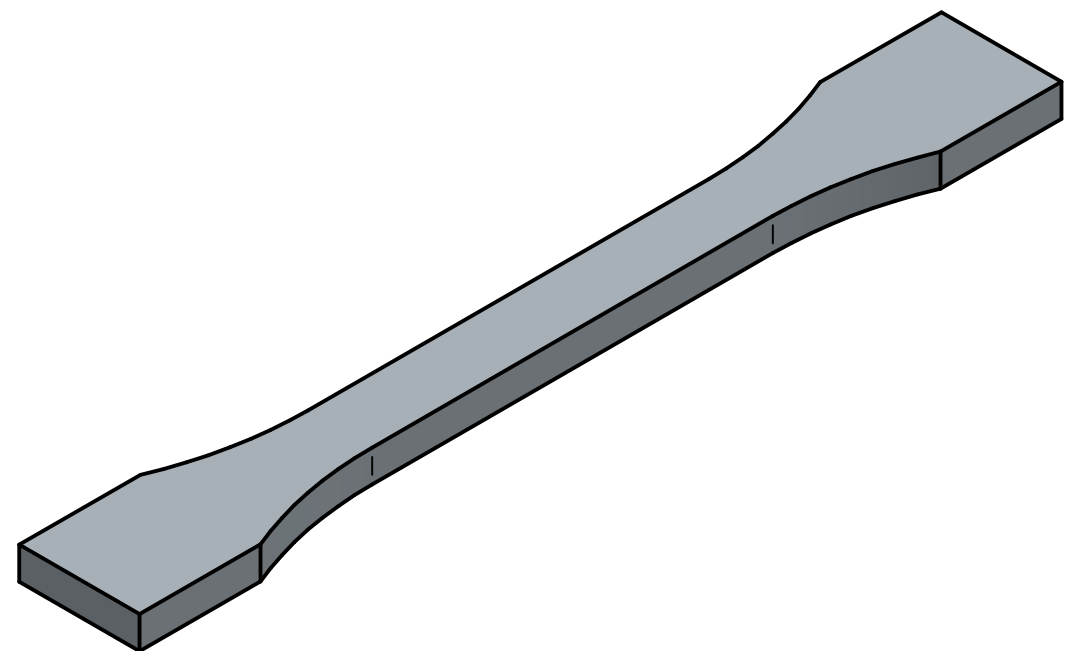
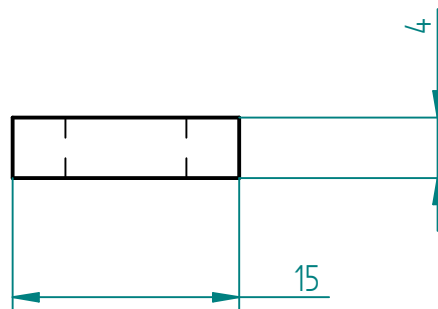
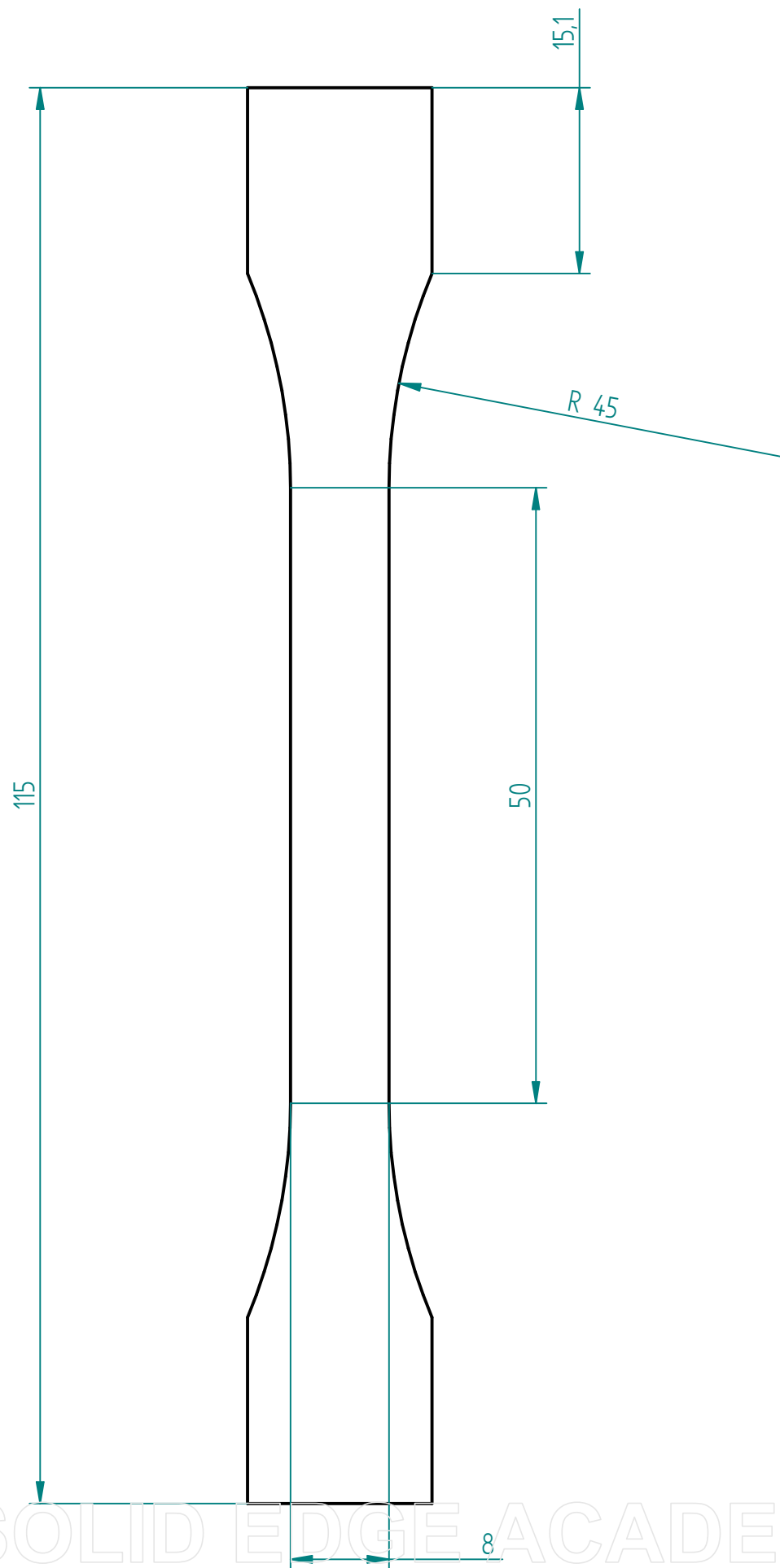


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

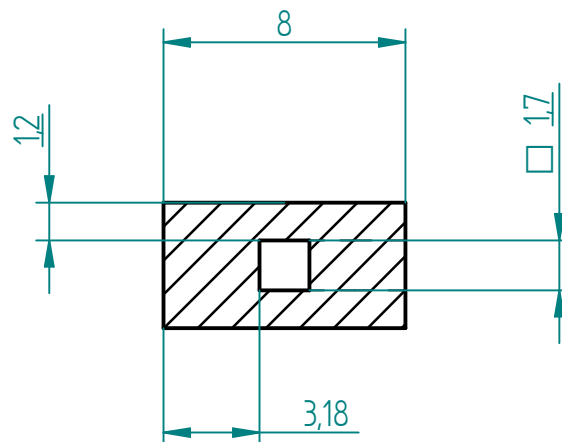
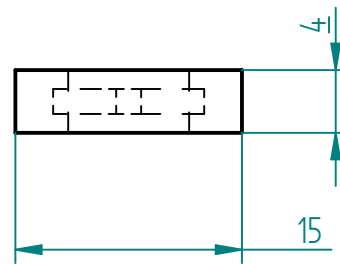
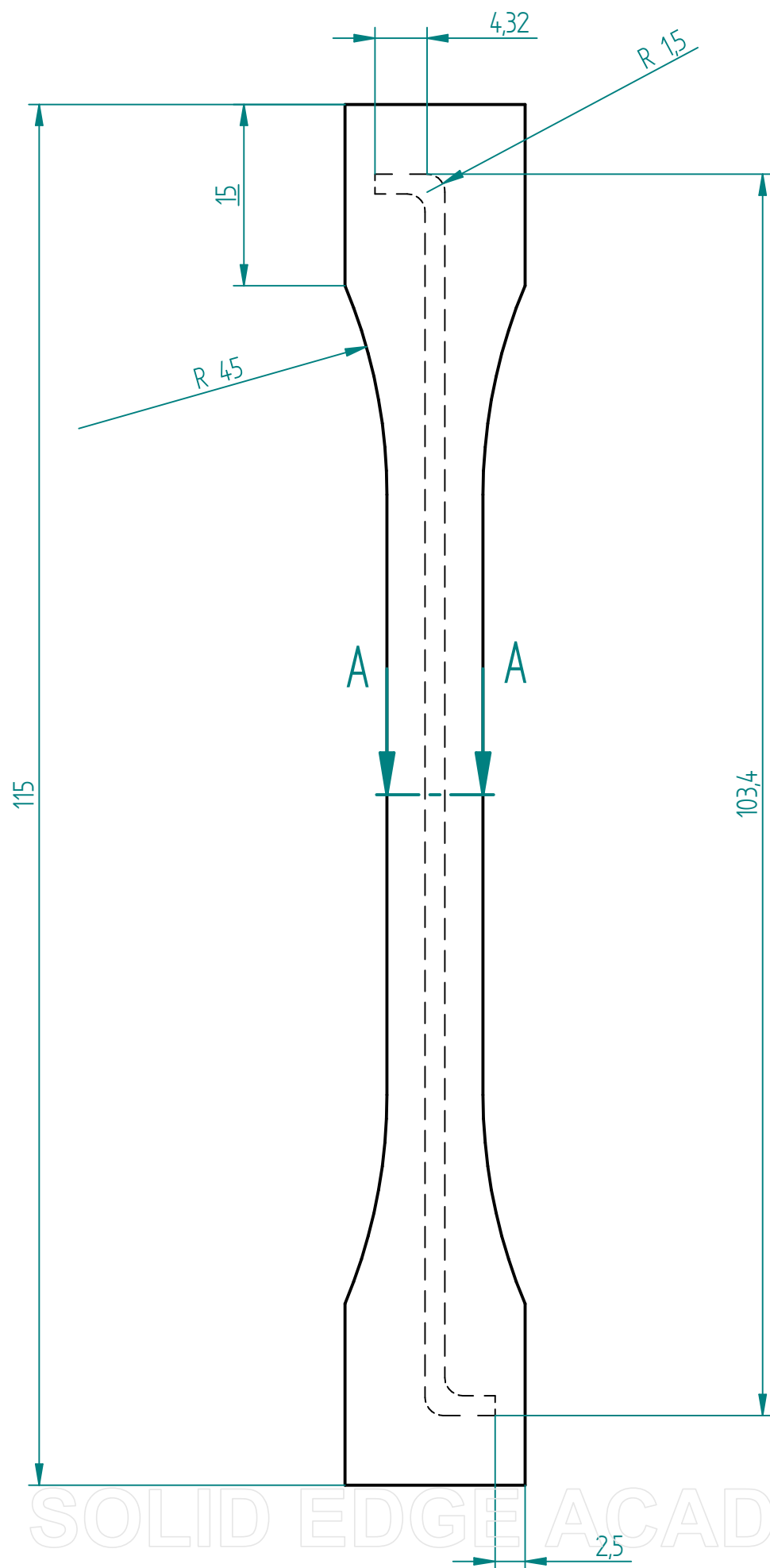
			Solid Edge		
DRAWN	Malo	20/04/20	TITLE Tampa Roscada M10		
CHECKED					
ENG APPR					
MGR APPR					
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES $\pm X.X^{\circ}$			SIZE A3	DWG NO 1	REV 1
			FILE NAME: Tampa para furo M1o_V5.dft		
			SCALE: 5 : 1		SHEET 1 OF 1

A4 – Desenhos técnicos dos Provetes

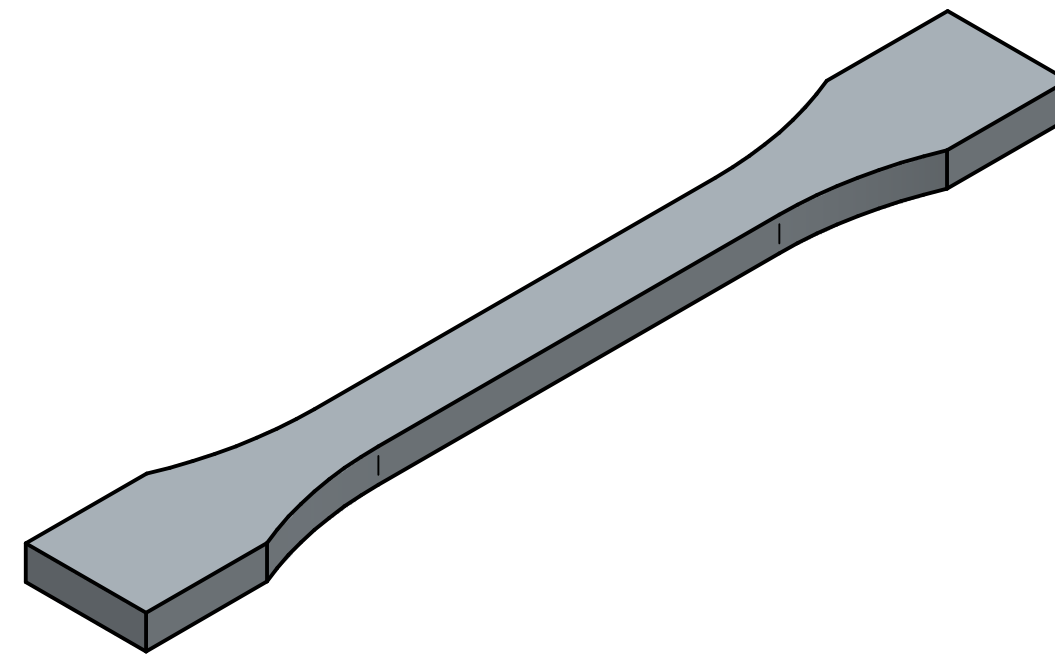
Em virtude de os desenhos serem de um formato diferente, estes encontram-se nas páginas seguintes.



	NAME	DATE	Solid Edge		
DRAWN	Flávio Ribeiro	27/12/20	TITLE		
CHECKED			Provete Impressão 3D		
ENG APPR					
MGR APPR					
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±X.X°			SIZE A3	DWG NO 1	REV 1
			FILE NAME: Provetes C_S_reforgo - impressao 3D.dft		
			SCALE: 2 : 1		SHEET 1 OF 2



SECTION A-A



	NAME	DATE	Solid Edge		
DRAWN	Flávio Ribeiro	27/12/20	TITLE		
CHECKED			Provete Impressão 3D - Com reforço		
ENG APPR			SIZE		
MGR APPR			A3		
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±X.X°			DWG NO	1	REV
			FILE NAME: Provetes C_S_reforço - impressao 3D.dft		
			SCALE: 2 : 1		SHEET 2 OF 2