Maquinagem Robotizada

Ricardo Luís de Matos Teles

Dissertação de Mestrado

Orientador: Paulo Augusto Ferreira de Abreu

Coorientador: Manuel Romano dos Santos Pinto Barbosa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2021

O trabalho apresentado nesta dissertação foi realizado no
Laboratório de Robótica Industrial
Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias s/n, Sala M206
4200-465 Porto
Portugal

Ricardo Luís de Matos Teles
Correio eletrónico: up201508002@up.pt

À minha avó, pelo carinho e apoio que sempre me deu.

Resumo

A procura por soluções flexíveis de produção, no setor industrial, levam a uma tendência crescente na utilização de células robóticas. Esta dissertação aborda a sua utilização em processos de maquinagem, área onde o seu uso ainda é relativamente limitado, concretamente para produção de peças costumizadas.

É considerada a maquinagem de um tabuleiro em MDF, concebido para guardar um conjunto particular de talheres. Este trabalho envolve uma prova de conceito do método de conceção do produto, a definição e programação da estratégia de maquinagem robotizada, assim como, a sua simulação e implementação.

Atendendo à atual procura por modelos que consigam simular a realidade do processo de produção da forma mais aproximada possível, foram utilizados diversos tipos de *software* de simulação. Por um lado, o *software* CAM utilizado permite simular o processo de remoção de material. Por outro lado, o software de programação *offline* do fabricante do robô industrial proporciona o uso de um modelo virtual da célula robótica, num ambiente tridimensional, no qual está disponível um controlador virtual, que consiste numa réplica (*digital twin*) do real.

Neste trabalho é simulado e produzido um exemplo de implementação de um tabuleiro particular. São previamente realizados e apresentados testes de validação e experimentação em protótipos de espuma. É enfatizada a importância de obter um bom acabamento superficial, assim como, a escolha dos parâmetros de corte indicados para o material escolhido.

Os resultados obtidos permitem concluir que o *software* disponível constitui uma solução flexível, quer para a simulação dos percursos de maquinagem, quer para a programação e simulação da operação do robô industrial.

Abstract

The search for flexible solutions of production, in the industrial sector, encourages a growing trend in the use of robotic cells. This dissertation addresses their use in milling processes, an area of still relatively limited use, specifically for the production of custom-made parts.

It is considered the milling of a tray in MDF, designed to hold a particular set of cutlery. This work consists of a proof of concept of the product design method, the definition and programming of the robotic milling strategy, as well as its simulation and implementation.

Given the current search for models that can simulate the reality of the production process as closely as possible, several types of simulation software were used. On the one hand, the CAM software used allows simulation of the material removal process. On the other hand, the industrial robot manufacturer's offline programming software provides the use of a virtual model of the robotic cell, in a three-dimensional environment, in which a virtual controller is available, consisting of a digital twin application.

In this work, an example of the implementation of a particular tray will be produced. Validation and experimentation tests on foam prototypes are previously performed and presented. The importance of obtaining a good surface finish is emphasized, as well as the choice of the indicated cutting parameters for the chosen material.

The results obtained allow us to conclude that the available software is a flexible solution, either for simulating milling paths or for programming and simulating the operation of the industrial robot.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de deixar um profundo agradecimento aos meus orientadores, Professor Paulo Abreu e Professor Manuel Barbosa, pela orientação, paciência e por todo o tempo despendido, que me permitiu realizar esta dissertação com o devido apoio e confiança. A ajuda e conhecimento transmitido, não só contribuíram para o meu crescimento como profissional, mas também para um enorme crescimento pessoal.

A todas as grandes amizades construídas ao longo destes anos, nesta Faculdade, por todos os momentos bem passados e histórias vividas que levo comigo para o resto da vida.

À minha família, por sempre me proporcionar todas as condições, durante o meu percurso académico, e pelo apoio dado em todas as decisões tomadas.

Aos amigos de Viana do Castelo, com quem cresci, e continuarei a crescer ao longo da minha vida.

A todos aqueles que, de certa forma, contribuíram para o meu desenvolvimento académico e pessoal, deixo aqui a minha sincera gratidão.

Índice de Conteúdos

1 Introdução **1**

1.1 Enquadramento do projeto e motivação 1
1.2 Objetivos do projeto 2
1.3 Estrutura da dissertação 2

2 Análise e Descrição da Célula Robótica **3**

2.1 Componentes da célula robótica 3
2.2 Atualizações ao sistema 6
2.2.1 Atualização do esquema elétrico 6
2.2.2 Atualizações do programa do autómato 6
2.2.3 Implementação do protocolo de *handshake* 7
2.2.4 Rotina de definição da velocidade de rotação do *spindle* 7
2.3 Modelação das ferramentas 7
2.3.1 Biblioteca de ferramentas no *software* Mastercam 8
2.3.2 Biblioteca de ferramentas em linguagem RAPID 9

3 Programação da Maquinagem **15**

3.1 Criação do modelo digital do tabuleiro 15
3.2 Criação e simulação dos percursos de maquinagem no Mastercam . . 18
3.2.1 Definição dos percursos de maquinagem 19
3.2.2 Simulação dos percursos de maquinagem 22
3.2.3 Definição do referencial da peça e da ferramenta 23
3.2.4 Validação das configurações do robô 25
3.2.5 Simulação dos percursos de maquinagem em ambiente Mastercam/Robotmaster 26
3.2.6 Geração do código para o controlador do robô 26
3.3 Validação do código no controlador do robô 26
3.3.1 Modelo virtual da célula 27
3.3.2 Validação do código gerado 28

4 Implementação na Célula Robótica **31**
4.1 Processo de fresagem . . . 31
4.1.1 Parâmetros de corte . . . 31
4.1.2 Fresagem em MDF . . . 33
4.2 Procedimento . . . 37
4.2.1 Definição do referencial do bloco a maquinar . . . 37
4.3 Testes de maquinagem . . . 39
4.3.1 Testes de maquinagem em espumas . . . 39
4.3.2 Testes de maquinagem em MDF . . . 42
4.4 Maquinagem do produto final . . . 45
4.5 Análise de resultados . . . 47

5 Conclusões e Trabalhos Futuros **51**
5.1 Conclusões . . . 51
5.2 Trabalhos futuros . . . 53

Referências **55**

Anexo A Circuitos da Instalação **59**
A.1 Circuito pneumático . . . 61
A.2 Circuitos elétricos . . . 65

Anexo B Controlo do *Spindle* **75**
B.1 Grafcets implementados . . . 77
B.2 Rotinas RAPID do *spindle* . . . 83
B.2.1 Definição da velocidade . . . 83
B.2.2 Ativação do *spindle* . . . 83
B.2.3 Desativação do *spindle* . . . 84
B.2.4 Ligar *spindle* . . . 84
B.2.5 Desligar *spindle* . . . 84
B.2.6 Ativação da troca de ferramenta . . . 85
B.2.7 Desativação da troca de ferramenta . . . 85
B.2.8 Libertar ferramenta . . . 85
B.2.9 Prender ferramenta . . . 85
B.2.10 Rotação do *spindle* - sentido inverso . . . 86
B.2.11 Rotação do *spindle* - sentido direto . . . 86

Anexo C Desenho Técnico do Tabuleiro **87**

Anexo D Rotinas RAPID de Produção do Tabuleiro **91**
D.1 Rotina principal 93
D.2 Rotina de troca de ferramenta 97

Índice de Figuras

2.1 Célula robótica 4
2.2 Diagrama da solução existente 5
2.3 Ferramentas disponíveis no laboratório 5
2.4 Definição das dimensões das ferramentas e respetivos suportes no Mastercam 9
2.5 Sistema de coordenadas do punho e da ferramenta 11
2.6 Definição do TCP na consola de programação *FlexPendant* 12
2.7 Referencial da fresa de 6 mm de diâmetro de ponta plana 12

3.1 Fotografias de auxílio à elaboração do modelo CAD do talher 16
3.2 Modelo CAD para criação da cavidade de um talher 17
3.3 Modelo CAD do tabuleiro 17
3.4 Opções de importação de um ficheiro STEP no Mastercam 18
3.5 Menu de gestão de operações de maquinagem do Mastercam 19
3.6 Percursos de maquinagem do tabuleiro 21
3.7 Simulação das operações de maquinagem do tabuleiro 22
3.8 Alternativas à definição da peça a maquinar 23
3.9 Visualização do espaço de trabalho no Robotmaster 24
3.10 Alternativas à definição da ferramenta 24
3.11 Validação das configurações do robô no Robotmaster 25
3.12 Simulação do processo de maquinagem no Robotmaster 26
3.13 Estação do modelo virtual da célula robótica 27
3.14 Gestão da troca de ferramenta na consola *FlexPendant* 30

4.1 Parâmetros de corte do processo de fresagem 32
4.2 Variação da rugosidade superficial, em operações de maquinagem de MDF, em função da velocidade de rotação, para diferentes velocidades de avanço 36
4.3 Sistemas de coordenadas utilizados na programação do robô 38
4.4 Definição do *workobject* na consola *FlexPendant* 38
4.5 Referencial do bloco a maquinar para produção do tabuleiro 39

4.6 Testes de maquinagem em espumas 41
4.7 Protótipo do tabuleiro em espuma 41
4.8 Teste de maquinagem de percursos lineares 42
4.9 Teste de maquinagem de cavidades em MDF 43
4.10 Resultados das diferentes operações de maquinagem do tabuleiro em MDF 46
4.11 Detalhe do acabamento obtido 47
4.12 Comparação dos acabamentos obtidos, na superfície da cavidade da colher 48
4.13 Comparação dos acabamentos obtidos, na superfície da cavidade do garfo 49
4.14 Comparação das dimensões obtidas após a simulação da maquinagem, com as dimensões do modelo CAD 50

Índice de Tabelas

2.1 Ligações utilizadas na comunicação do autómato com o controlador IRC5 6
2.2 Dimensões das ferramentas 8

4.1 Valores médios do avanço por dente para diferentes materiais, em função do diâmetro da ferramenta 33
4.2 Parâmetros de corte utilizados na maquinagem do tabuleiro em espuma 40
4.3 Parâmetros de corte utilizados no teste de maquinagem de percursos lineares em MDF 42
4.4 Parâmetros de corte utilizados no teste de maquinagem de cavidades em MDF 44
4.5 Parâmetros de corte utilizados na maquinagem do tabuleiro em MDF 45

Simbologia

a_e	Profundidade de corte radial (*stepover*)
a_p	Profundidade de corte axial
D	Diâmetro da fresa
f_z	Avanço por dente
n	Velocidade de rotação
R_a	Rugosidade superficial média
ν_c	Velocidade de corte
ν_f	Velocidade de avanço
Z	Número de dentes de uma fresa

Siglas

ABB	*Asea Brown Boveri*
CAD	*Computer-Aided Design*
CAM	*Computer-Aided Manufacturing*
CN	*Comando Numérico*
CNC	Comando Numérico Computorizado
HMI	*Human-Machine Interface*
MDF	*Medium Density Fiberboard*
OSB	*Oriented Strand Board*
PDS	*Precision Drive Systems*
PLC	*Programmable Logic Controller*
SAT	*Standard ACIS (file format)*
STEP	*Standard for the Exchange of Product model data*
STL	*STereoLithography (file format)*
TCP	*Tool Center Point*
XPS	Poliestireno extrudido

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, especialização em Automação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Este projeto teve início no mês de fevereiro de 2021 e estendeu-se até ao final do mês de junho. Foi realizado nas instalações da faculdade, nomeadamente no Laboratório de Robótica Industrial, do Departamento de Engenharia Mecânica.

O tema do projeto é a maquinagem robotizada e a sua utilização para obter produtos personalizados.

O futuro do setor industrial passa pela costumização em massa, com a capacidade de desenvolver produtos e serviços que correspondam às necessidades e desejos individuais do maior número de consumidores possível. A maquinagem, que consiste na definição da forma de uma peça, ou objeto, por subtração de material de um bloco inicial, ocupa uma posição de relevo no grupo de processos industriais utilizados na transformação de matéria-prima. A tecnologia que lidera o campo da maquinagem é o comando numérico computorizado (CNC), integrado nas máquinas ferramentas. Decorrente dos custos e especificidades deste processo, a maquinagem robotizada surge como uma alternativa mais flexível, com menores custos e, por conseguinte, uma inovação para o setor.

Segundo a *International Federation of Robotics*, a utilização de robôs industriais tem vindo a crescer, tendo o número de instalações anuais de robôs industriais mais do que triplicado durante 10 anos (2010-2019) [1]. Algumas das tarefas mais comuns a desempenhar pelos robôs industriais são: *pick and place*, soldadura, pintura, paletização e operações de maquinagem leve, como rebarbagem, lixagem e polimento. Porém, existem ainda limitações em operações de maquinagem, sendo de realçar a taxa de remoção de material e a exatidão do processo [2].

1.2 Objetivos do projeto

Esta dissertação teve como objetivo a implementação de um processo de maquinagem robotizada de tabuleiros costumizados em MDF, a utilizar em faqueiros, para suporte de talheres. Foi escolhida esta aplicação do processo, visto que, a área da indústria da madeira e derivados, com aplicações no ramo de mobiliário, é um potencial campo de aplicação de maquinagem através de soluções robotizadas.

Para maquinar estes tabuleiros, é utilizado um robô industrial da ABB, com um *spindle* (motor-árvore), do fabricante PDS, montado na sua extremidade. Estes equipamentos fazem parte da célula robótica existente no laboratório, utilizado para o desenvolvimento do trabalho. A integração do controlo deste *spindle* na programação do robô necessita de ser analisada, testada e validada.

Uma vez analisada a solução a utilizar, é necessário definir o produto a obter. Para tal, são criados os modelos digitais dos tabuleiros, seguida da programação dos respetivos percursos de maquinagem, sendo o objetivo final a sua implementação na célula robótica e a produção de um tabuleiro.

1.3 Estrutura da dissertação

Tratando-se este capítulo do primeiro, o presente documento, encontra-se organizado em mais quatro capítulos e anexos.

No capítulo seguinte, Capítulo 2, é realizada a análise e descrição dos componentes da célula robótica necessários para a maquinagem, assim como a apresentação da documentação necessária para uma futura utilização.

O Capítulo 3 explora a programação da maquinagem, com recurso à utilização de três programas: Solidworks, Mastercam e RobotStudio.

O Capítulo 4 reporta a implementação na célula robótica. É realizada uma introdução ao procedimento e são apresentados e analisados os resultados obtidos.

Por último, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do projeto, assim como a apresentação de uma perspetiva para trabalhos futuros.

Este documento inclui, também, três anexos que servem de apoio à compreensão da dissertação: o anexo A documenta os circuitos elétricos de controlo do *spindle* e o circuito pneumático da instalação, no anexo B é possível consultar os grafcets implementados e as rotinas RAPID [1] de controlo do *spindle*, no anexo C é apresentado o desenho técnico do tabuleiro produzido e o anexo D incluí as rotinas RAPID utilizadas na produção do tabuleiro.

[1] Linguagem de programação de alto nível utilizada para programar os controladores dos robôs industrais da ABB.

Capítulo 2

Análise e Descrição da Célula Robótica

Perante o objetivo de produzir tabuleiros costumizados para suporte de talheres, é necessário caracterizar a solução utilizada na sua produção. Como tal, neste capítulo, pretende-se analisar e descrever todos os componentes da célula robótica disponíveis para o processo de maquinagem.

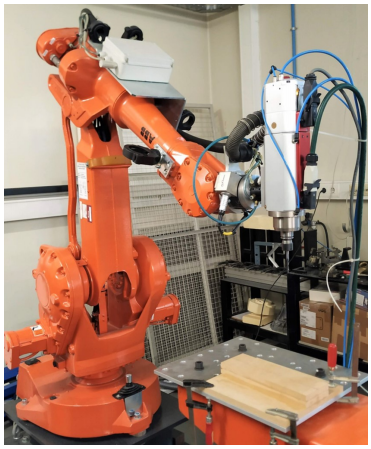
É ainda compilada e apresentada a informação relevante, para facilitar possíveis utilizações futuras da célula em operações de maquinagem.

2.1 Componentes da célula robótica

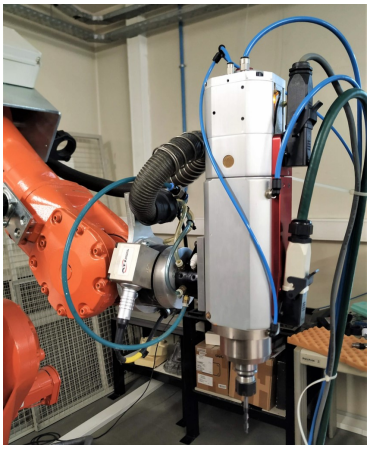
A célula robótica é constituída por um robô de seis eixos da ABB, uma mesa posicionadora de um eixo (rotativo) e respetivo controlador (IRC 5). A figura 2.1 apresenta uma fotografia da célula utilizada. Dado que não foram utilizadas as funcionalidades da mesa posicionadora, modelo IRPB C-500 da ABB, esta não é referenciada no seguimento da dissertação.

O robô industrial utilizado é o ABB IRB 2400/16, com capacidade de carga de 16 kg e alcance de 1,55 m. É um robô de construção robusta e *design* compacto, tendo como principais aplicações: soldadura, operações de corte e polimento [3]. O controlador do robô, o IRC5, é da quinta geração de controladores robóticos da ABB.

Existe um *spindle* da marca PDS (*Precision Drive Systems* GmbH), modelo XLC-070, fixo ao robô através de um sistema de mudança automática de ferramenta da marca Schunk, modelo SWK-011. Tem um peso aproximado de 10 kg, está equipado com um motor de 2,2 kW de potência e pode atingir uma velocidade máxima de 40 000 rpm, porém, foi programado para uma velocidade máxima de 20 000 rpm, para esta aplicação, como explicado na secção 2.2.4.



(a) Fotografia do robô industrial utilizado



(b) Fotografia do *spindle* utilizado

Figura 2.1: Célula robótica

É de realçar a recomendação do fabricante do *spindle* para a sua utilização em madeiras macias[1] e derivados, como contraplacado, aglomerado de madeira (OSB) e MDF. Porém, no caso de madeiras duras, é aconselhado ter cuidados especiais durante a maquinagem [4].

O controlador do *spindle* utiliza um autómato programável, dotado de uma HMI integrada (Unitronics Vision 350), e um variador de frequência (Delta VFD-VE) para controlo da velocidade de rotação.

A arquitetura de controlo do sistema utilizado (figura 2.2) baseia-se na utilização do autómato, que comunica com o variador de frequência do *spindle* através de uma ligação série RS485. Comunica, também, com o sistema pneumático do *spindle* (responsável pela refrigeração e acionamento do sistema de troca de ferramentas automático), através de linhas de I/O dedicadas e com o controlador do robô através das entradas e saídas digitais do controlador do robô. Este controlador permite uma ligação *Ethernet*, através da *service port*, a um PC, a partir do qual é feito o *upload* para o controlador do programa a executar.

O autómato possui uma HMI integrada, onde é possível selecionar entre os dois modos de funcionamento do *spindle*: "Funcionamento Manual" e "Funcionamento Automático". No primeiro modo, os parâmetros de funcionamento são inseridos pelo utilizador na HMI. No segundo, o funcionamento é gerido pelo controlador do robô. O modo de "Funcionamento Automático" é o utilizado na produção do tabuleiro referido na dissertação.

[1] A madeira é normalmente classificada como madeira macia ou madeira dura. A madeira de árvores coníferas, por exemplo o pinho, é chamada madeira macia, e a madeira de árvores latifoleadas, por exemplo o carvalho, é chamada madeira dura.

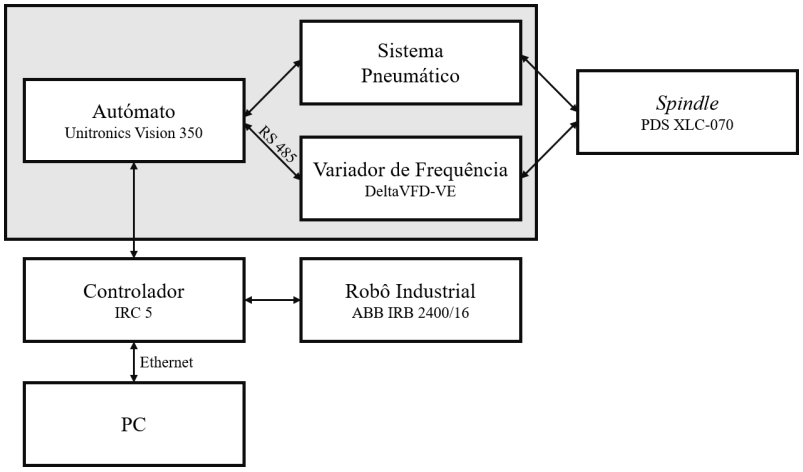


Figura 2.2: Diagrama da solução existente

O *spindle* possui um sistema automático de mudança de ferramentas através de atuação pneumática. Este sistema permite a fixação de porta pinças HSK-E32 (norma DIN 69893-5).

No laboratório estão disponíveis três ferramentas (figura 2.3). Estas ferramentas estão acopladas a uma pinça ER20 (norma ISO 15488 B ou DIN 6499 B) e a um porta pinças, da norma referida anteriormente, permitindo a sua fixação ao *spindle*. As fresas são de tungsténio, com revestimento em nitrato de titânio e alumínio (AlTiN). Na figura 2.3, da esquerda para a direita, identificam-se as seguintes ferramentas:

- broca de 6 mm de diâmetro;
- fresa de 6 mm de diâmetro e ponta plana;
- fresa de 6 mm de diâmetro e ponta boleada.



Figura 2.3: Ferramentas disponíveis no laboratório

2.2 Atualizações ao sistema

Quando foi testada a solução apresentada, evidenciaram-se alguns problemas que não permitiam o funcionamento correto do modo "Funcionamento Automático". Perante esta situação, foi necessário realizar uma revisão do sistema, de modo a solucionar os problemas existentes e realizar as atualizações necessárias para a sua utilização.

2.2.1 Atualização do esquema elétrico

A implementação existente, da ligação entre o controlador do robô e o autómato, utiliza seis saídas digitais e uma entrada digital do controlador IRC5. Foi identificado um problema nas saídas 12 e 13 da ficha X2 do controlador e foi necessário remover as ligações nestas saídas e passar para as saídas 5 e 6, respetivamente, da mesma ficha. Na tabela 2.1 são apresentadas as conexões, atualizadas, utilizadas na comunicação do autómato com o controlador.

Tabela 2.1: Ligações utilizadas na comunicação do autómato com o controlador IRC5

Endereço IRC5	**Endereço Autómato**	**Funcionalidade**
DO_10_5	Entrada 5	Ativar/Desativar a troca de ferramenta
DO_10_6	Entrada 6	Libertar/Prender a ferramenta
DO_10_9	Entrada 7	*On/Off* spindle
DO_10_10	Entrada 0	Velocidade de rotação
DO_10_11	Entrada 4	Ativar/Desativar o spindle
DO_10_14	Entrada 16	Sentido de rotação
DI_10_9	Saída 5	Linha do protocolo *handshake*

No Anexo A.2 é apresentado o esquema elétrico atualizado do sistema. Utilizou-se o *software* SEE Electrical V8R1 para refazer o esquema das ligações no controlador IRC5 e acrescentar as designações das fichas utilizadas.

2.2.2 Atualizações do programa do autómato

Uma vez realizadas as alterações da secção anterior, o *hardware* do sistema encontrava-se funcional. Porém, foram detetados problemas na utilização do modo "Funcionamento Automático" do programa, existente na memória do autómato.

Foi utilizado o *software* VisiLogic para fazer o *download* do programa, analisar o código *ladder* utilizado e proceder à sua retificação, tendo o modo de "Funcionamento Automático" ficado funcional.

2.2.3 Implementação do protocolo de *handshake*

Num trabalho realizado anteriormente, que explora a instalação do controlador do *spindle* [5], é referenciado um protocolo de *handshake*. Todavia, o mesmo não se encontrava implementado. Foi incluído o código necessário ao programa, existente na memória do autómato, e acrescentado o código referente à leitura do sinal de *handshake*, às rotinas em linguagem RAPID de controlo do *spindle*. No Anexo B.1 é possível consultar os grafcets implementados no autómato e no anexo B.2 as rotinas RAPID de controlo do *spindle*.

2.2.4 Rotina de definição da velocidade de rotação do *spindle*

A definição da velocidade de rotação do *spindle*, a partir da programação do robô, requer a geração de um conjunto de impulsos numa saída digital do controlador do robô, saída 10 da ficha X2, proporcionais à velocidade pretendida. Foram realizados testes, a partir dos quais se aferiu que o autómato consegue detetar pelo menos 20 transições, ascendentes e descendentes, num segundo [5]. Desta forma, serão geradas transições com um intervalo de 0,05 s para definição da velocidade.

Existiam problemas no código do autómato para a definição da velocidade, nomeadamente, na operação de contagem do número de transições, quando este se tratava de um número ímpar. Este problema foi retificado e foi ajustada a velocidade máxima, e a resolução da mesma, para a aplicação em causa.

Dado que o objetivo seria a maquinagem de MDF, foi estabelecida uma velocidade máxima de rotação de 20 000 rpm, e uma resolução de 500 rpm, para a sua definição.

Para estes valores de velocidade, e para uma deteção de 20 transições por segundo, o autómato foi programado para contar o número de transições detetadas durante 2 segundos.

2.3 Modelação das ferramentas

Na secção 2.1 foram apresentadas as ferramentas disponíveis para utilização, em relação às quais se pretende guardar informação para a elaboração de programas de maquinagem. Na tabela 2.2 é possível consultar as suas dimensões. Nesta secção são apresentadas duas bibliotecas criadas, uma através do *software* de CAM utilizado e outra no *software* de simulação, e programação *offline*, da ABB, onde fica guardada informação relevante para futuras utilizações.

Tabela 2.2: Dimensões das ferramentas

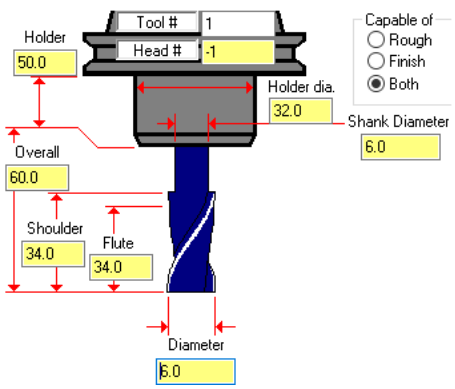
Ferramenta	**Diâmetro da haste (mm)**	**Comprimento de corte (mm)**	**Comprimento total (mm)**
Fresa plana	6	34	100
Fresa boleada	6	16	100
Broca	6	60	90

2.3.1 Biblioteca de ferramentas no *software* Mastercam

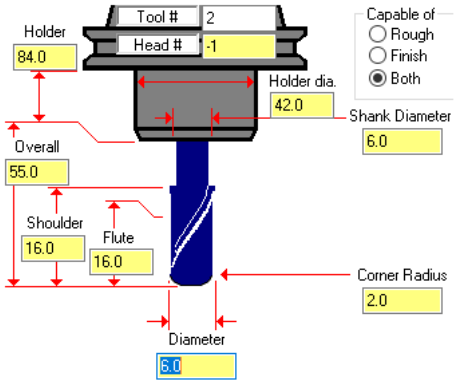
O Mastercam possui uma biblioteca de ferramentas de raiz. Com o objetivo de guardar a informação para futuras utilizações, foi acrescentado a este diretório a informação relativa às ferramentas citadas anteriormente, num ficheiro do tipo *Tool Library* (*.TOOLS-5).

Este *software* permite a simulação de percursos de maquinagem, através da qual é possível detetar colisões entre a ferramenta e o bloco a maquinar. Através das dimensões da tabela 2.2, é possível gerar modelos tridimensionais das ferramentas e respetivos suportes, que serão utilizados nesta deteção.

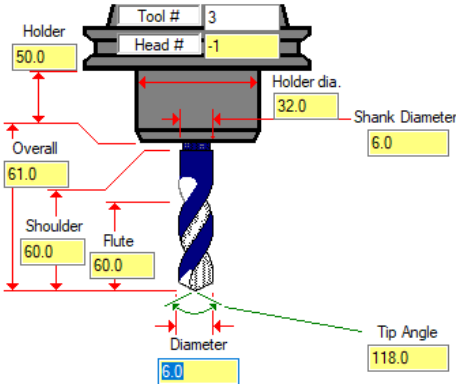
Na figura 2.4 é possível observar o menu onde são declaradas as dimensões de cada uma das ferramentas. Visto que o diâmetro destas ferramentas é constante, ao longo do seu comprimento, o valor das dimensões, *shank diameter* e *diameter*, têm o mesmo valor e o parâmetro *shoulder* torna-se irrelevante.



(a) Dimensões da fresa de ponta plana e respetivo suporte



(b) Dimensões da fresa de ponta boleada e respetivo suporte



(c) Dimensões da broca e respetivo suporte

Figura 2.4: Definição das dimensões das ferramentas e respetivos suportes no Mastercam

2.3.2 Biblioteca de ferramentas em linguagem RAPID

Para a programação dos percursos de maquinagem, é necessário conhecer a localização e orientação do referencial da ferramenta. O TCP (*Tool Centre Point*) é a origem do sistema de coordenadas da ferramenta, que define a posição e orientação da mesma. É em relação a este ponto que as posições do robô são definidas [6]. Este ponto irá corresponder à extremidade da ferramenta a utilizar.

Nesta secção, é apresentado o método utilizado para a definição do TCP das diferentes ferramentas e a orientação do respetivo referencial. Inicialmente, é apresentada uma explicação da declaração de uma ferramenta em linguagem RAPID, para uma melhor compreensão dos valores obtidos.

Declaração de uma ferramenta na linguagem RAPID

Para declarar uma ferramenta na linguagem RAPID, é necessário respeitar a seguinte estrutura:

```
1  PERS tooldata
2  <nome da variavel>:=[robhold,[tframe],[tload]];
```

É declarada como uma variável do tipo persistente, ou seja, o seu último valor é memorizado, mesmo que o programa seja parado ou que recomece desde o início. Para declarar as suas coordenadas, é necessário designar o valor das seguintes variáveis:

- robhold: variável do tipo booleana que define se na tarefa atual o robô segura o *workobject*. Toma o valor de:
  - TRUE se o robô estiver a segurar o *workobject*;
  - FALSE se o robô não estiver a segurar o *workobject*.
- tframe: variável do tipo posição, que define a posição do sistema de coordenadas da ferramenta. Quer a posição do TCP, quer a orientação das coordenadas da ferramenta, são expressas no sistema de coordenadas do punho (tool0) (ver figura 2.5).
- tload: variável do tipo *loaddata* composta pôr:

```
1  tload=[tooldata.loaddata.mass,
2      [tooldata.loaddata.cog],
3      [tooldata.loaddata.aom],
4      tooldata.loaddata.ix, tooldata.loaddata.iy, tooldata.
           loaddata.iz];
```

  - tooldata.loaddata.mass: massa em kg da ferramenta;
  - tooldata.loaddata.cog: centro de gravidade da ferramenta, expresso no sistema de coordenadas do punho (tool0) (ver figura 2.5);
  - tooldata.loaddata.aom: orientação dos principais eixos do momento de inércia expressos no sistema de coordenadas do punho;
  - tooldata.loaddata.ix, tooldata.loaddata.iy, tooldata.loaddata.iz: momentos de inércia expressos em kgm^2. Se todos os momentos de inércia forem definidos como 0 kgm^2, a ferramenta é tratada como uma massa concentrada num ponto.

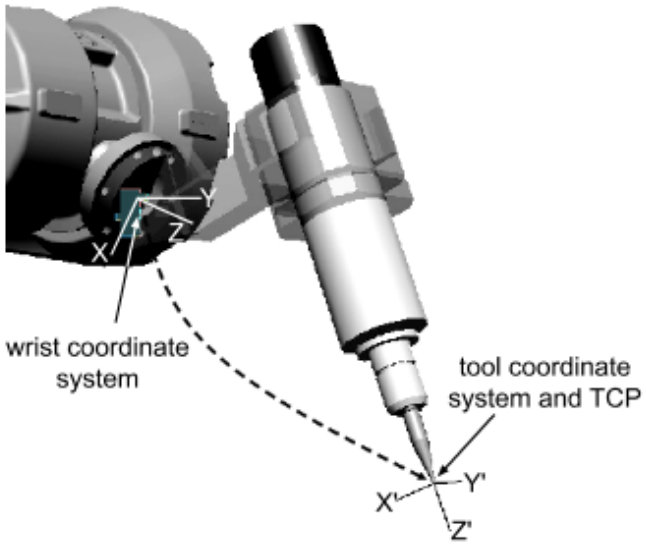
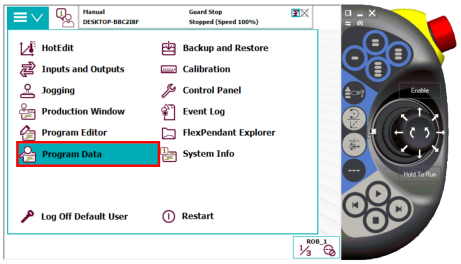


Figura 2.5: Sistema de coordenadas do punho e da ferramenta [7]

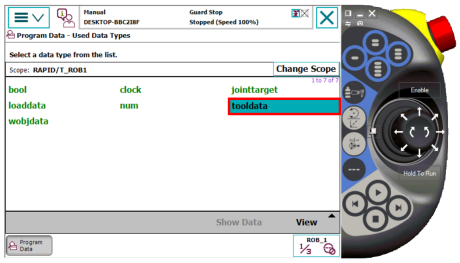
Definição experimental do referencial das ferramentas

Para a definição da posição e orientação da ferramenta, recorreu-se à consola de programação *FlexPendant* e utilizou-se o método "TCP & Z, X". Para definir a localização do TCP, foi utilizado o método de quatro pontos, que envolve o posicionamento da extremidade da ferramenta no mesmo ponto do espaço, mas com o robô em configurações distintas. Através destas quatro configurações, o controlador consegue calcular a posição do TCP. De notar que poderiam ter sido utilizados até nove pontos.

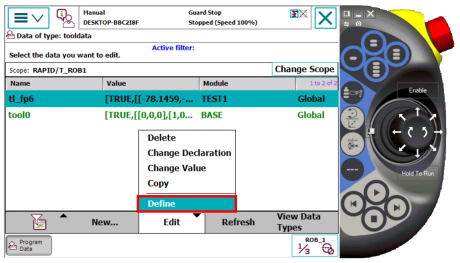
Para definir a orientação dos eixos do sistema de coordenadas, é marcado um ponto pertencente ao eixo x e um ponto pertencente ao eixo z. Os passos a seguir na consola, para este processo, encontram-se resumidos na figura 2.6.



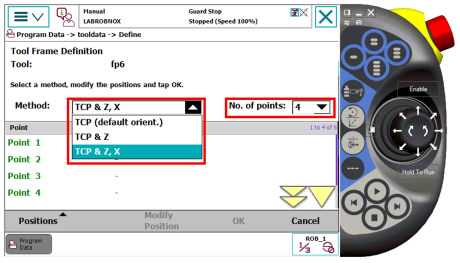
(a) Aceder ao menu principal e selecionar *Program Data*



(b) Selecionar *tooldata* para aceder aos dados das ferramentas



(c) Criar ou editar a ferramenta, e escolher a opção *Edit* - *Define*



(d) Selecionar o método de definição e o número de pontos a utilizar

Figura 2.6: Definição do TCP na consola de programação *FlexPendant*

Uma vez definido o sistema de coordenadas destas ferramentas, se nenhuma das suas dimensões for alterada, os valores mantêm-se e poderão ser utilizados de futuro. Foi escolhida a mesma orientação para todas as ferramentas, correspondente à do referencial da figura 2.7.

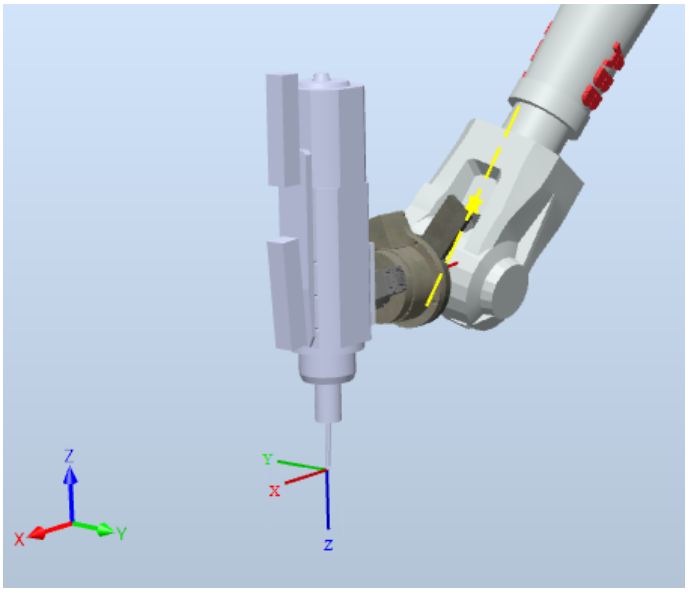


Figura 2.7: Referencial da fresa de 6 mm de diâmetro de ponta plana

Os referenciais obtidos para o sistema de coordenadas das distintas ferramentas foram os seguintes:

- fresa de 6 mm de diâmetro e ponta plana:

```
1    PERS tooldata
2    fp6:=[FALSE,[[-78.163,-192.593,173.284],
3        [0.585042,0.397147,-0.585042,0.397147]],
4        [15,[0,0,174],[1,0,0,0],0,0,0]];
```

- fresa de 6 mm de diâmetro e ponta boleada:

```
1    PERS tooldata
2    fb6:=[FALSE,[[-88.2675,-218.687,172.841],
3    [0.585042,0.397147,-0.585042,0.397147]],
4    [15,[0,0,174],[1,0,0,0],0,0,0]];
```

- broca de 6 mm de diâmetro;

```
1    PERS tooldata
2    b6:=[FALSE,[[-77.5775,-192.276,174.01],
3        [0.585042,0.397147,-0.585042,0.397147]],
4        [15,[0,0,174],[1,0,0,0],0,0,0]];
```

Após a identificação e resolução dos problemas na célula robótica, assim como, a modelação das ferramentas existentes, foi possível passar à fase seguinte de elaboração dos programas de maquinagem, apresentada no Capítulo 3.

Capítulo 3

Programação da Maquinagem

A elaboração dos programas do robô, que permitam a maquinagem, torna-se quase impossível sem o recurso a ferramentas de modelação e simulação, tais como as usadas em sistemas CAD/CAM (*Computer Aided Design/Manufacturing*). Este tipo de *software* permite, em geral, a modelação tridimensional por modelos de sólidos e superfícies complexas, quer da peça final a obter, quer do bloco a maquinar, quer ainda da ferramenta, robô ou outros elementos da célula robótica.

Desta forma, é possível avaliar, através de simulação, o resultado da escolha das estratégias de maquinagem e a sua otimização. Utilizando ferramentas de CAM, originalmente desenvolvidas para suporte à elaboração de programas de CN, em máquinas-ferramenta, pode-se tirar partido das múltiplas funcionalidades associadas à escolha de diferentes estratégias de maquinagem, ferramentas e parâmetros de corte.

Neste trabalho é utilizado o *software* de CAD SolidWorks para obtenção do modelo digital da peça e *software* de CAM Mastercam, com o *add-on* Robotmaster, para definição e simulação dos percursos de maquinagem. Por fim, recorreu-se ao *software* de programação *offline* e simulação de robôs da ABB, RobotStudio, para validação dos programas gerados pelo Mastercam/Robotmaster.

3.1 Criação do modelo digital do tabuleiro

Para a programação da maquinagem, é necessário um modelo digital do produto a obter. Neste sentido, foi utilizado o *software* SolidWorks para a criação do modelo CAD de um tabuleiro, o qual permite alojar talheres de um faqueiro já existente.

Para obter a modelação das cavidades a realizar, para alojar os talheres, os mesmos foram fotografados em diferentes ângulos e, posteriormente, editadas as fotografias, de forma a realçar o seu contorno exterior (figura 3.1).



(a) Fotografia antes de edição

(b) Fotografia depois de edição

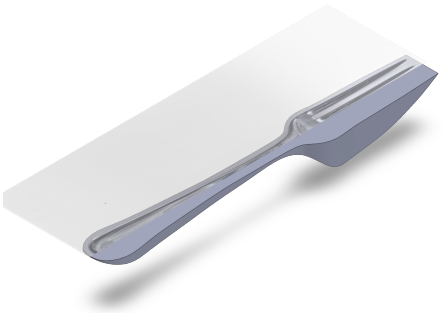
Figura 3.1: Fotografias de auxílio à elaboração do modelo CAD do talher

As imagens obtidas foram posteriormente importadas para o *software* CAD e cotadas, utilizando a opção *sketch image* do SolidWorks. De seguida, foi desenhado o contorno do mesmo num *sketch*, e utilizado para criar um modelo de sólido, correspondente à respetiva cavidade, como representado na figura 3.2.

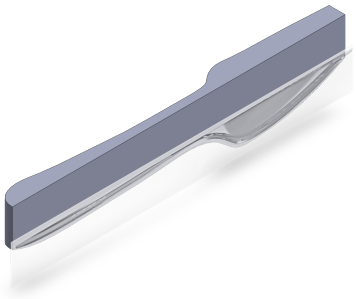
Foi escolhido o método descrito por se tratar de uma forma expedita de modelar as cavidades, o que permitiu uma passagem rápida à implementação do modelo. Este método garante um bom ajuste da cavidade ao talher, possibilitando visualizar e personalizar o ajuste final, através da opção de *offset* do contorno do mesmo.

Experimentou-se também um *add-in* para o SolidWorks denominado *Autotrace*, que permite obter o contorno exterior de uma imagem automaticamente, sendo também possível editar a imagem. Foi optado não recorrer a este método, porque, uma vez gerado o *sketch* do contorno, o mesmo tem de ser modificado de forma a obter superfícies contínuas e uma forma fluída, tornando o processo mais demorado.

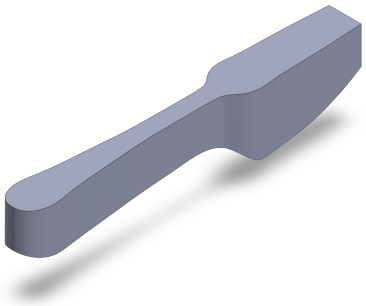
Após obter os modelos para criação das cavidades dos talheres, foi criado um modelo do tabuleiro (figura 3.3, conforme o desenho técnico no anexo C). O ficheiro obtido foi gravado em três formatos: no formato STEP AP203 para utilização na definição dos percursos de maquinagem no Mastercam, no formato STL para utilização do modo *Verify* no Mastercam e no formato SAT para uso em simulação no RobotStudio.



(a) Modelo CAD com corte na secção da fotografia frontal



(b) Modelo CAD com corte na secção da fotografia lateral



(c) Modelo CAD para criação da cavidade final

Figura 3.2: Modelo CAD para criação da cavidade de um talher

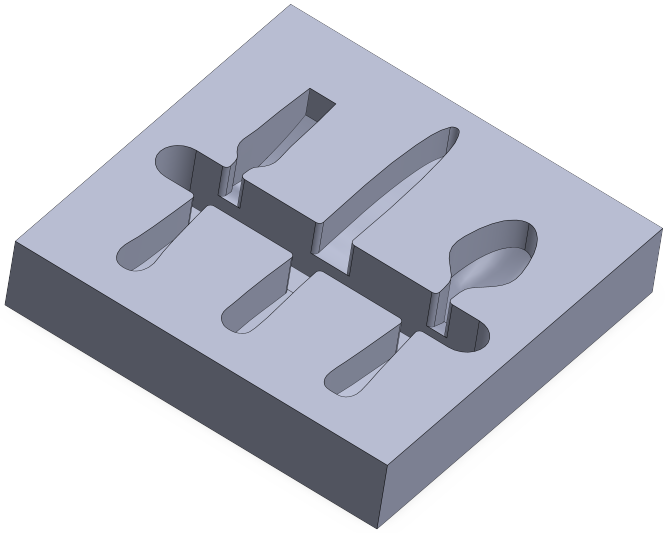


Figura 3.3: Modelo CAD do tabuleiro de dimensões 250 mm × 250 mm × 48 mm (comprimento × largura × altura)

3.2 Criação e simulação dos percursos de maquinagem no Mastercam

Para a criação e simulação dos percursos de maquinagem, foi utilizado o *software* Mastercam/Robotmaster. Apesar de se tratar de uma ferramenta de CAD e CAM, neste projeto apenas foram utilizadas as suas funcionalidades de CAM, visto que o *software* CAD utilizado foi o SolidWorks, que se revelou de utilização mais expedita.

O *software* disponibiliza uma vasta coleção de estratégias de maquinagem a realizar e permite a importação do modelo CAD criado anteriormente (secção 3.1). A sua integração com o software Robotmaster, permite a simulação do processo e a geração do código RAPID, utilizado no controlador do robô.

Para a integração de modelos CAD no Mastercam, este *software* permite importar modelos em vários formatos, tendo sido utilizado o formato STEP, no projeto. Ao escolher a opção *trimmed surfaces* as diferentes superfícies, que compõem o sólido, são criadas como entidades independentes, o que torna possível a sua seleção de forma isolada. A opção *edge curves* permite a identificação e criação das entidades correspondentes às distintas arestas do sólido. A utilização destas entidades facilita a definição dos percursos, não sendo necessário criar superfícies ou contornos adicionais.

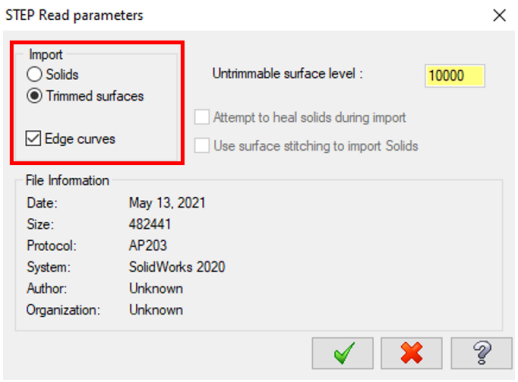


Figura 3.4: Opções de importação de um ficheiro STEP no Mastercam

O Robotmaster permite a geração de percursos de maquinagem para executar em robôs de distintos fabricantes: ABB, FANUC, KUKA, Stäubli e Motoman, na sua linguagem nativa, assim como a sua simulação com o robô escolhido.

Através de um pós-processador, o Robotmaster transforma os percursos de maquinagem gerados, numa linguagem passível de ser implementada no controlador da máquina a utilizar. Neste caso, é gerado um código na linguagem RAPID que permite a sua execução em controladores de robôs da ABB.

Antes de programar os percursos de maquinagem, é necessário selecionar o equipamento a utilizar, sendo esta escolha realizada através do *add-on* Robotmaster.

3.2.1 Definição dos percursos de maquinagem

Para a produção do tabuleiro, foram escolhidas quatro operações de maquinagem e são utilizadas duas ferramentas distintas. A primeira operação realizada é de desbaste, seguida de três operações de acabamento.

Na figura 3.5 está representado o menu de gestão de operações de maquinagem (*Operation Manager*), onde é possível observar a solução final desenvolvida para a produção do tabuleiro. Este menu está organizado por máquinas (*Machine Group*). No menu *Properties - ABB Robot*, é possível definir informações relativas às velocidades de avanço, rotação e material da peça a maquinar (menu *Tool Settings*), a geometria do bloco a maquinar (menu *Stock Setup*) e declarar uma zona de segurança (menu *Saftey Zone*).

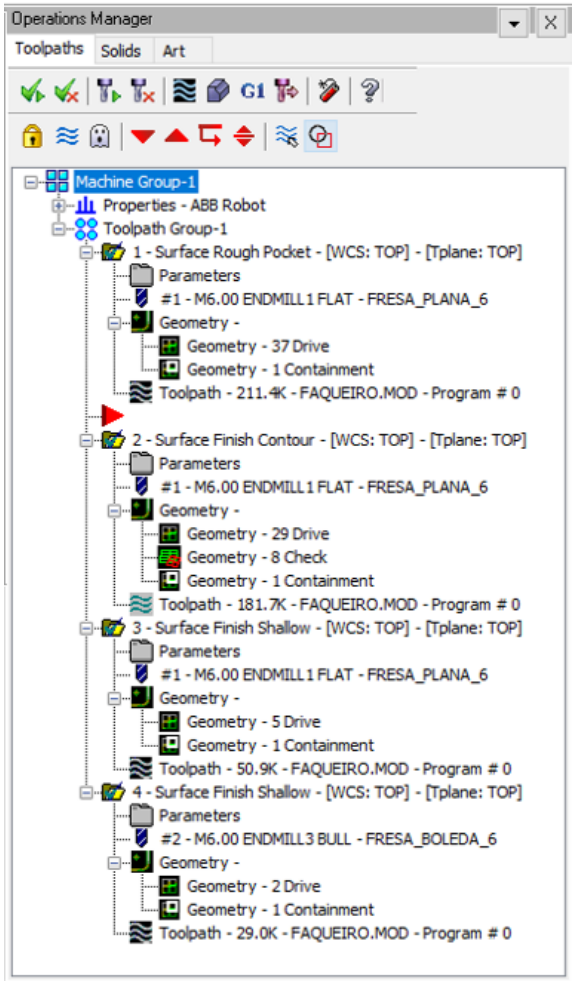


Figura 3.5: Menu de gestão de operações de maquinagem do Mastercam

No menu *Toolpath Group-1* estão definidas as operações de maquinagem a realizar. Nesta secção, são descritas estas operações. Dado que os parâmetros de corte diferem consoante o material a utilizar, os valores dos mesmos são apresentados na secção 4.3.1, para a maquinagem de um protótipo do tabuleiro em espuma de poliuretano expandido, e na secção 4.4, para a maquinagem do produto final em MDF.

A ferramenta utilizada, nas primeiras três operações, é uma fresa de ponta plana de 6 mm de diâmetro, e na última operação é utilizada uma fresa de ponta boleada de 6 mm de diâmetro (ferramentas descritas na secção 2.1).

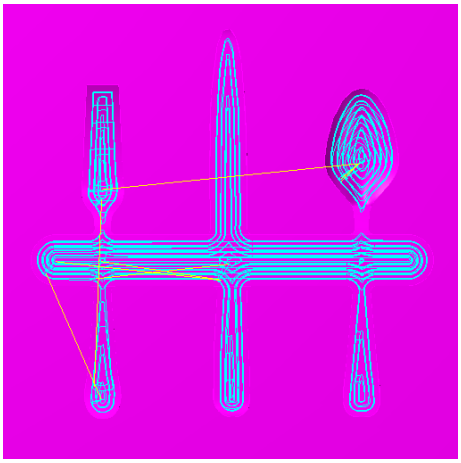
Inicialmente, é realizada uma operação de desbaste, *Surface Rough Pocket*, onde é removida uma primeira camada de material do interior do contorno fechado, correspondente às distintas cavidades. Nesta operação, a ferramenta desce gradualmente ao longo da profundidade da cavidade, consoante a profundidade de corte declarada nos parâmetros de corte. Após esta operação, é deixada uma sobre-espessura nas paredes das cavidades. O método de corte escolhido foi o *Highspeed*, um método de desbaste onde são realizados movimentos circulares suaves, que ajudam a reduzir o desgaste da ferramenta [8]. Na figura 3.6, imagem (a), é possível ver o percurso de maquinagem a realizar.

A segunda operação, corresponde a uma operação de acabamento, *Surface Finish Contour*, onde é removido material ao longo do contorno exterior das cavidades. À semelhança da operação anterior, a ferramenta desce gradualmente, ao longo da profundidade da cavidade. Nesta operação, são atingidas as cotas desejadas nos contornos das cavidades, sendo removida a camada de material que existia nas paredes, proveniente da operação anterior. Na figura 3.6, imagem (b), é possível ver o percurso de maquinagem a realizar.

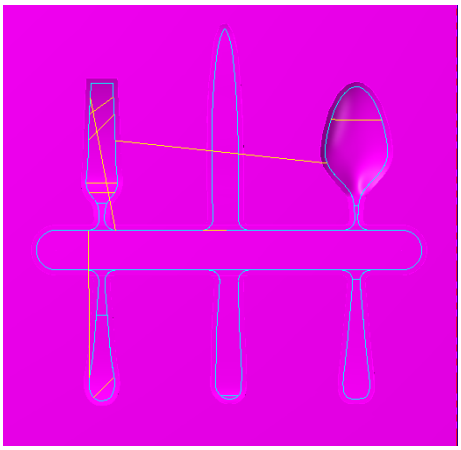
Ao observar a imagem (b) da figura 3.7, é possível observar o resultado da segunda operação de maquinagem num ambiente de simulação. Ao observar esta imagem, apesar dos contornos das cavidades apresentarem as cotas desejadas, o fundo da cavidade apresenta "degraus" como resultado desta operação. Na operação seguinte, é realizado um acabamento, *Surface Finish Shallow*, removendo o material de forma a atingir uma superfície não plana, com a inclinação desejada, para acomodar o talher correspondente. São definidos dois ângulos, correspondentes à inclinação mínima e máxima de maquinagem. Na figura 3.6, imagem (c), é possível ver o percurso de maquinagem a realizar.

Como a superfície da colher é esférica, é realizada uma troca de ferramenta para uma fresa de ponta boleada, de forma a obter um melhor acabamento. A operação a realizar é igual à anterior (*Surface Finish Shallow*). Na figura 3.6, imagem (d), é possível ver o percurso de maquinagem a realizar.

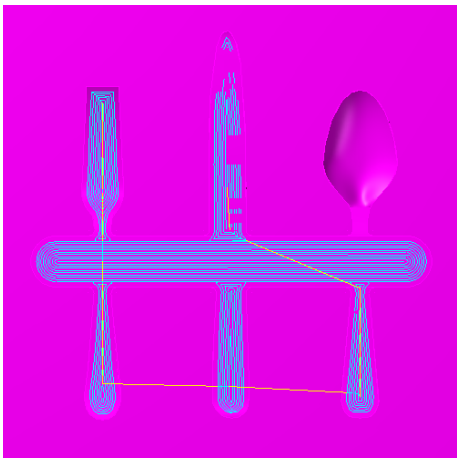
Em todas as operações de maquinagem, foi escolhida a opção *Optimize cut order*, através da qual os percursos de maquinagem são otimizados de forma a manter a ferramenta em determinada zona, até que todas as operações dessa área sejam realizadas, reduzindo os tempos associados ao processo.



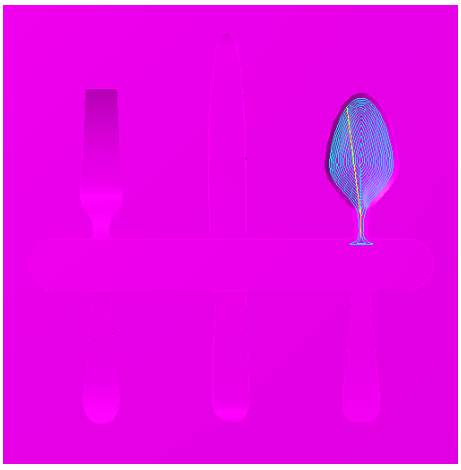
(a) Primeira operação - *Surface Rough Pocket*



(b) Segunda operação - *Surface Finish Contour*



(c) Terceira operação - *Surface Finish Shallow*



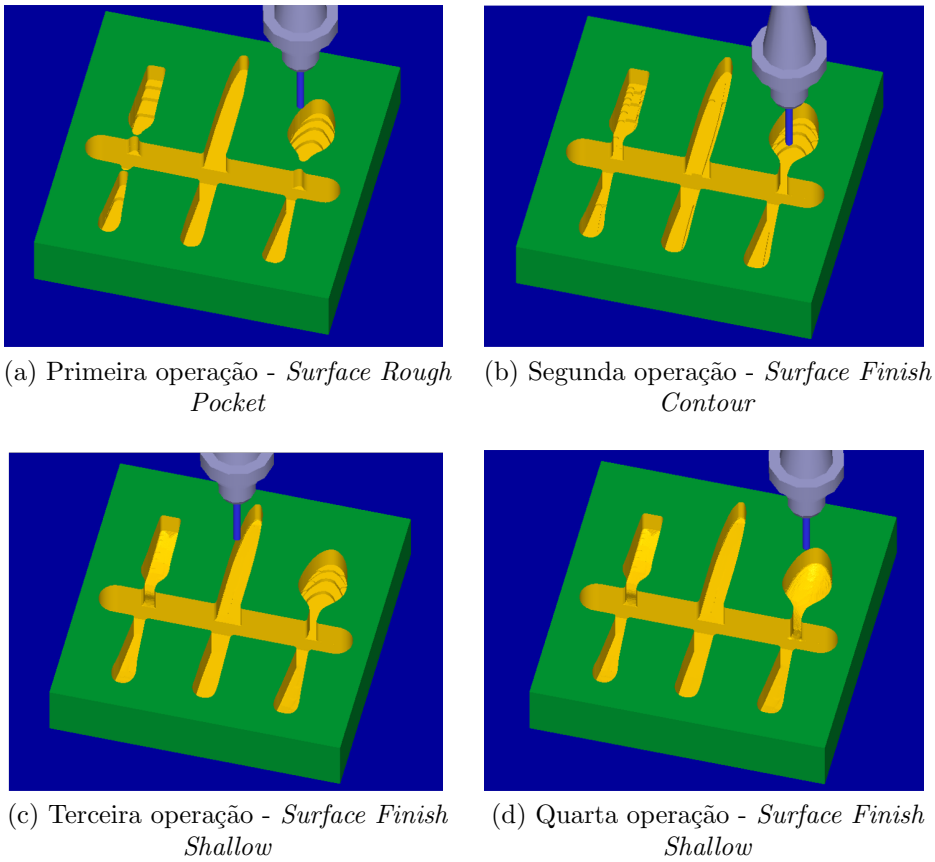
(d) Quarta operação - *Surface Finish Shallow*

Figura 3.6: Percursos de maquinagem do tabuleiro

3.2.2 Simulação dos percursos de maquinagem

O Mastercam disponibiliza dois métodos de simulação dos percursos de maquinagem: o *Backplot*, que traça os percursos de maquinagem sequencialmente, permitindo detetar erros nos mesmos, e o *Verify*, que simula o processo de maquinagem utilizando um modelo sólido do bloco a maquinar declarado, permitindo obter uma representação gráfica do acabamento, tratando-se de uma boa forma de comparar diferentes parâmetros de corte. Este modo de simulação calcula os tempos de maquinagem em corte e em aproximação, e os volumes de material removido em excesso e de sobre-espessuras. Permite também visualizar os percursos de maquinagem e avaliar a eficiência da estratégia de maquinagem escolhida. Torna também possível detetar qualquer colisão da ferramenta com o bloco a maquinar. Para a deteção destas colisões, são utilizadas as dimensões de ferramenta especificadas na secção 2.1.

Na figura 3.7 é possível observar o resultado da simulação *Verify* das quatro operações realizadas no tabuleiro.



(a) Primeira operação - *Surface Rough Pocket*

(b) Segunda operação - *Surface Finish Contour*

(c) Terceira operação - *Surface Finish Shallow*

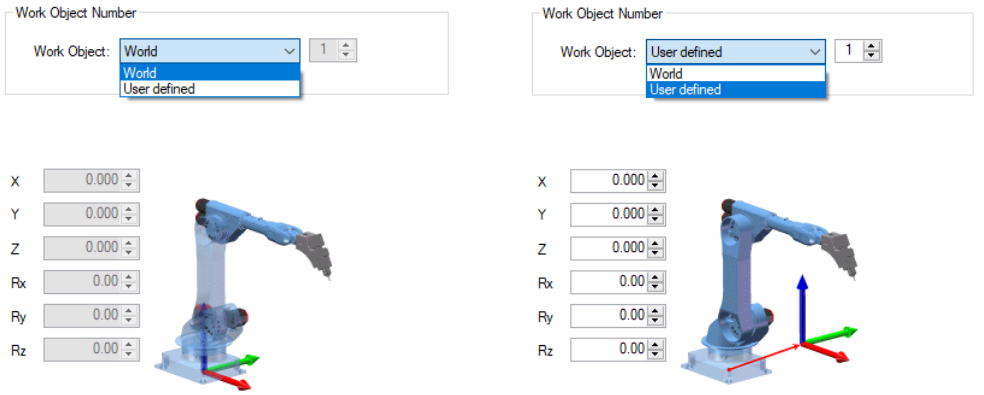
(d) Quarta operação - *Surface Finish Shallow*

Figura 3.7: Simulação das operações de maquinagem do tabuleiro

3.2.3 Definição do referencial da peça e da ferramenta

Relativamente à escolha do *spindle*, num trabalho anterior [9], foi adicionado ao diretório das ferramentas do Robotmaster um ficheiro em formato STL que contém a geometria do equipamento, possibilitando a escolha do mesmo.

Após a definição dos percursos de maquinagem, e escolhido o equipamento a utilizar, é necessário definir o referencial da ferramenta e a localização da peça, correspondente ao bloco a maquinar. Existem dois métodos de definição da peça: utilizar o referencial associado ao *world* ou definir um novo referencial (*user defined*) (ver figura 3.8). Foi utilizado o segundo método, onde a origem e orientação dos eixos do referencial é definida relativamente ao referencial da peça. Após a sua definição, é possível verificar se a mesma se encontra no espaço de trabalho do robô escolhido (figura 3.9).



(a) Referencial associado ao sistema de coordenadas *world*

(b) Referencial definido pelo utilizador

Figura 3.8: Alternativas à definição da peça a maquinar

Existem, também, dois métodos de definição do referencial da ferramenta a utilizar: a definição de ferramenta (*use tool definition*) ou definição do spindle (*use spindle definition*) (ver figura 3.10). No primeiro método, o referencial é calculado através do modelo CAD do *spindle*, existente no Mastercam, ao qual é acoplado o modelo CAD da ferramenta e respetivo suporte, gerado através das dimensões especificadas na secção 2.1. No segundo método, são introduzidas as coordenadas do referencial da ferramenta, que deverão ser obtidas previamente.

Foi utilizado o segundo método, e utilizadas as coordenadas calculadas na secção 2.3.2. Porém, quando estas coordenadas foram definidas na célula robótica, foram utilizados quaterniões, uma forma utilizada na linguagem RAPID para descrever a orientação de um referencial, e no Mastercam são utilizados ângulos de Euler, uma representação através de três ângulos, tornando-se necessário a sua conversão.

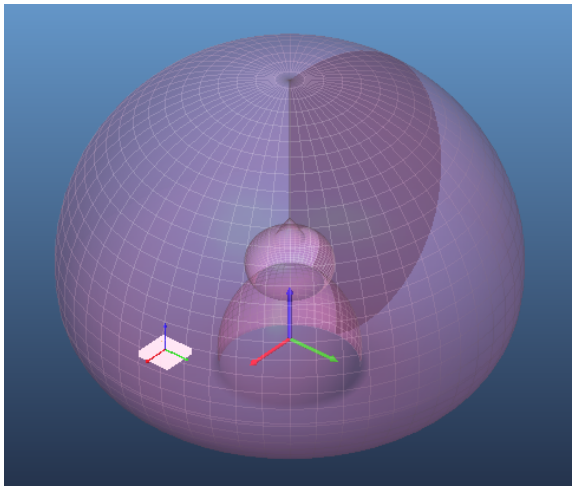
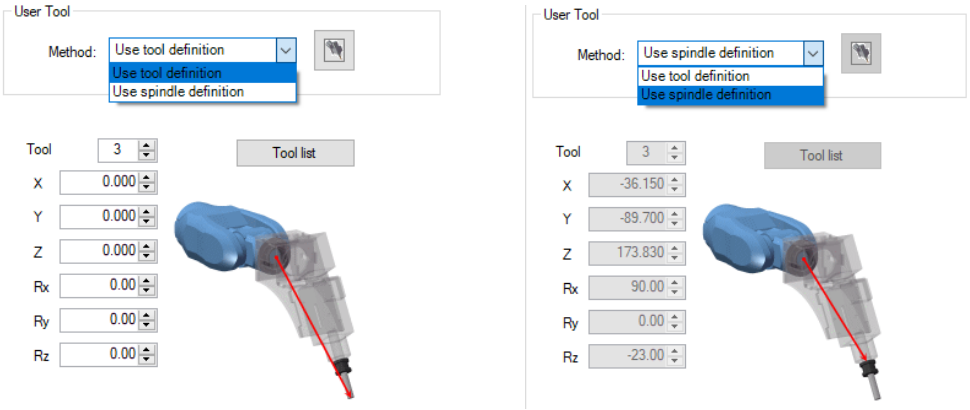


Figura 3.9: Visualização do espaço de trabalho no Robotmaster



(a) Utilização da definição de ferramenta (b) Utilização a definição do *spindle*

Figura 3.10: Alternativas à definição da ferramenta

O Robotmaster possui um conversor que permite obter ângulos de Euler a partir de um dado quaternião e vice-versa. A convenção utilizada na notação dos ângulos de Euler é a R_z, y, z.

Existem também funções no RobotStudio que permitem efetuar as ditas conversões:

```
EulerZYX();
OrientZYX();
```

A primeira permite obter os ângulos de Euler (na notação R_z, y, x) a partir de um dado quaternião e a segunda permite obter o quaternião a partir de um dado conjunto de ângulos de Euler.

Visto que, as distintas ferramentas têm os referenciais com a mesma orientação no espaço, os valores para os ângulos de Euler, a inserir, são os mesmos e correspondem a:

- R_x=0º;
- R_y=-90º
- R_z=68,34º

3.2.4 Validação das configurações do robô

Para validar as operações de maquinagem, é necessário confirmar se estas geram configurações do robô permitidas. Para tal, é necessário aceder ao menu *Optimization* para analisar a existência de singularidades, zonas não atingíveis pelo robô, limite de juntas e zonas de colisão.

Na figura 3.11 é possível observar o gráfico gerado ao selecionar uma operação de maquinagem. Neste gráfico, o eixo horizontal representa a trajetória da ferramenta, em que a unidade de medida é o número de pontos da trajetória, e no eixo vertical a rotação adicional da orientação da ferramenta em cada ponto. Se nenhuma das situações anteriores for encontrada, a operação de maquinagem é validada pelo Robotmaster e a linha horizontal, que corresponde à curva de otimização, torna-se verde, como é possível observar na figura 3.11.

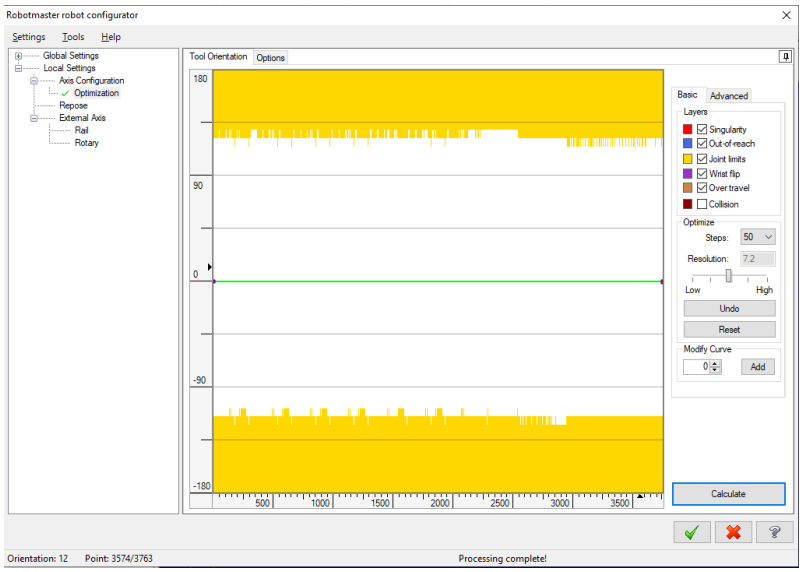


Figura 3.11: Validação das configurações do robô no Robotmaster

3.2.5 Simulação dos percursos de maquinagem em ambiente Mastercam/Robotmaster

Após a definição do referencial da peça a maquinar, do referencial da ferramenta e da validação das configurações do robô para cada uma das operações de maquinagem, é possível simular o processo no ambiente Robotmaster (figura 3.12).

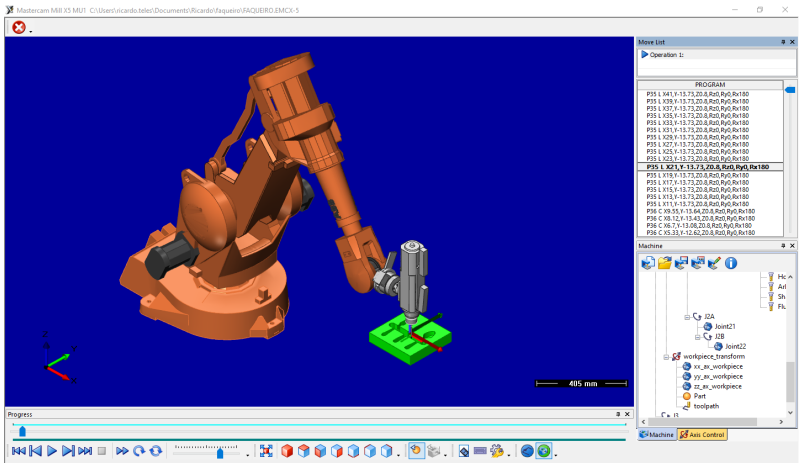


Figura 3.12: Simulação do processo de maquinagem no Robotmaster

3.2.6 Geração do código para o controlador do robô

O Mastercam disponibiliza um conjunto de pós-processadores, que permitem transformar os percursos de maquinagem gerados numa linguagem passível de ser implementada no controlador de um dado robô. Ao selecionar o *Machine Type* ABB Robot, fica disponível o pós-processador para a linguagem RAPID dos controladores de robôs da ABB. Ao usar o comando do item G1, do menu da figura 3.5, é gerado um ficheiro de texto com o código na linguagem RAPID, de extensão .MOD.

3.3 Validação do código no controlador do robô

O *software* RobotStudio permite a simulação e programação *offline* dos robôs da ABB. Permite criar um ambiente de simulação mais próximo possível da realidade. São fornecidos pelo fabricante diversos equipamentos que auxiliam a construção deste ambiente: robôs, mesas posicionadoras, eixos lineares, entre outros.

Neste projeto, foi utilizado um modelo virtual da célula robótica existente no laboratório e foi criado um ambiente onde é possível simular os percursos de maquinagem, através do código RAPID gerado no Mastercam.

Este *software* tem a particularidade de poder incorporar um modelo virtual, *digital twin*, dos controladores dos robôs reais, que inclui também um modelo virtual da consola.

3.3.1 Modelo virtual da célula

No modelo virtual da célula, foi criada uma estação (figura 3.13), que constitui um ambiente 3D que replica os diferentes componentes existentes na estação do laboratório. Esta representação gráfica, permite visualizar os movimentos do robô durante a simulação das operações de maquinagem e detetar possíveis colisões com os restantes elementos da estação.

É de destacar algumas ferramentas disponíveis neste ambiente de simulação: *TCP Trace*, que possibilita traçar o percurso realizado pelo TCP da ferramenta, *I/O Simulator*, que permite monitorizar e simular os sinais das entradas e saídas (I/O) do controlador do robô e *Signal Analyzer*, para gravação dos valores de velocidade e aceleração durante a simulação, e posteriormente, a construção de gráficos que facilitam a análise e comparação de diferentes valores para estes parâmetros.

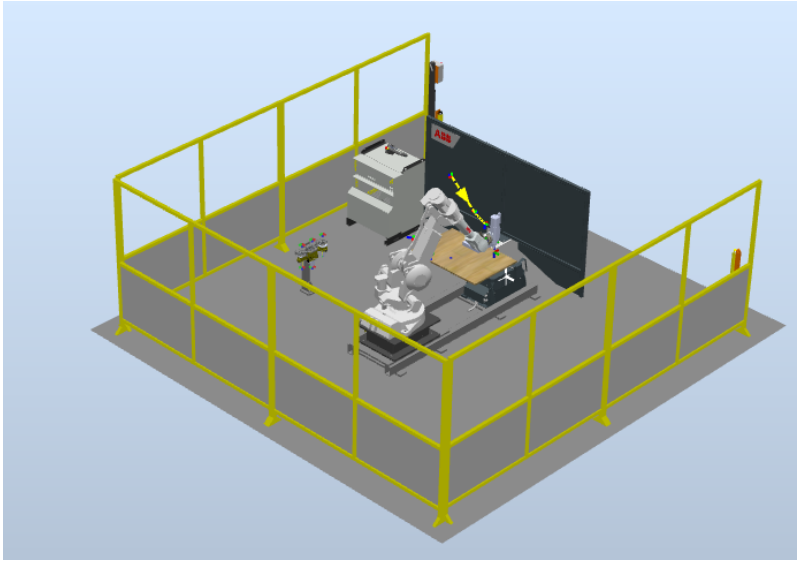


Figura 3.13: Estação do modelo virtual da célula robótica

A cada estação está associado um controlador virtual. O *software* RobotWare disponibiliza uma réplica do controlador IRC5, permitindo a sua programação *offline* e aceder a todas as suas funcionalidades de forma virtual.

3.3.2 Validação do código gerado

O código RAPID gerado pelo pós-processador do *software* Mastercam/Robotmaster deve ser validado no *software* de programação *offline* do fabricante do robô, o RobotStudio. Para este efeito, é utilizado o modelo digital da célula robótica, onde é possível realizar a simulação mais próxima com a realidade realizada até ao momento, pelas razões citadas anteriormente.

O programa gerado pelo Robotmaster é previamente editado para renomear os ficheiros gerados, serem implementadas as rotinas de mudança de ferramenta e acrescentar as rotinas de controlo do *spindle* (anexo B.2).

Atendendo a que os programas gerados são de longa extensão, estes não podem ser carregados para a memória do controlador de uma só vez, pelo que são estruturados em módulos. Assim, existe um módulo principal (anexo D.1) e um conjunto de módulos secundários. O primeiro módulo secundário, constituinte da primeira operação, é renomeado para OP1_MODULE_1, seguindo a seguinte lógica:

```
MODULE OP<numero da operacao>_MODULE<numero do modulo>;
```

Quanto à rotina do primeiro módulo, da primeira operação, é dado o nome FAQUEIRO_1_1 seguindo a seguinte lógica:

```
PROC FAQUEIRO<numero da operacao>_<numero do modulo>;
```

O módulo principal permite o *upload* individual dos módulos secundários. Para este efeito, os módulos secundários devem ser armazenados no diretório de referência do controlador do robô (diretório "HOME").

Para cada uma das operações, é realizado o carregamento dos módulos secundários correspondentes, comando *Load*, e posteriormente, o módulo é eliminado, comando *UnLoad*. No caso da primeira operação, é constituída por dois módulos secundários, OP1_Module1 e OP1_Module2, e o código para a sua realização é:

```
49 ! OPERACAO 1
50       Load stPath\File:=stOP1_Module1;
51       %"FAQUEIRO1_1"%;
52       UnLoad stPath\File:=stOP1_Module1;
53       Load stPath\File:=stOP1_Module2;
54       %"FAQUEIRO1_2"%;
55       UnLoad stPath\File:=stOP1_Module2;
```

No módulo principal a utilização das seguintes funções permite condicionar o comportamento do robô ao longo das trajetórias de maquinagem:

```
43    AccSet 10,10;
44    ConfL\On;
45    SingArea\Wrist;
```

Visto que acelerações e desacelerações menores resultam em movimentos mais suaves do robô, reduzindo as vibrações e erros no percurso [7], o comando AccSet é utilizado para limitar a aceleração do robô. O primeiro parâmetro indica que o valor da aceleração está limitado a 10% do valor de referência. O segundo parâmetro explicita que a rampa de aceleração está limitada a 10% do valor referência.

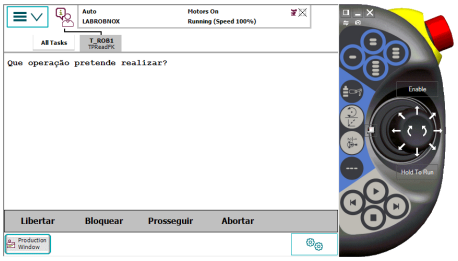
O comando ConfL (*Configuration Linear*) é utilizado para especificar a monitorização durante movimentos lineares e circulares. Quando esta funcionalidade é ativada (ConfL\On), a execução do programa é interrompida caso uma configuração não seja possível de alcançar [7].

Na execução do programa pretende-se evitar configurações singulares, o comando SingArea\Wrist permite que a orientação da ferramenta possa diferir ligeiramente da programada, para evitar a singularidade do punho, que se verifica quando os eixos das juntas 4 e 6 ficam paralelos [7].

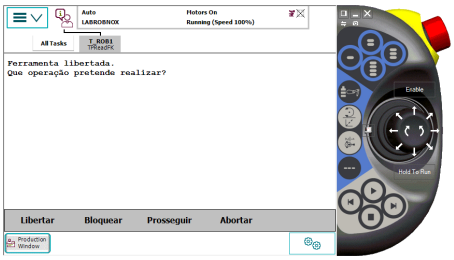
No anexo D.2, são apresentadas as rotinas desenvolvidas para poderem ser incorporadas, no programa, mudanças de ferramenta assistidas manualmente. Para este efeito, foi desenvolvida uma interface Homem-máquina apresentada na figura 3.14.

Para o bom funcionamento do sistema, não é permitido pedir para bloquear a ferramenta, se antes não tiver sido libertada pelo menos uma ferramenta, caso tal aconteça, aparecerá no ecrã a mensagem da imagem (d) da figura 3.14. Não é também permitido prosseguir com a maquinagem sem realizar pelo menos uma troca de ferramenta, caso tal não seja respeitado, aparecerá no ecrã a mensagem da imagem (e) da figura 3.14.

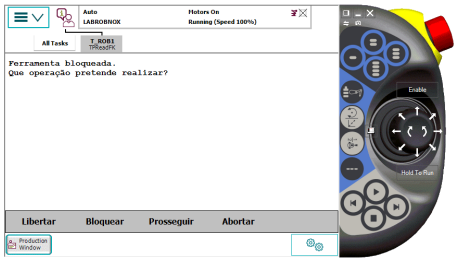
Com o programa gerado pelo Mastercam/Robotmaster validado no RobotStudio, fica assegurada a sua validade para poder ser implementado na célula real.



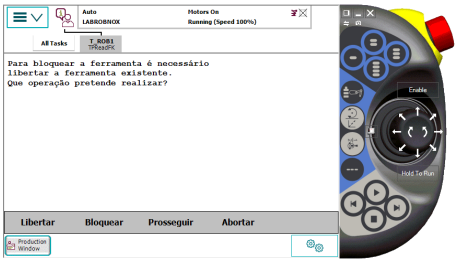
(a) Janela inicial da operação de troca de ferramenta



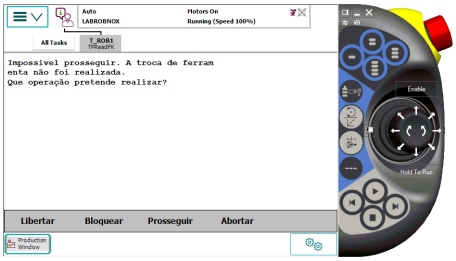
(b) Janela após libertar a ferramenta de forma correta



(c) Janela após bloquear a ferramenta de forma correta



(d) Janela após pedido para bloquear incorreto



(e) Janela após pedido para prosseguir incorreto

Figura 3.14: Gestão da troca de ferramenta na consola *FlexPendant*

Capítulo 4

Implementação na Célula Robótica

Este capítulo reporta a componente experimental realizada, que serve de suporte à maquinagem do tabuleiro. São apresentados os parâmetros de corte inerentes ao processo, a escolha do material a utilizar no seu fabrico, o procedimento experimental seguido e os casos de estudo realizados. São também apresentados os parâmetros utilizados e os tempos de maquinagem de cada operação, obtidos no ambiente de simulação do *software* Mastercam.

Por último, são analisados os resultados da maquinagem do tabuleiro enfatizando o acabamento obtido.

4.1 Processo de fresagem

Os processos de maquinagem por arranque de apara, caracterizam-se pela remoção de aparas por ação de uma ferramenta de corte, animada de movimentos de corte, avanço e penetramento, em relação à peça a maquinar [10]. O processo de maquinagem utilizado para obter o tabuleiro é a fresagem de topo. Para caracterizar este processo, são utilizados parâmetros de corte definidos em função do material a maquinar e das operações, de desbaste e acabamento, selecionadas.

4.1.1 Parâmetros de corte

Na figura 4.1 é possível observar a representação gráfica dos parâmetros de corte associados ao processo de fresagem de topo. A ferramenta realiza o corte de um volume de material de dimensões a_p (profundidade de corte axial) e a_e (profundidade de corte radial). A velocidade de corte (ν_c) define-se como a velocidade tangencial instantânea de um ponto na periferia da fresa, em relação à peça, e é calculada através da equação 4.1 [10].

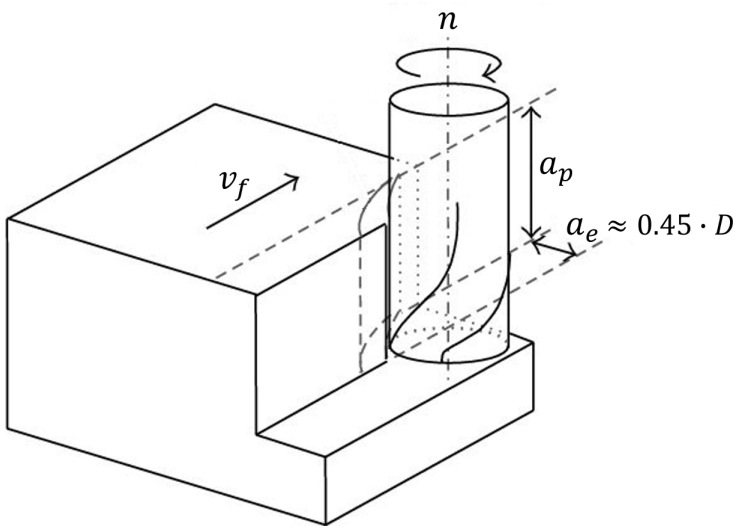


Figura 4.1: Parâmetros de corte do processo de fresagem
(adaptado de [11])

$$\nu_c\,[\text{m/min}] = \frac{\pi \cdot D\,[\text{mm}] \cdot n\,[\text{rpm}]}{1000} \tag{4.1}$$

Onde:

- D é o diâmetro da fresa e
- n é a velocidade de rotação da fresa.

A velocidade de avanço (ν_f), definida como a velocidade instantânea de um ponto sobre a aresta de corte, em relação à peça, é dada pela equação 4.2 [10].

$$\nu_f\,[\text{mm/min}] = n\,[\text{rpm}] \cdot Z \cdot f_z\,[\text{mm}] \tag{4.2}$$

Onde:

- Z é o número de dentes da fresa e
- f_z é o avanço por dente.

O valor da profundidade de corte axial (a_p), depende do material a maquinar e costuma variar entre 50% a 100% do valor do diâmetro da ferramenta utilizada, para a maquinagem de madeiras e plásticos [12].

Quanto à profundidade de corte radial (a_e), é utilizado 45% do diâmetro da ferramenta como valor *standard*, no entanto, este valor pode variar consoante a estratégia e geometria utilizada para desbaste [13].

O avanço por dente (f_z), equivalente à distância linear percorrida por um dente da ferramenta no intervalo, em que dois dentes consecutivos, entram em corte, varia consoante o material a maquinar e o diâmetro da ferramenta utilizada. Na tabela 4.1 é possível consultar valores médios em função do diâmetro da ferramenta utilizada, para diferentes materiais, segundo o fabricante do *spindle* [14].

Tabela 4.1: Valores médios do avanço por dente (f_z) para diferentes materiais, em função do diâmetro da ferramenta [14]

MATERIAL	CHIP LOAD FOR COMMON TOOL DIAMETERS (mm)			
	Ø 3mm	Ø 6mm	Ø 10mm	Ø 13mm and >
Hard Wood	0,08 - 0,13	0,23 - 0,28	0,41 - 0,46	0,48 - 0,54
Softwood/ Polywood	0,10 - 0,15	0,28 - 0,33	0,43 - 0,51	0,54 - 0,59
MDF	0,10 - 0,18	0,33 - 0,41	0,51 - 0,59	0,64 - 0,69
Composites	0,08 - 0,13	0,23 - 0,31	0,41 - 0,46	0,59 - 0,64
Phenolic	0,10 - 0,13	0,28 - 0,31	0,43 - 0,46	0,61 - 0,66
ABS Plastics	0,05 - 0,10	0,15 - 0,23	0,20 - 0,26	0,26 - 0,31
Soft Plastics	0,08 - 0,15	0,18 - 0,26	0,26 - 0,31	0,31 - 0,41
Solid Surface	0,05 - 0,10	0,15 - 0,23	0,20 - 0,26	0,26 - 0,31
Carbon Steel	0,08 - 0,13	0,20 - 0,26	0,26 - 0,31	0,31 - 0,41
Aluminium	0,08 - 0,13	0,13 - 0,18	0,15 - 0,20	0,20 - 0,26

Num processo de fresagem é ainda necessário definir a velocidade de entrada (*Plunge rate*) e velocidade de saída (*Retract rate*) da fresa no processo. A velocidade de entrada, geralmente, deverá ser menos de 50% da velocidade de avanço, de modo a não aquecer e danificar a ferramenta [13]. Quanto à velocidade de saída, não existe necessidade de uma redução do seu valor, uma vez que durante este movimento não existe remoção de material.

4.1.2 Fresagem em MDF

Para a produção do tabuleiro foi escolhido o MDF (*Medium-density fiberboard*). Este material é um derivado da madeira, produzido através de fibras lignocelulósicas e resinas sintéticas, sujeitas a pressão e calor.

Foi eleito este material, por oposição à madeira, porque apresenta características semelhantes como: homogeneidade, proporcionada pela distribuição uniforme de fibras, e estabilidade dimensional [1]. No entanto, torna-se mais vantajoso o seu uso, uma vez que o seu custo é menor e, dado que, é obtido através da compactação de partículas finas, não possui nós, vazios, nem sofre delaminação ou "lasca" tão facilmente. Estas características tornam-no um material bastante utilizado na indústria de mobiliário [15].

[1] Capacidade de manter as dimensões desejadas quando sujeito às condições ambientais.

É também um material menos exigente de maquinar, permite um avanço por dente maior, que o grupo das madeiras macias e, consequentemente, pode ser maquinado a velocidades de avanço superiores, diminuindo o tempo de produção. Oferece uma resistência ao corte menor, dado que a sua dureza é inferior, melhorando também o tempo de vida da ferramenta.

O MDF é também um dos materiais indicados no manual do spindle [4] como apto para maquinar, ao contrário, por exemplo, do grupo de madeiras duras, em que é aconselhado ter cuidados especiais durante a maquinagem, como foi referido em 2.1.

A utilização do MDF também tem algumas desvantagens que convém referir. Contém um produto químico, ureia-formol (*urea-formaldehyde*), nocivo para a saúde, logo, durante a sua maquinagem, têm de ser tomados os devidos cuidados para não inalar partículas. Como tem uma elevada porosidade, o MDF absorve facilmente água, alterando as suas dimensões e perdendo capacidade estrutural. Desta forma, visto que o produto a obter se destina a acomodar talheres, e os mesmos poderão conter água ou humidade, após a sua lavagem, é aconselhável envernizar o tabuleiro após a maquinagem.

Cálculo dos parâmetros de corte através da definição de velocidade de corte e avanço

Existem diferentes sugestões para os valores de velocidade de corte a utilizar para maquinar MDF. Na página *web* do laboratório de fabrico digital do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology* - MIT) [13] é sugerido o valor de 198 m/min, no *website* da *Shapeoko* [16], fabricante de máquinas CNC *open source*, é sugerido o valor de 315 m/min.

Através destes valores de velocidade de corte, é possível, utilizando a definição de velocidade de corte, equação 4.1, calcular a velocidade de rotação correspondente, quando utilizada uma ferramenta de 6 mm de diâmetro ($D = 6$ mm). Assim, para uma velocidade de corte de 198 m/min ($\nu_c = 198$ m/min), obtém-se o valor de cerca de 10 000 rpm para a velocidade de rotação do *spindle*.

$$198\,[\mathrm{m/min}] = \frac{\pi \cdot 6\,[\mathrm{mm}] \cdot n\,[\mathrm{rpm}]}{1000} \Leftrightarrow n \simeq 10\,000\,\mathrm{rpm}$$

Utilizando este valor de velocidade de rotação e substituindo na definição de velocidade de avanço, equação 4.2, para duas arestas de corte ($Z = 2$) e um avanço por dente médio de 0,37 mm ($f_z = 0{,}37$ mm), recorrendo à tabela 4.1 como referência, obtém-se um valor aproximado de velocidade de avanço de 7,4 m/min.

$$\nu_f\,[\text{mm/min}] = \frac{10\,000\,[\text{rpm}] \cdot 2 \cdot 0,37\,[\text{mm}]}{1000} \Leftrightarrow \nu_f \simeq 7,4\,\text{m/min}$$

Para uma velocidade de corte de 315 m/min ($\nu_c = 315$ m/min), é obtido o valor de cerca de 17 000 rpm para a velocidade de rotação do *spindle*,

$$315\,[\text{m/min}] = \frac{\pi \cdot 6\,[\text{mm}] \cdot n\,[\text{rpm}]}{1000} \Leftrightarrow n \simeq 17\,000\,\text{rpm}$$

e uma velocidade de avanço aproximada de 12,6 m/min.

$$\nu_f\,[\text{mm/min}] = \frac{17\,000\,[\text{rpm}] \cdot 2 \cdot 0,37\,[\text{mm}]}{1000} \Leftrightarrow \nu_f \simeq 12,6\,\text{m/min}$$

Os valores de velocidade de avanço e rotação, calculados nesta secção, serão utilizados como referência nos testes de maquinagem a realizar.

Influência dos parâmetros de corte na rugosidade da superfície

Na indústria de mobiliário, e mais concretamente no produto a obter nesta dissertação, a rugosidade da superfície final é um critério importante a ter em consideração, uma vez que superfícies irregulares reduzem a qualidade do produto final.

A rugosidade da superfície de produtos em madeira, ou derivados, dependem de vários fatores que podem estar relacionados, tanto com propriedades físicas do material, como com as condições de maquinagem. Entre as propriedades físicas, é de referir a densidade, teor de humidade e mistura de fibras. Quanto às condições de maquinagem, as forças de corte decorrentes dos parâmetros de maquinagem escolhidos e a ferramenta utilizada [17].

Tipicamente, verifica-se que a rugosidade diminui com o aumento da velocidade de rotação, diminuição da velocidade de avanço e diminuição da profundidade de corte radial. Diferentes estudos referem valores semelhantes para as velocidades de rotação e de avanço, que resultam numa menor rugosidade superficial em peças de MDF, obtidas através de maquinagem. Numa investigação [15] da influência dos parâmetros de corte na qualidade de peças em MDF, obtidas por maquinagem, demonstrou-se que os menores valores de rugosidade ocorreram a uma velocidade de rotação de 12 000 rpm e 16 000 rpm, combinadas com uma velocidade de avanço de 2 m/min. Num outro estudo [18] da variação da rugosidade superficial, em operações de maquinagem de MDF, em função da velocidade de rotação, para diferentes velocidades de avanço,

onde foi utilizado uma fresa de 8 mm de diâmetro (FREZITE - A101.008.120.10) (figura 4.2), é possível concluir que os menores valores de rugosidade superficial foram atingidos a velocidade de avanço de 0,5 m/min e a uma velocidade de rotação de 18 000 rpm.

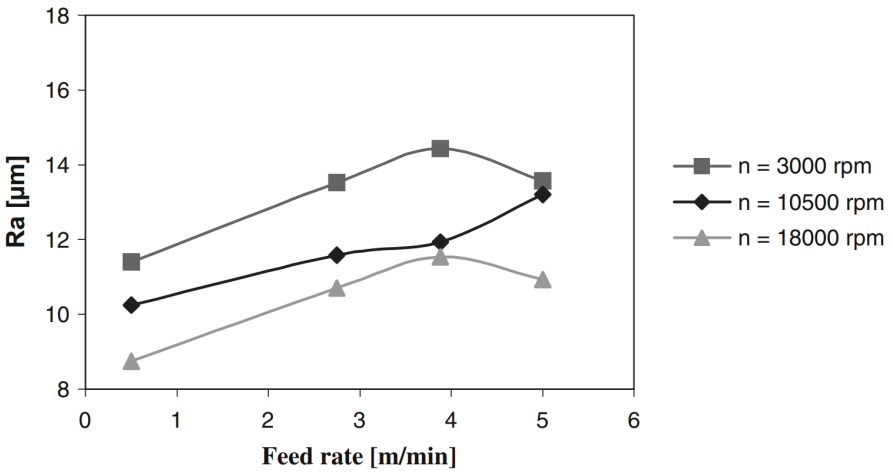


Figura 4.2: Variação da rugosidade superficial, em operações de maquinagem de MDF, em função da velocidade de rotação, para diferentes velocidades de avanço [18]

Quanto à profundidade de corte axial, verificou-se que o parâmetro não tem uma influência significativa na rugosidade da superfície, quando utilizados valores entre 0,5 mm e 1,5 mm [15]. Quando utilizados valores superiores (2 mm a 6 mm [17]) e (4 mm e 6 mm [19]), já é possível notar a influência do parâmetro, decorrente das diferentes densidades das camadas do MDF, concluindo-se que a rugosidade diminui com a diminuição da profundidade de corte. Porém, a influência nos valores da rugosidade, não é muito significativa [19].

4.2 Procedimento

Antes de iniciar o procedimento de maquinagem, é necessário verificar se todo o material necessário se encontra disponível. Nos processos realizados, foram utilizadas duas ferramentas, uma fresa plana de 6 mm de diâmetro, e uma fresa boleada de igual diâmetro. É necessário um bloco do material a maquinar e equipamento para a sua fixação. Dado o pó produzido no processo, é necessário material de proteção respiratória e um sistema de aspiração. É de destacar ainda a utilização de barreiras físicas para a proteção do operador e para diminuição da projeção do pó, e a utilização de uma câmara para realizar *streaming* do vídeo do processo, em tempo real, permitindo a observação num local seguro.

Para além do material físico, é necessário editar o programa RAPID, obtido com o Robotmaster, para incluir as rotinas para controlo do *spindle* e troca de ferramenta. É também necessário, redefinir o referencial da peça, face à posição final, que o bloco a maquinar ocupará na célula robótica.

A fim de facilitar o *upload* e edição do programa RAPID, o controlador do robô é ligado a um computador através de uma ligação *Ethernet*, tirando partido das funcionalidades disponíveis no *software* RobotStudio.

Uma vez transferida a informação necessária para a memória do controlador, o programa foi executado utilizando o modo automático de operação.

4.2.1 Definição do referencial do bloco a maquinar

A definição do sistema de coordenadas da peça a maquinar, passa pela utilização da instrução *workobject* disponível na linguagem RAPID.

O *workobject* representa a localização de uma peça de trabalho, sendo definido por dois sistemas de coordenadas: *User frame* e *Object frame* (ver figura 4.3), onde o segundo é definido relativamente ao primeiro. O uso de um *workobject* é fundamental, pois na programação das trajetórias do robô, que requerem a definição das localizações a visitar, *targets*, estes são definidos em relação a um *workobject*.

Assim, no reposicionamento da peça a maquinar no espaço de trabalho, é apenas necessário redefinir a localização do *workobject*.

Para definir o referencial do bloco a maquinar, *workobject*, é utilizado o robô com o *spindle* montado e com uma ferramenta, cujo referencial é conhecido e se encontra selecionado na consola.

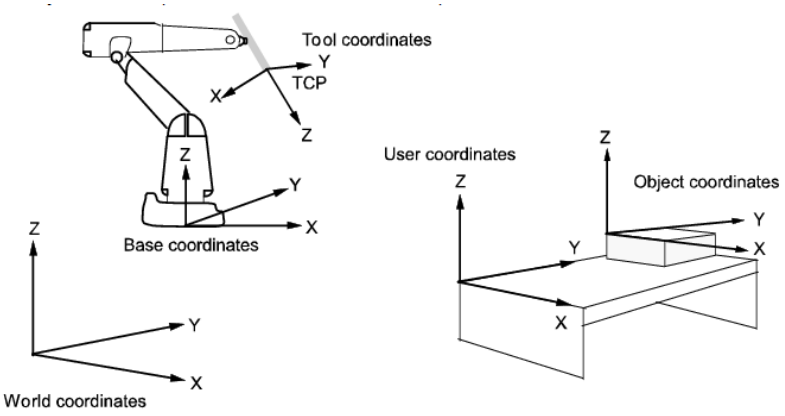
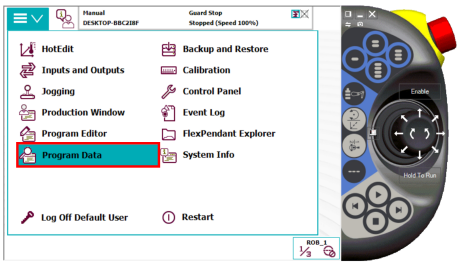
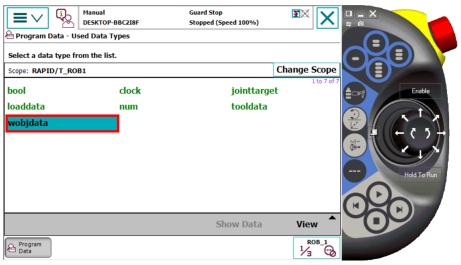


Figura 4.3: Sistemas de coordenadas utilizados na programação do robô

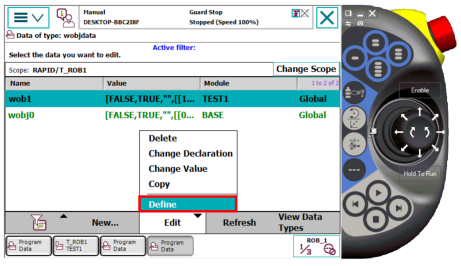
O referencial da peça é definido pelo método dos "três pontos" (figura 4.4), devendo mover-se o robô para dois pontos do eixo x e um ponto do eixo y, do referencial pretendido, correspondente ao que foi definido no ambiente de programação do Robotmaster. De modo a facilitar este processo, o referencial utilizado situa-se no centro geométrico da superfície de topo do bloco a maquinar, com a orientação conforme a da figura 4.5.



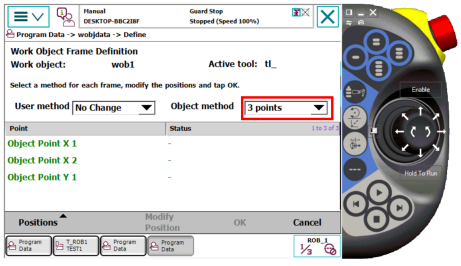
(a) Aceder ao menu principal e selecionar *Program Data*



(b) Selecionar *wobjdata* para aceder aos dados dos *workobjects*



(c) Criar ou editar o *workobject*, e esolher a opção *Edit - Define*



(d) Selecionar o método de definição *3 points*

Figura 4.4: Definição do *workobject* na consola *FlexPendant*

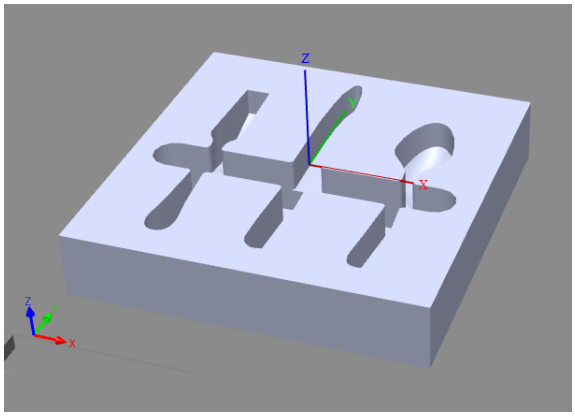


Figura 4.5: Referencial do bloco a maquinar para produção do tabuleiro

4.3 Testes de maquinagem

Antes da realização do produto final, foram realizados testes em distintos materiais. Numa fase inicial, para familiarização com o método experimental, recorreu-se a espumas para testar as operações de maquinagem. Posteriormente, foram realizados testes no mesmo material do produto final, no sentido de explorar a utilização de diferentes parâmetros de corte.

4.3.1 Testes de maquinagem em espumas

Foram realizados dois testes, em dois tipos de espumas rígidas, espuma de poliuretano expandido e espuma de poliestireno extrudido (XPS) (figura 4.6), para validar os procedimentos definidos e testar estratégias de maquinagem, semelhantes às definidas para o tabuleiro.

Numa segunda fase, foi maquinado um tabuleiro completo. Foram utilizadas as duas ferramentas referidas, realizadas as operações de desbaste e acabamento, tendo apenas sido ajustados os parâmetros de corte, considerando o material utilizado. Os parâmetros de corte usados são apresentados na tabela 4.2.

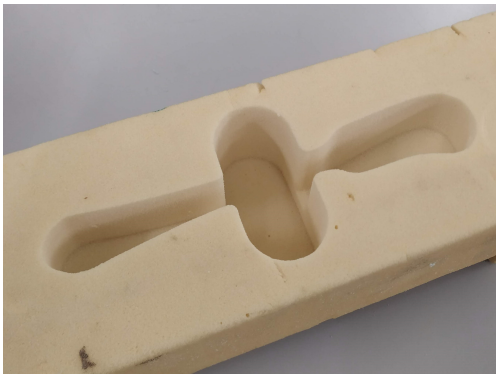
Os resultados dos primeiros testes são apresentados na figura 4.6. Verificou-se que a espuma de poliuretano expandido era a mais indicada, pois na espuma XPS, não era possível remover todo o material das paredes da cavidade, obtendo-se um acabamento pior. Avaliaram-se os resultados obtidos, e aferiu-se que esta situação, era uma consequência da natureza do próprio material e não da ferramenta ou parâmetros de corte utilizados.

Tabela 4.2: Parâmetros de corte utilizados na maquinagem do tabuleiro em espuma

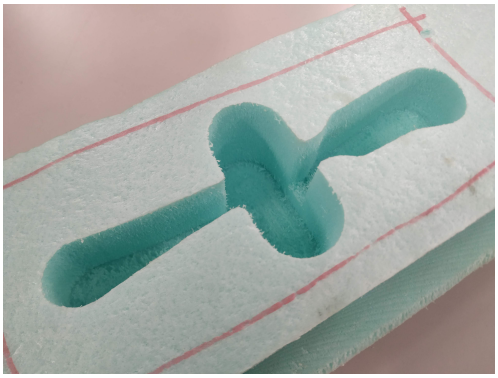
Parâmetros de corte	**Operação 1 Desbaste**	**Operação 2 Acabamento**	**Operação 3 e 4 Acabamento**
Velocidade de entrada [m/min]	1	1	1
Velocidade de saída [m/min]	3	3	3
Velocidade de rotação [rpm]	10 000	10 000	10 000
Velocidade de avanço [m/min]	2,7	2,7	2,7
Profundidade de corte axial [mm]	4	4	-
Profundidade de corte radial [mm]	4,5 (75%)	-	1,2
Espessura para acabamento [mm]	1	-	-
Tempo	11min 43s	4min 17s	2min 14s

Também se conclui, após este teste, que o uso de uma cavidade individual para cada talher não era uma boa opção, dado não existir espaço suficiente para remover um talher com dois dedos de forma prática. Optou-se então, por executar no protótipo do tabuleiro, uma cavidade única e mais funda para remover os distintos talheres, existindo mais espaço para a recolha dos mesmos.

Na figura 4.7 é possível observar o resultado da maquinagem do tabuleiro. Após a realização deste protótipo, foi possível confirmar que o modelo CAD definido garante um bom ajuste do talher à cavidade e experimentar a utilização do tabuleiro, onde se verificou ser prática a inserção e remoção dos talheres.



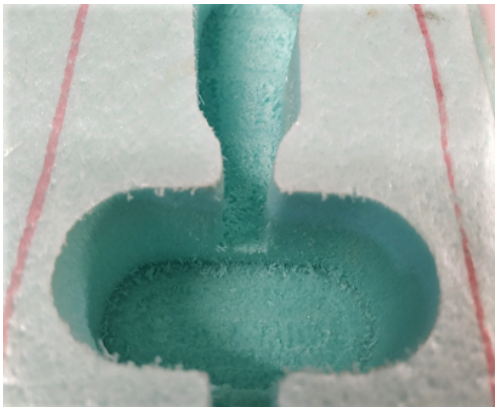
(a) Teste de maquinagem em espuma de poliuretano expandido



(b) Teste de maquinagem em espuma XPS



(c) Acabamento superficial na maquinagem em espuma de poliuretano expandido



(d) Acabamento superficial na maquinagem em espuma XPS

Figura 4.6: Testes de maquinagem em espumas



(a) Protótipo sem talheres



(b) Protótipo com talheres

Figura 4.7: Protótipo do tabuleiro em espuma

4.3.2 Testes de maquinagem em MDF

Os testes de maquinagem em MDF envolvem a maquinagem de três percursos lineares e de um bloco constituído por oito cavidades, no sentido de investigar a influência de diferentes parâmetros de corte no acabamento das superfícies obtidas e na precisão do processo.

Teste de maquinagem de percursos lineares

Realizou-se um teste de maquinagem de percursos lineares, cujos resultados podem ser vistos na figura 4.8. Os parâmetros de corte utilizados são referidos na tabela 4.3. Neste teste foram maquinadas três linhas retas, a três velocidades de avanço distintas, utilizando a mesma ferramenta e a mesma velocidade de rotação.



Figura 4.8: Teste de maquinagem de percursos lineares

Tabela 4.3: Parâmetros de corte utilizados no teste de maquinagem de percursos lineares em MDF

Percurso	**Velocidade de rotação [rpm]**	**Velocidade de avanço [m/min]**
1	16 000	0,6
2	16 000	1,2
3	16 000	1,8

Nos percursos realizados, figura 4.8, a velocidade de avanço aumenta, com a ordem numérica (de cima para baixo). Desta forma, é possível concluir que com o aumento da velocidade de avanço, existe uma melhoria no acabamento das superfícies obtidas. De referir que o escurecimento da superfície obtida no percurso número 1, resulta da queima de apara, dado que se observou a formação de fumos neste percurso.

Teste de maquinagem de cavidades

Tendo por referência a informação apresentada na secção 4.1.2, foi decidido maquinar oito cavidades, com uma dimensão de 45 mm × 35 mm e profundidade de 40 mm, num bloco de MDF (figura 4.9), tendo sido utilizados os parâmetros de corte apresentados na tabela 4.4.

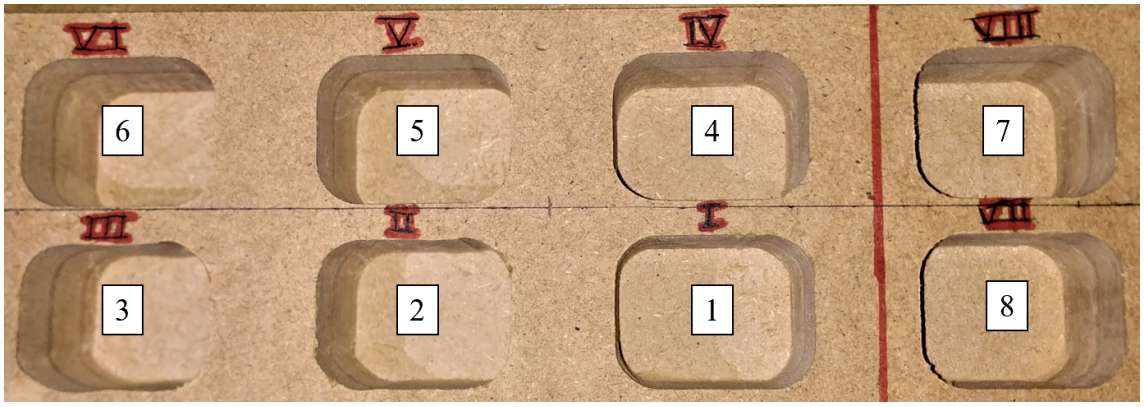


Figura 4.9: Teste de maquinagem de cavidades em MDF

Inicialmente, realizaram-se três cavidades (cavidades número 1, 2 e 3 da figura 4.9), a uma velocidade de rotação da ferramenta fixa, de 16 000 rpm, e aumentou-se a velocidade de avanço a cada cavidade. Verificou-se que o aumento da velocidade de avanço, induziu uma menor precisão dimensional na maquinagem da cavidade. Pode-se aferir, após esta maquinagem, que a velocidade de avanço de 2 m/min permite obter uma cavidade com a forma e dimensões programadas, assim como um bom acabamento superficial. É também de referir, que a velocidade de 10 m/min provoca movimentos bruscos no braço robótico, quando maquinadas cavidades destas dimensões, induzindo vibrações elevadas.

Tabela 4.4: Parâmetros de corte utilizados no teste de maquinagem de cavidades em MDF

Cavidade	**Velocidade de rotação [rpm]**	**Velocidade de avanço [m/min]**	**Profundidade de corte axial [mm]**
1	16 000	2	4
2	16 000	6	4
3	16 000	10	4
4	10 000	2	4
5	10 000	1	4
6	16 000	1	4
7	16 000	1	4
8	16 000	1	6

De seguida, realizaram-se as cavidades número 4, 5 e 6. Comparando estas três cavidades e cavidade número 1, é possível obter as quatro combinações possíveis, entre velocidades de avanço de 1 m/min e 2 m/min, e velocidades de rotação de 10 000 rpm e 16 000 rpm. Desta comparação, é possível concluir que, quer ao nível do acabamento superficial obtido (rugosidade da superfície obtida), quer a nível da forma e dimensão da cavidade, não existem diferenças significativas para a aplicação em causa.

A maquinagem das cavidades número 7 e 8 pretende analisar a influência da profundidade de corte no processo. Estas duas cavidades foram realizadas às mesmas velocidades de rotação e avanço ($n = 16\ 000$ rpm e $v_f = 1$ m/min), mas a profundidades de corte distintas (4 e 6 mm). Comparando o resultado das duas maquinagens, não existem diferenças significativas.

4.4 Maquinagem do produto final

Após a análise dos resultados obtidos nos testes de maquinagem, foi possível selecionar os parâmetros de corte para a realização do produto final. Os parâmetros utilizados são referidos na tabela 4.5. Foi utilizado um bloco de MDF de 250 mm × 250 mm × 48 mm (comprimento × largura × altura), obtido através da colagem de tábuas de 16 mm de espessura.

Foi escolhida uma velocidade de rotação de 10 000 rpm, uma vez que velocidades de rotação inferiores provocam menos vibrações da ferramenta e menos aquecimento da mesma, contribuindo para um melhor acabamento e prolongamento do seu tempo de vida. A velocidade de avanço selecionada foi 2 m/min e a profundidade de corte axial foi 4 mm (67% do diâmetro da ferramenta utilizada).

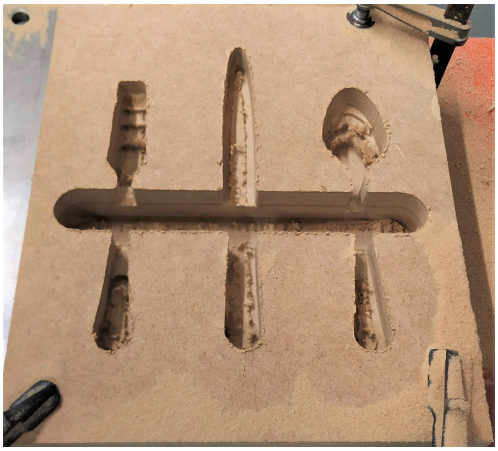
Na figura 4.10 é possível observar o resultado das diferentes operações de maquinagem. O programa utilizado é apresentado no anexo D.1. No final de cada uma das operações, foi realizada a aspiração da apara existente na peça para obtenção das fotografias apresentadas.

Tabela 4.5: Parâmetros de corte utilizados na maquinagem do tabuleiro em MDF

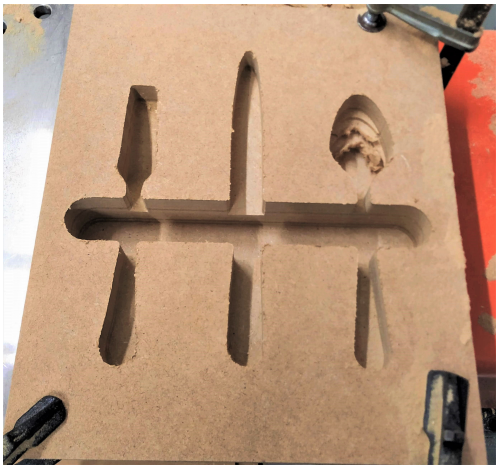
Parâmetros de corte	**Operação 1 Desbaste**	**Operação 2 Acabamento**	**Operação 3 e 4 Acabamento**
Velocidade de entrada [m/min]	1	1	1
Velocidade de saída [m/min]	2	2	2
Velocidade de rotação [rpm]	10 000	10 000	10 000
Velocidade de avanço [m/min]	2	2	2
Profundidade de corte axial [mm]	4	4	-
Profundidade de corte radial [mm]	3 (50%)	-	1,2
Espessura para acabamento [mm]	1	-	-
Tempo	17min 53s	5min 52s	5min 15s



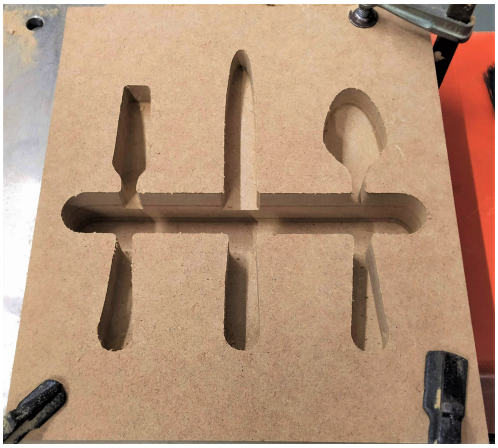
(a) Resultado após a primeira operação de maquinagem



(b) Resultado após a segunda operação de maquinagem



(c) Resultado após a terceira operação de maquinagem



(d) Resultado final (após a aquarta operação de maquinagem)



(e) Resultado final com os talheres colocados

Figura 4.10: Resultados das diferentes operações de maquinagem do tabuleiro em MDF

4.5 Análise de resultados

O tabuleiro obtido oferece uma boa rigidez estrutural, adequada à aplicação em causa. É aconselhável o seu revestimento com um verniz impermeabilizante, não tóxico, indicado para utensílios de cozinha, porque, como referido anteriormente, devido à porosidade do MDF, o mesmo absorve água, com a qual poderá entrar em contacto durante a aplicação em questão. Além disso, o verniz proporcionará um acabamento esteticamente mais apelativo e impede o contacto dos talheres com o MDF, o qual contém componentes tóxicos.

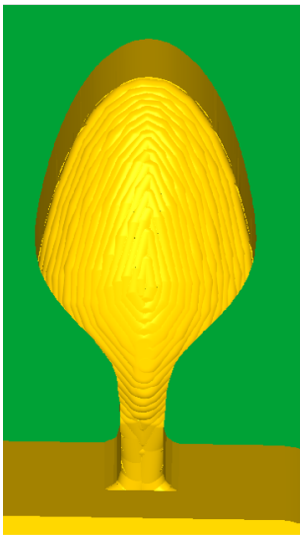
O acabamento superficial foi uma questão importante e referida múltiplas vezes neste capítulo. Ao observar a fotografia da figura 4.11, é possível concluir que se obteve um bom acabamento superficial. A superfície resultante é também agradável ao toque. De realçar a existência de uma aresta viva na superfície de topo, que deverá ser removida através de lixagem.



Figura 4.11: Detalhe do acabamento obtido

Comparando o modelo obtido nas simulações quando utilizado o modo de simulação *Verify* do Mastercam, com o objeto resultante da maquinagem, o acabamento superficial apresentado na simulação não corresponde ao verdadeiro acabamento da superfície, efetuando uma previsão errada. Esta afirmação é comprovada nas figuras 4.12 e 4.13, onde é feita uma comparação entre o acabamento da superfície das cavidades para alojamento de dois tipos de talheres, obtidas na simulação em causa, com o acabamento obtido após a maquinagem em espuma de poliuretano expandido e em MDF.

No caso da cavidade utilizada para a colher, figura 4.12, imagem (b), as marcas da passagem da ferramenta na superfície, apenas foram visíveis na maquinagem em espuma, como é observável na aresta do lado esquerdo.



(a) Acabamento da superfície da cavidade da colher simulado no Mastercam



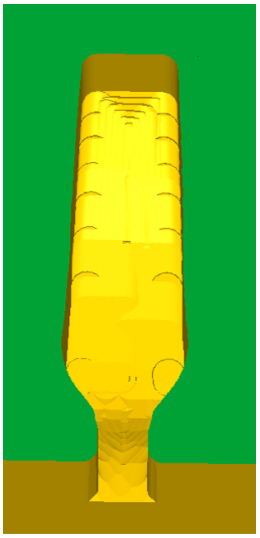
(b) Acabamento da superfície da cavidade da colher maquinada em espuma



(c) Acabamento da superfície da cavidade da colher maquinada em MDF

Figura 4.12: Comparação dos acabamentos obtidos, na superfície da cavidade da colher, no ambiente de simulação do Mastercam, na maquinagem em espuma e na maquinagem em MDF

No caso da cavidade utilizada para o garfo, figura 4.13, imagem (c), no produto obtido em espuma, não existem marcas semelhantes às ilustradas na simulação. Todavia na maquinagem em madeira é possível observar junto à aresta do lado direito, três marcas similares às obtidas na simulação.



(a) Acabamento da superfície da cavidade do garfo simulado no Mastercam



(b) Acabamento da superfície da cavidade do garfo maquinada em espuma

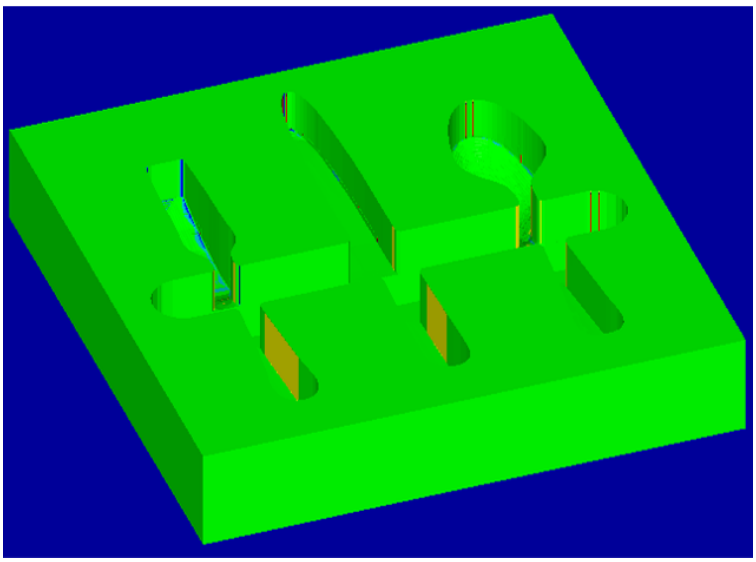


(c) Acabamento da superfície da cavidade do garfo maquinada em MDF

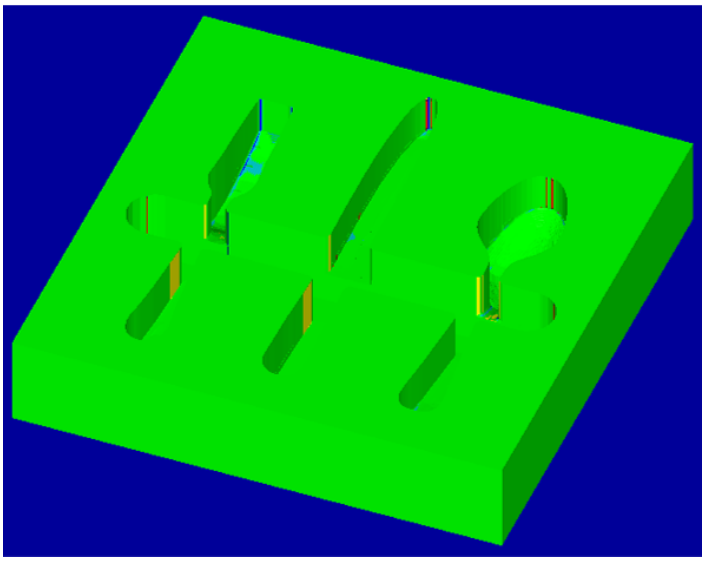
Figura 4.13: Comparação dos acabamentos obtidos, na superfície da cavidade do garfo, no ambiente de simulação do Mastercam, na maquinagem em espuma e na maquinagem em MDF

Para comparar as dimensões esperadas após a maquinagem, com as dimensões declaradas no modelo CAD prévio, foi utilizado a opção *Verify* do Mastercam, que permite a comparação entre os dois modelos. Na figura 4.14 é possível observar a comparação visual destes valores através de um código de cores. Cada cor corresponde a um valor de espessura de material, sendo que os valores positivos correspondem a sobre-espessuras e os negativos a material removido em excesso. Foi escolhida uma resolução 0,25 mm, como é observável na imagem (c) da figura 4.14.

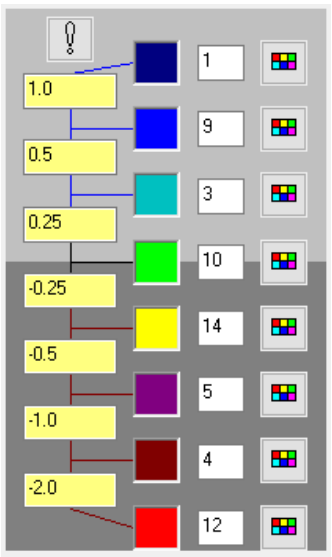
Ao analisar a imagem é possível concluir que a simulação prevê um resultado bastante satisfatório. Apenas é de realçar a existência de algumas zonas azuis claras e amarelas, correspondentes ao intervalo entre 0,25 e 0,5 mm de sobre-espessura e material removido em excesso, respetivamente, sendo este intervalo de valores insignificante para a aplicação.



(a) Comparação visual entre os dois modelos - perspetiva 1



(b) Comparação visual entre os dois modelos - perspetiva 2



(c) Código de cores utilizado na construção da imagem

Figura 4.14: Comparação das dimensões obtidas após a simulação da maquinagem, com as dimensões do modelo CAD, utilizado para a definição dos percursos de maquinagem

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

A aplicação de robôs industriais, equipados de uma ferramenta de corte para operações de maquinagem, é uma solução de interesse e com bastante potencial quando os requisitos dimensionais impostos não são muito exigentes. A procura por produtos sofisticados e personalizados, onde é dada a oportunidade ao cliente de escolher as características do produto pretendido, tem vindo a ganhar importância, especialmente na utilização de materiais como as madeiras e os seus derivados, no ramo de aplicações de mobiliário, a partir dos quais é possível obter resultados inovadores, com boas características mecânicas e estéticas apelativas.

O processo descrito neste documento revela uma alternativa de produção de tabuleiros costumizados, onde cada cliente poderá obter um produto diferente e segundo as suas necessidades e desejos. É um processo flexível, que permite obter as mais variadas formas. Nesta dissertação, não foi explorada a aplicação da maquinagem em cinco eixos, mas através do processo descrito poderá ser aplicada, uma vez que o *software* e *hardware* apresentado suportam esta técnica. Ao incluir a maquinagem de cinco eixos, os produtos possíveis de obter serão ainda mais complexos e requintados, abrindo portas à criatividade na conceção do produto. Quanto à escolha das ferramentas a utilizar, esta foi limitada às existentes no laboratório, no entanto, a introdução de distintas ferramentas no processo também é uma variável a considerar, que permitirá novos resultados.

O desenvolvimento das diferentes fases de produção do produto, revelou-se desafiante e enriquecedor. Por um lado, para a compreensão do sistema descrito, foram aplicados e adquiridos diversos conhecimentos, desde a perceção da arquitetura do sistema de controlo, com variados tipos de ligações e integração de equipamentos,

à análise e resolução de problemas quer da programação do autómato, quer do circuito elétrico implementado, assim como a compreensão da integração do circuito pneumático no sistema.

Por outro lado, a aprendizagem ganha na utilização de diferentes tipos de *software*, que permitem a conceção do produto, a definição e programação da estratégia de produção e a sua simulação, torna-se uma competência adquirida importante para o futuro.

Relativamente aos diversos ambientes de simulação do processo de maquinagem apresentados, Mastercam, Robotmaster e RobotStudio, é importante apresentar conclusões em relação à utilidade de cada um.

A simulação no Mastercam é a primeira a ser utilizada, recorreu-se a duas opções, modo *Verify* e modo *Backplot*. São importantes para observar a interação entre a ferramenta e o bloco a maquinar, permitindo analisar sequencialmente as operações a realizar e os percursos de maquinagem definidos. De realçar, o modo *Verify* permitir acompanhar, à velocidade desejada, a remoção do material, a comparação do modelo final obtido, pós-maquinagem, com o definido inicialmente e a função de verificar os tempos de cada operação do modo *Backplot*.

Quanto ao modo de simulação do Robotmaster, permite, uma vez gerado o código RAPID a implementar no robô, acompanhar as diferentes etapas do processo, visualizando as diferentes configurações utilizadas pelo robô. Desta forma, é utilizado como validação do código gerado anteriormente.

O modo de simulação do RobotStudio, é utilizado na fase final de simulação, onde se desenvolve o módulo principal a implementar no robô. Permite a simulação mais próxima da realidade, observando a interação do robô com os distintos elementos da estação e prevenindo colisões com os mesmos. Através da função *TCP Trace*, é possível observar os percursos de maquinagem, porém a precisão dos mesmos é inferior à que se consegue obter no modo *Backplot* do Mastercam.

Para terminar, apesar dos métodos de simulação utilizados constituírem uma validação adequada, e não terem sido detetados erros nos percursos de maquinagem após a sua aprovação, a testagem experimental dos mesmos em espumas de poliestireno expandido, revelou-se uma boa prática. Uma vez que é um material seguro de maquinar, permite uma observação próxima, sem correr perigos de danificar a ferramenta, caso ocorra uma colisão com o bloco a maquinar. Trata-se de um material com uma boa coesão, que permite obter uma boa aproximação ao acabamento esperado.

5.2 Trabalhos futuros

Após a conclusão deste projeto, existem algumas sugestões de trabalhos futuros a realizar, na mesma célula robótica, que darão continuidade ao trabalho desenvolvido.

Em primeiro lugar, durante a maquinagem de MDF, dada a natureza do material, ocorre a formação de um grande volume de pó. Este pó é tóxico e deve ser aspirado da forma mais eficiente possível. O método utilizado para a remoção dos mesmos foi a utilização de um aspirador doméstico comum. Surge então a necessidade de desenvolver um sistema de aspiração mais eficiente, para utilizar nesta célula, em processos de maquinagem.

Por um lado, dado o sucesso obtido na maquinagem em MDF, surge a motivação para a aplicação do processo em materiais diferentes, por exemplo, outros derivados de madeira, como o aglomerado de madeira, OSB ou contraplacado, e até mesmo, em madeiras macias ou duras, desta forma, pode-se obter diferentes resultados visuais e estruturais.

Por outro lado, não foi considerado como um objetivo desta dissertação a otimização dos tempos de maquinagem. Para uma produção mais eficiente, será interessante avaliar a influência da diminuição dos tempos de maquinagem nos resultados obtidos.

Para finalizar, foi implementada uma troca de ferramenta semi-automática, assistida manualmente. Uma vez que, para os porta-pinças utilizados nas ferramentas enunciadas, HSK-E32 (norma DIN 69893-5), é possível adquirir suportes de fixação, é sugerido, por último, a aquisição dos mesmos para uma maior automatização do processo.

Referências

[1] International Federation of Robotics. URL `https://ifr.org/news/top-5-robot-trends-2021/`. Acedido a 25/06/2021.

[2] Wei Ji and Lihui Wang. Industrial robotic machining: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(1):1239–1255, 2019.

[3] Irb 2400 the most popular industrial robot. URL `https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-2400`. Acedido a 25/06/2021.

[4] PDS Precision Drive systems LLC. *XLC-070 XLA-070 Automatic Tool Change Spindle Operation Manual*.

[5] Fábio Castro. Conceção e instalação de um controlador de um spindle para integração em célula robótica. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

[6] RobotStudio (2021.1.1). *Operating manual*. Document ID: 3HAC032104-00. ABB.

[7] RobotWare OS (6.08.01.00). *Robotstudio Documentation - RAPID Instructions, Functions and Data Types*. Document ID: 3HAC050917-001. ABB.

[8] Mastercam X5 MU1 (14.2.2.34). *Mastercam Help*.

[9] Luis Oliveira. Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

[10] Abílio Jesus. *Fundamentos do Corte: Teoria e Exercícios*. Publicações Didáticas. Universidade do Porto, set 2019. ISBN 978-972-752-245-3.

[11] Yongfeng Hou, Dinghua Zhang, Ming Luo, and Baohai Wu. A cutting parameters selection method in milling aero-engine parts based on process condition matching. *Advances in Mechanical Engineering*, 5:157343, 2013. doi: 10.1155/2013/157343.

[12] Stepcraft - milling parameters. URL https://www.stepcraft-systems.com/en/services/milling-parameters. Acedido a 25/06/2021.

[13] Fablab speed and feeds calculator. URL https://pub.pages.cba.mit.edu/feed_speeds/. Acedido a 25/06/2021.

[14] PDS - Spindle RPM and Feed Rate Calculations. URL https://www.pdsspindeln.de/en/application-data/speed-feeds. Acedido a 25/06/2021.

[15] Priscila Roel De Deus, Manoel Cleber de Sampaio Alves, and Fabio Henrique Antunes Vieira. The quality of mdf workpieces machined in cnc milling machine in cutting speeds, feedrate, and depth of cut. *Meccanica*, 50(12):2899–2906, 2015. doi: 10.1007/s11012-015-0187-z.

[16] Shapeoko - materials. URL https://wiki.shapeoko.com/index.php/Materials. Acedido a 25/06/2021.

[17] Abdullah Sütcü and Ümmü Karagöz. Effect of machining parameters on surface quality after face milling of mdf. *Wood Res*, 57(2):231–240, 2012.

[18] J Paulo Davim, VC Clemente, and Sérgio Silva. Surface roughness aspects in milling mdf (medium density fibreboard). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1-2):49–55, 2009. doi: 10.1007/s00170-007-1318-z.

[19] Ümmü K İşleyen and Mehmet Karamanoğlu. The influence of machining parameters on surface roughness of mdf in milling operation. *BioResources*, 14 (2):3266–3277, 2019. doi: 10.15376/biores.14.2.3266-3277.

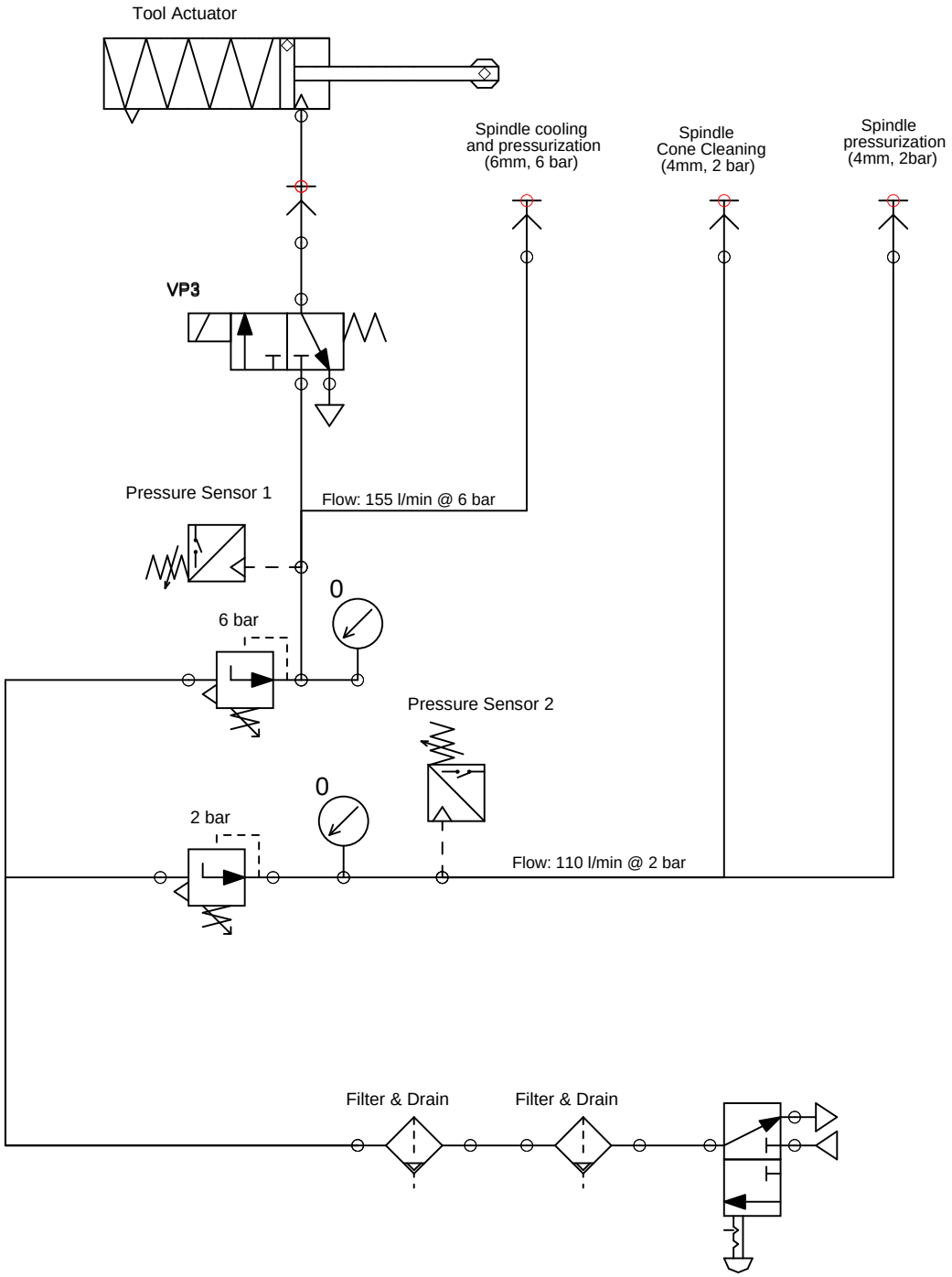
Anexos

Anexo A

Circuitos da Instalação

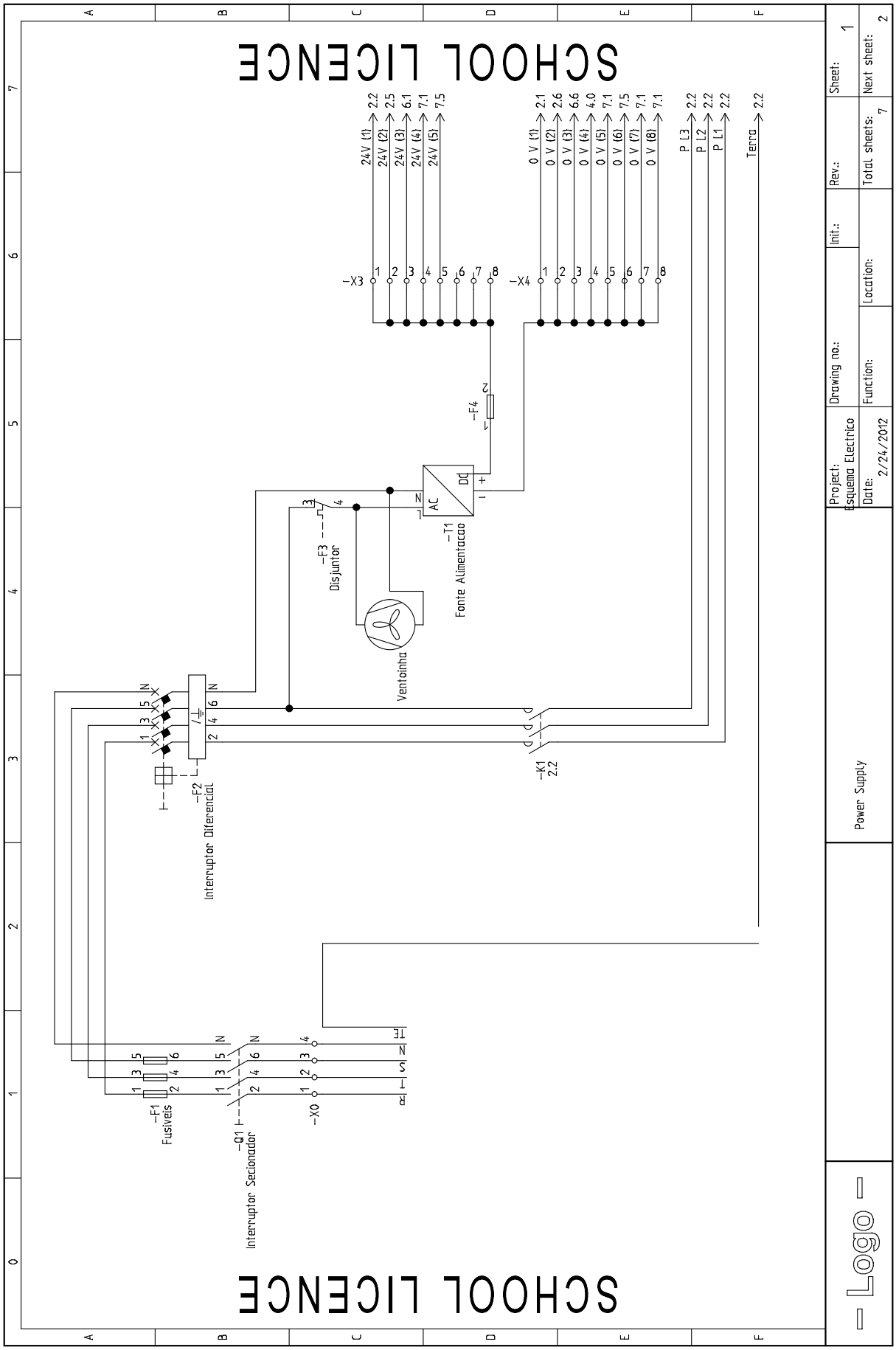
A.1 Circuito pneumático

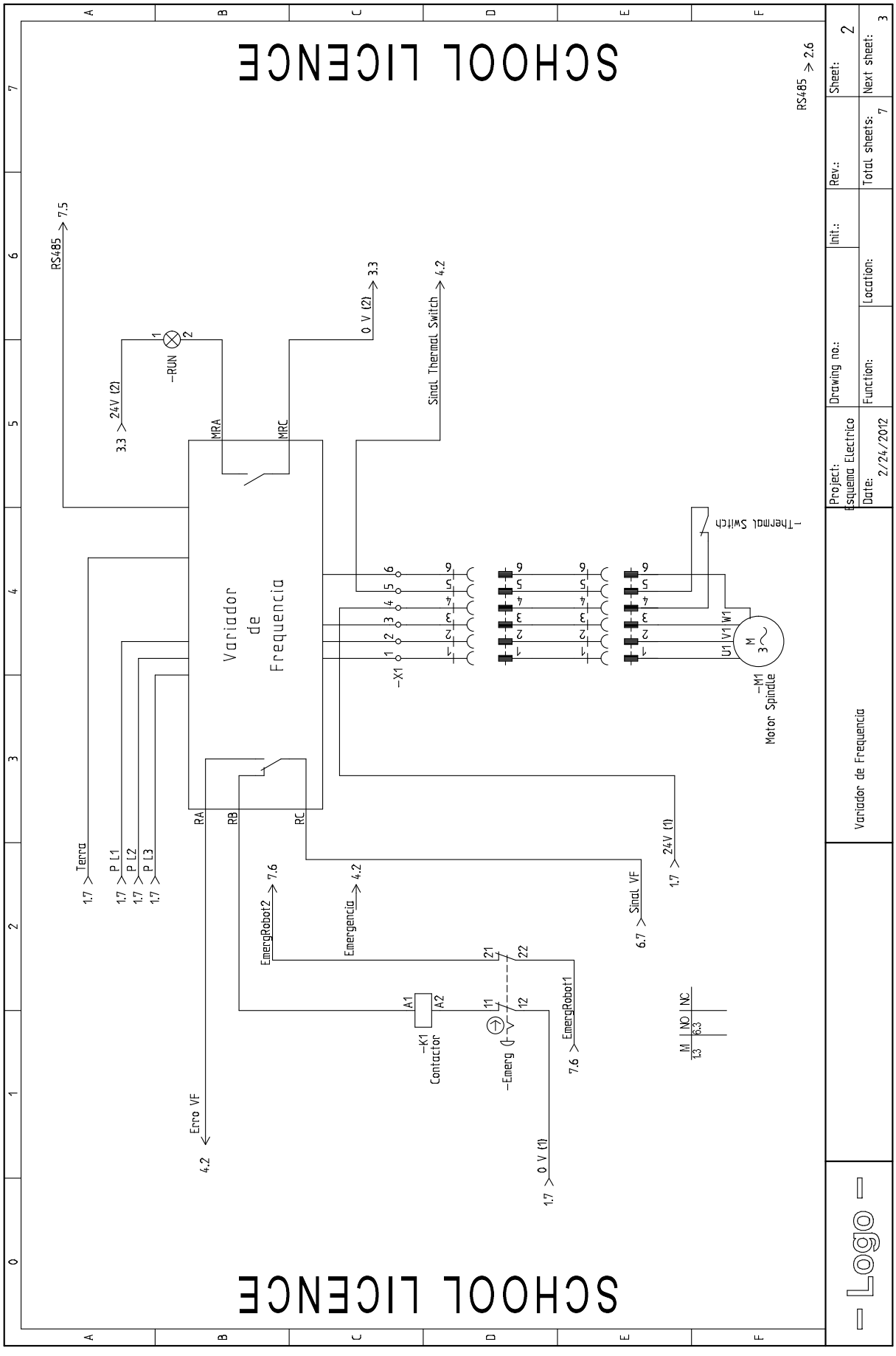
(Consultar na próxima folha)

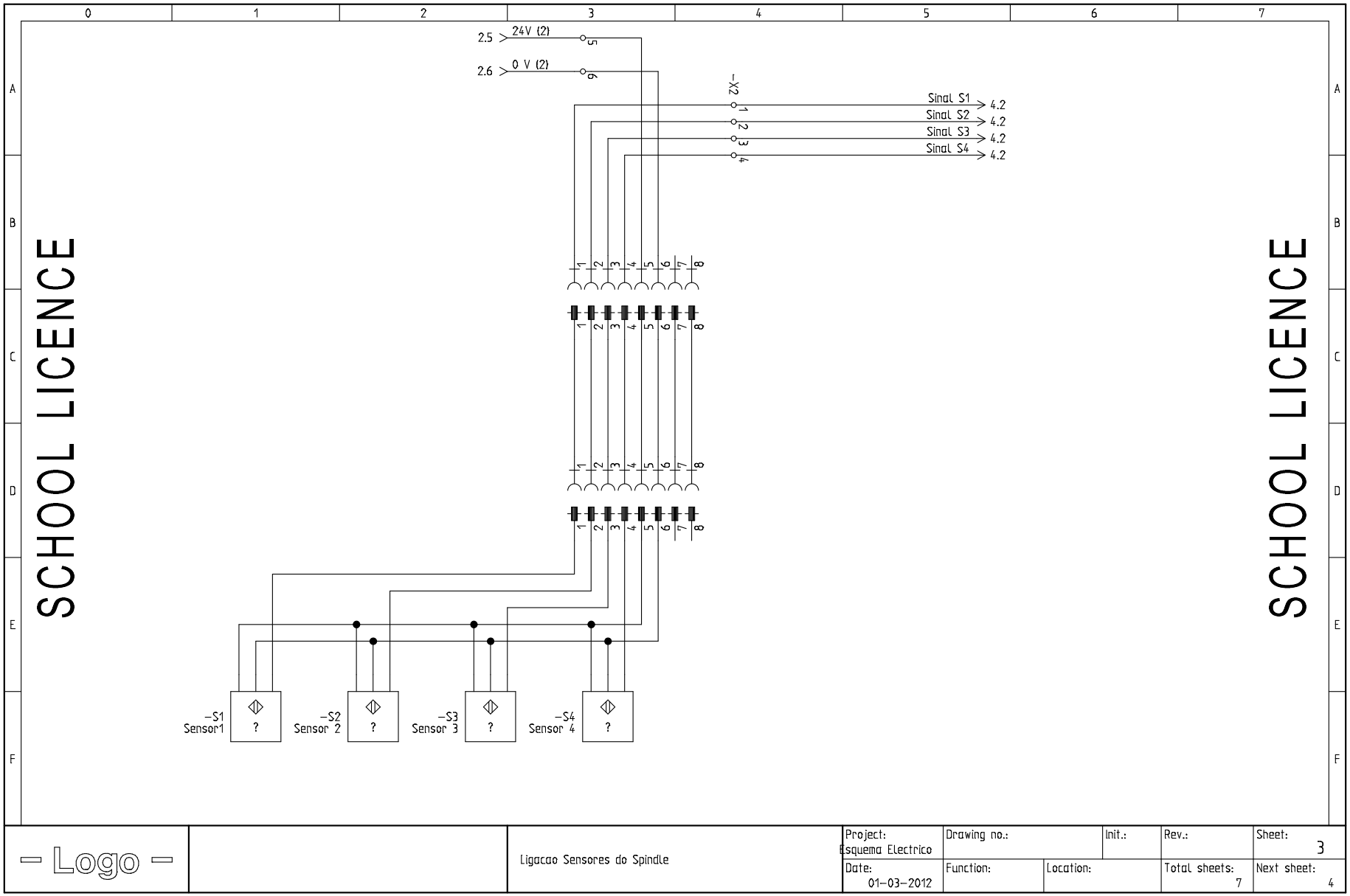

Tool Actuator
Spindle cooling
and pressurization
(6mm, 6 bar)
Spindle
Cone Cleaning
(4mm, 2 bar)
Spindle
pressurization
(4mm, 2bar)
VP3
Pressure Sensor 1
Flow: 155 l/min @ 6 bar
0
6 bar
Pressure Sensor 2
0
2 bar
Flow: 110 l/min @ 2 bar
Filter & Drain
Filter & Drain

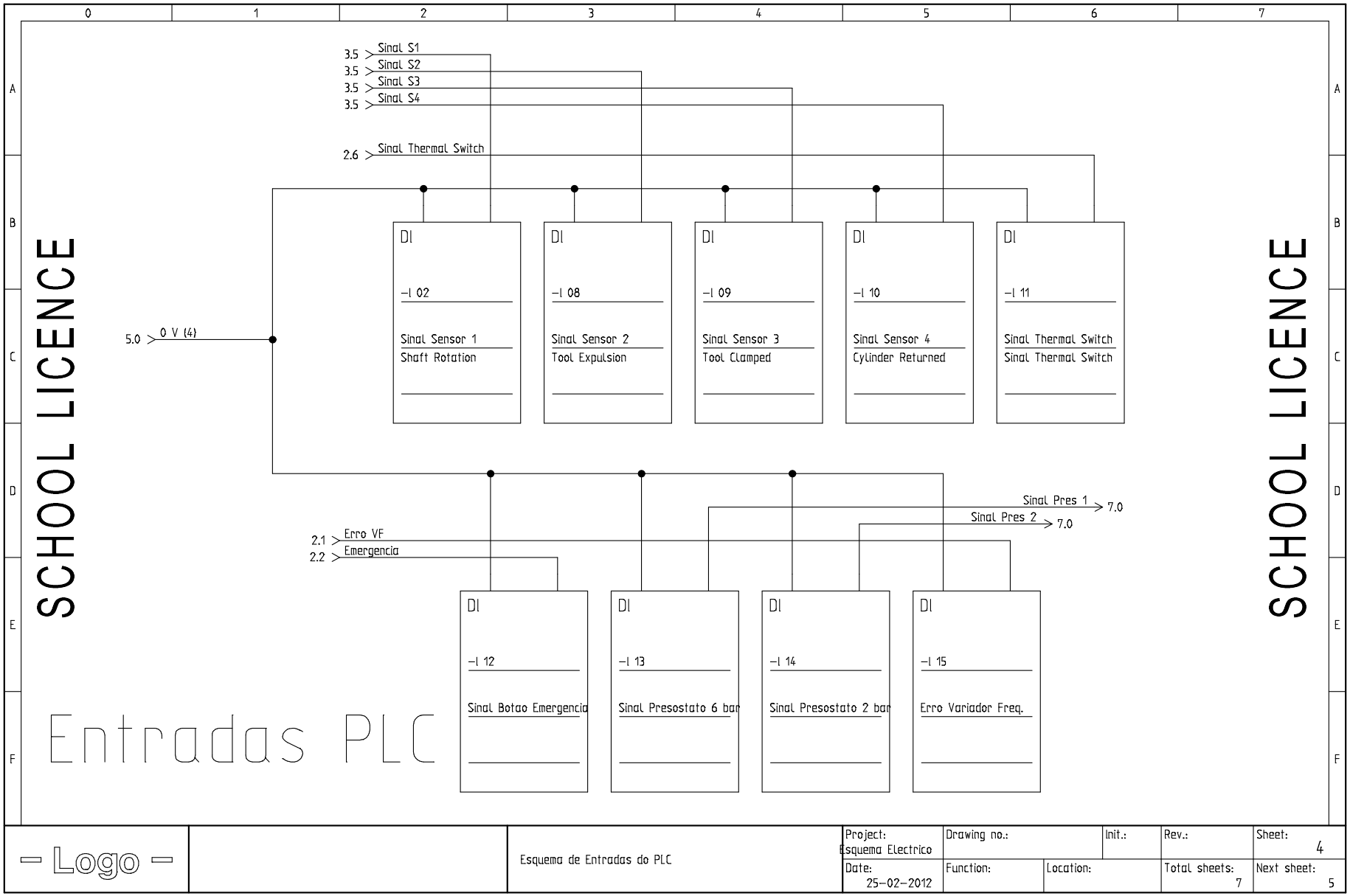
A.2 Circuitos elétricos

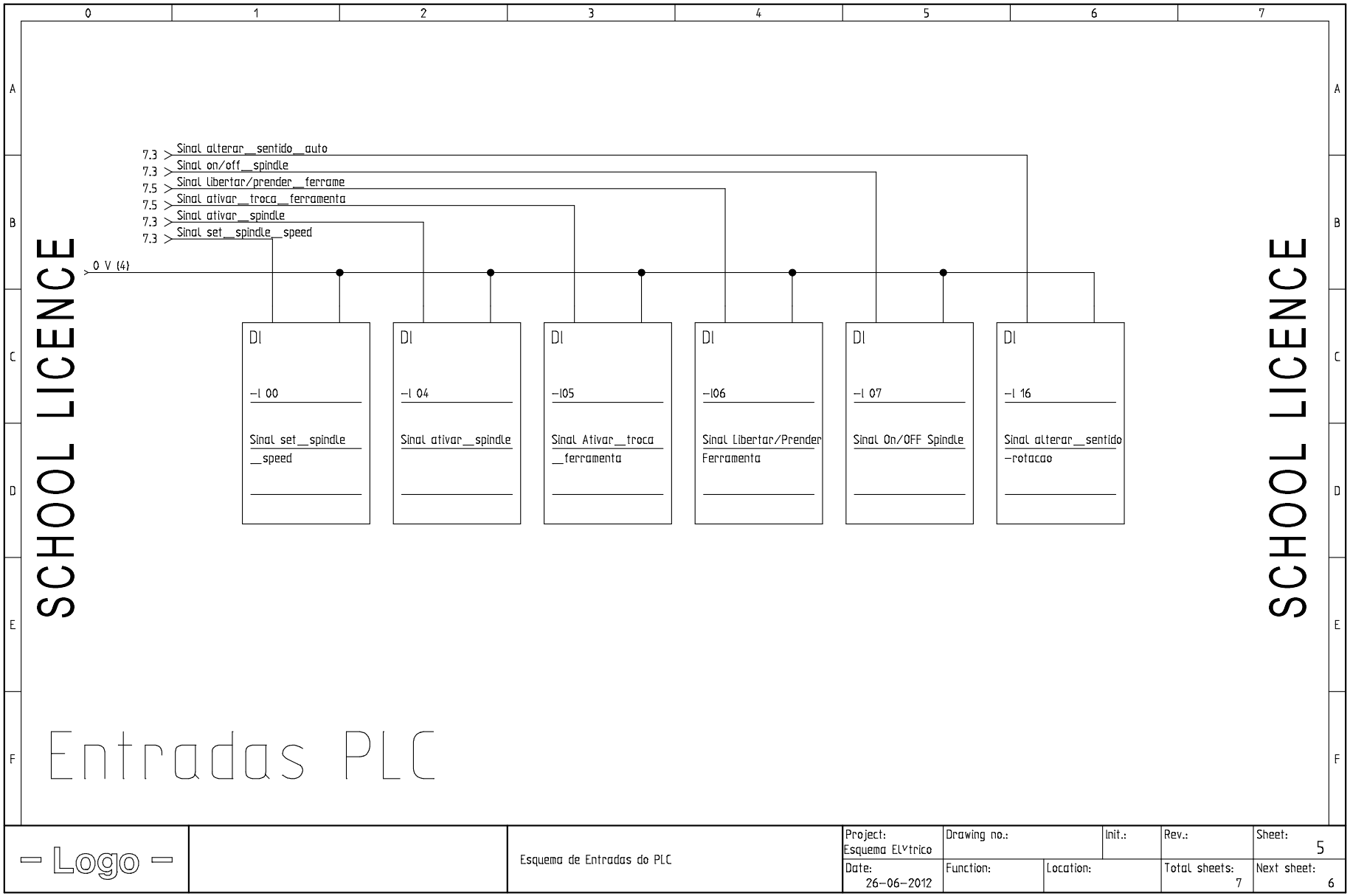
(Consultar na próxima folha)


SCHOOL LICENCE
24V (1) 2.2
24V (2) 2.5
24V (3) 6.1
24V (4) 7.1
24V (5) 7.5
0 V (1) 2.1
0 V (2) 2.6
0 V (3) 6.6
0 V (4) 4.0
0 V (5) 7.1
0 V (6) 7.5
0 V (7) 7.1
0 V (8) 7.1
P L3 2.2
P L2 2.2
P L1 2.2
Terra 2.2
-X3
-X4
-F4
-T1
Fonte Alimentacao
-F3
Disjuntor
Ventoinha
-K1
2.2
-F2
Interruptor Diferencial
-F1
Fusiveis
-Q1
Interruptor Seccionador
-X0
PE
N
L1
TE
Project: Esquema Electrico
Drawing no.:
Init.:
Rev.:
Sheet: 1
Date: 2/24/2012
Function:
Location:
Total sheets: 7
Next sheet: 2
Power Supply
- Logo -
SCHOOL LICENCE

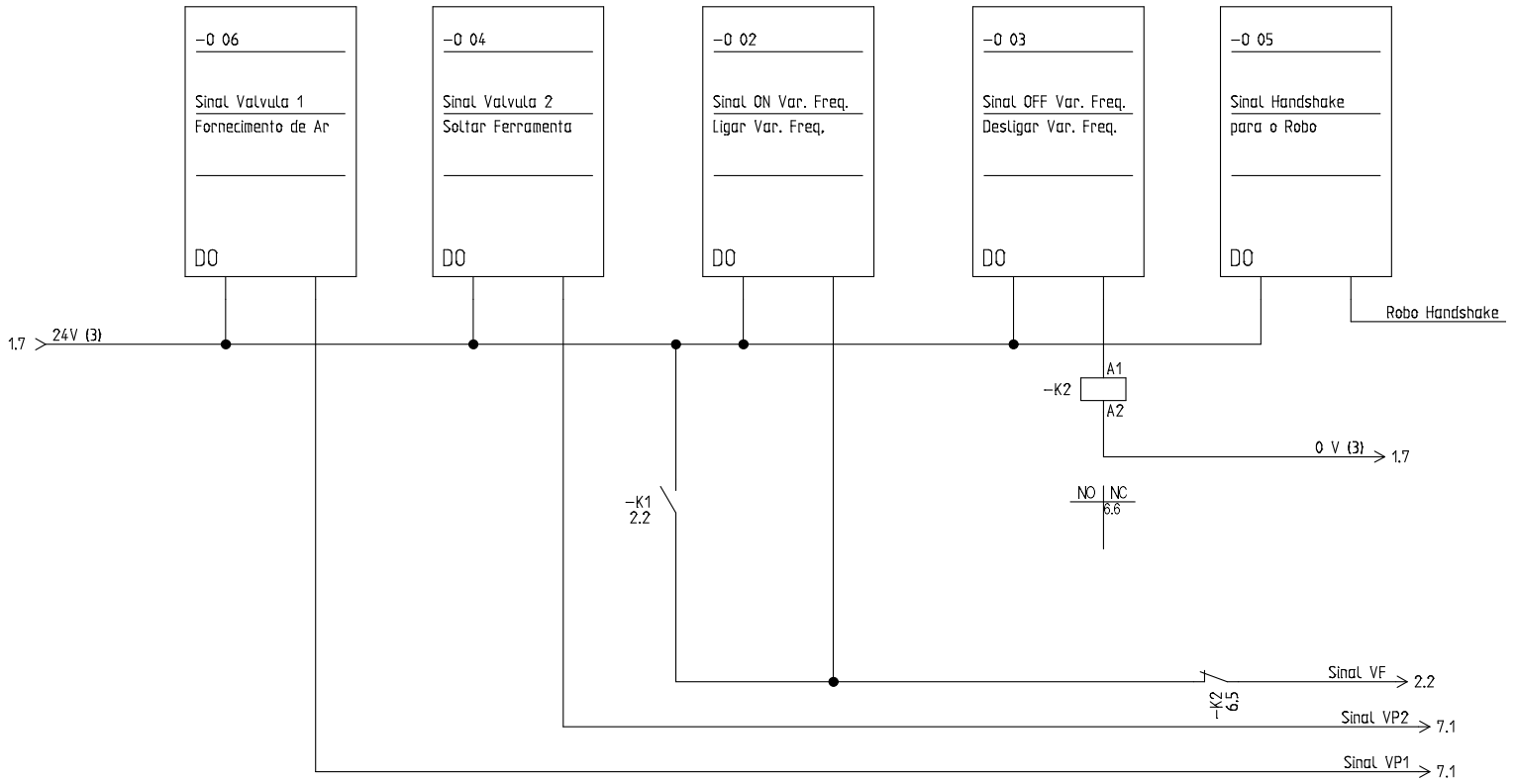

SCHOOL LICENCE
RS485 > 7.5
RS485 > 2.6
0 V (2) > 3.3
Sinal Thermal Switch > 4.2
3.3 > 24V (2)
-RUN
MRA
MRC
Variador de Frequencia
-X1
-Thermal Switch
-M1
Motor Spindle
1.7 > Terra
1.7 > P L1
1.7 > P L2
1.7 > P L3
RA
RB
RC
1.7 > 24V (1)
EmergRobot2 > 7.6
Emergencia > 4.2
6.7 > Sinal VF
21
22
A1
A2
11
12
-K1
Contactor
-Emerg
7.6 > EmergRobot1
Erro VF
4.2
1.7 > 0 V (1)
M1
13
NO
6.3
NC
- Logo -
Variador de Frequencia
Project:
Esquema Electrico
Date:
2/24/2012
Drawing no.:
Function:
Location:
Init.:
Rev.:
Total sheets:
7
Sheet:
2
Next sheet:
3


SCHOOL LICENCE
SCHOOL LICENCE
2.5
24V (2)
5
2.6
0 V (2)
6
-X2
1
2
3
4
Sinal S1
Sinal S2
Sinal S3
Sinal S4
4.2
4.2
4.2
4.2
-S1
Sensor1
-S2
Sensor 2
-S3
Sensor 3
-S4
Sensor 4
?
Logo
Ligacao Sensores do Spindle
Project:
Esquema Electrico
Drawing no.:
Init.:
Rev.:
Sheet:
3
Date:
01-03-2012
Function:
Location:
Total sheets:
7
Next sheet:
4

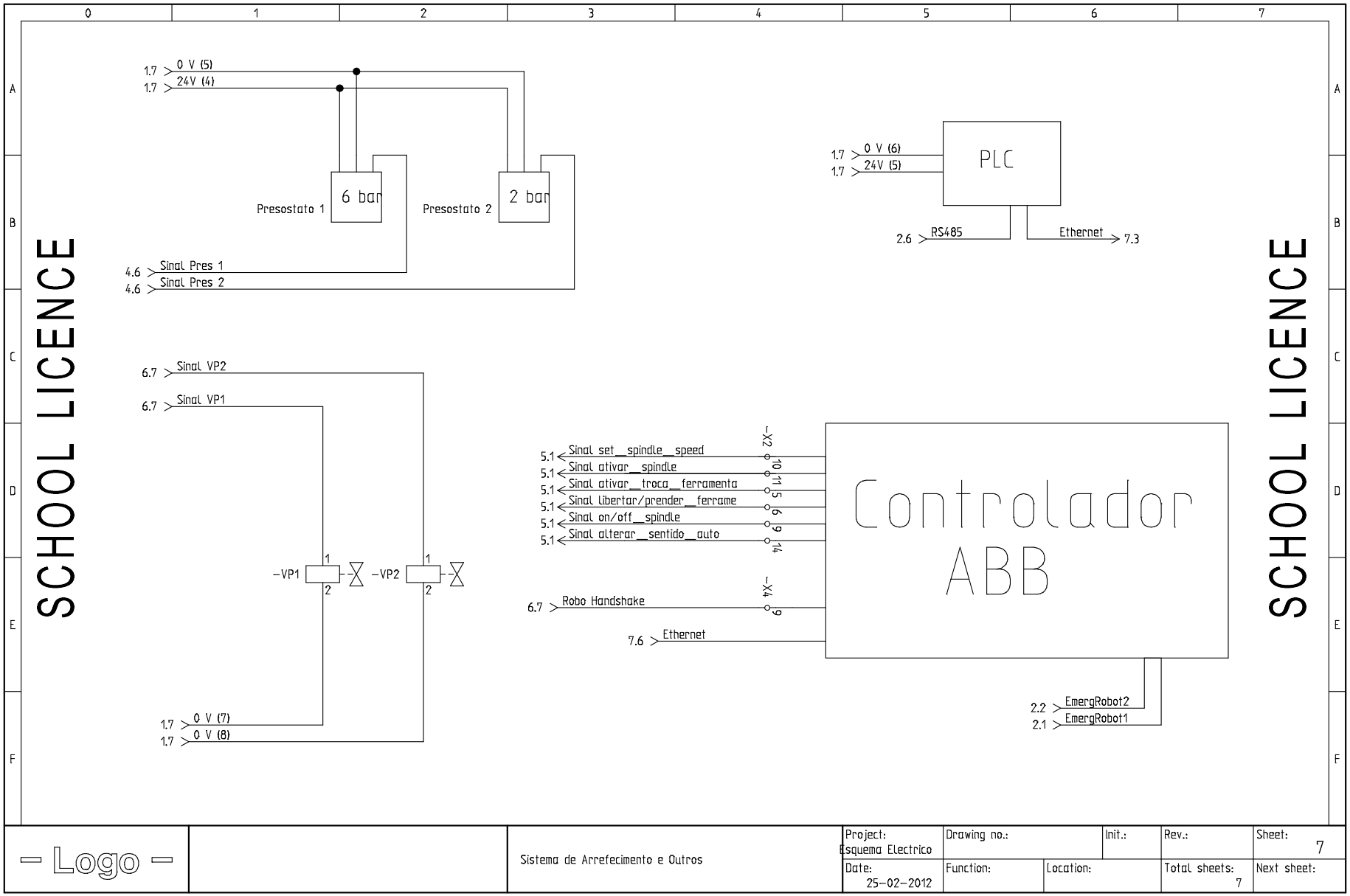

SCHOOL LICENCE
SCHOOL LICENCE
3.5 Sinal S1
3.5 Sinal S2
3.5 Sinal S3
3.5 Sinal S4
2.6 Sinal Thermal Switch
5.0 0 V (4)
DI
-I 02
Sinal Sensor 1
Shaft Rotation
DI
-I 08
Sinal Sensor 2
Tool Expulsion
DI
-I 09
Sinal Sensor 3
Tool Clamped
DI
-I 10
Sinal Sensor 4
Cylinder Returned
DI
-I 11
Sinal Thermal Switch
Sinal Thermal Switch
Sinal Pres 1 7.0
Sinal Pres 2 7.0
2.1 Erro VF
2.2 Emergencia
DI
-I 12
Sinal Botao Emergencia
DI
-I 13
Sinal Presostato 6 bar
DI
-I 14
Sinal Presostato 2 bar
DI
-I 15
Erro Variador Freq.
Entradas PLC
- Logo -
Esquema de Entradas do PLC
Project: Esquema Electrico
Drawing no.:
Init.:
Rev.:
Sheet: 4
Date: 25-02-2012
Function:
Location:
Total sheets: 7
Next sheet: 5


SCHOOL LICENCE
SCHOOL LICENCE
7.3 Sinal alterar__sentido__auto
7.3 Sinal on/off__spindle
7.5 Sinal libertar/prender__ferrame
7.5 Sinal ativar__troca__ferramenta
7.3 Sinal ativar__spindle
7.3 Sinal set__spindle__speed
0 V (4)
DI
-I 00
Sinal set__spindle__speed
DI
-I 04
Sinal ativar__spindle
DI
-I05
Sinal Ativar__troca__ferramenta
DI
-I06
Sinal Libertar/Prender Ferramenta
DI
-I 07
Sinal On/OFF Spindle
DI
-I 16
Sinal alterar__sentido-rotacao
Entradas PLC
- Logo -
Esquema de Entradas do PLC
Project: Esquema Elᵛtrico
Drawing no.:
Init.:
Rev.:
Sheet: 5
Date: 26-06-2012
Function:
Location:
Total sheets: 7
Next sheet: 6

Saidas PLC



Logo		Esquema de Saidas do PLC	Project: Esquema Electrico	Drawing no.:	Init.:	Rev.:	Sheet: 6
			Date: 01-03-2012	Function:	Location:	Total sheets: 7	Next sheet: 7


SCHOOL LICENCE
SCHOOL LICENCE
1.7 0 V (5)
1.7 24V (4)
Presostato 1
6 bar
Presostato 2
2 bar
4.6 Sinal Pres 1
4.6 Sinal Pres 2
1.7 0 V (6)
1.7 24V (5)
PLC
2.6 RS485
Ethernet 7.3
6.7 Sinal VP2
6.7 Sinal VP1
-VP1
-VP2
1.7 0 V (7)
1.7 0 V (8)
-X2
5.1 Sinal set__spindle__speed
5.1 Sinal ativar__spindle
5.1 Sinal ativar__troca__ferramenta
5.1 Sinal libertar/prender__ferrame
5.1 Sinal on/off__spindle
5.1 Sinal alterar__sentido__auto
Controlador ABB
-X4
6.7 Robo Handshake
7.6 Ethernet
2.2 EmergRobot2
2.1 EmergRobot1
- Logo -
Sistema de Arrefecimento e Outros
Project: Esquema Electrico
Drawing no.:
Init.:
Rev.:
Sheet: 7
Date: 25-02-2012
Function:
Location:
Total sheets: 7
Next sheet:

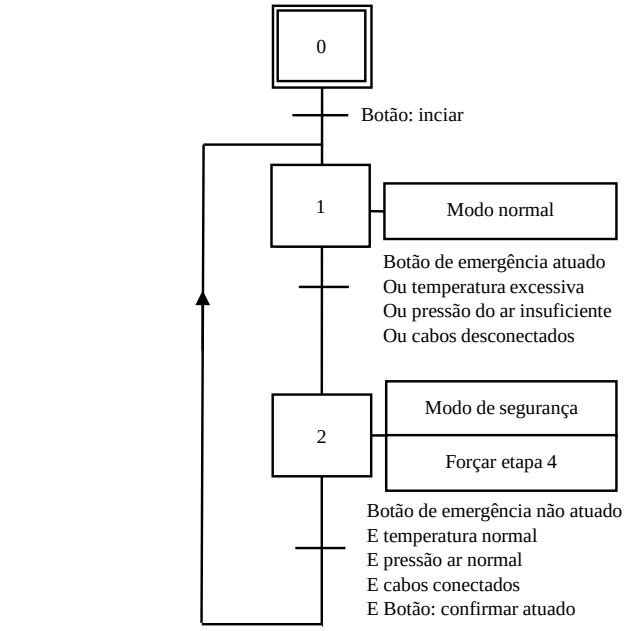
Anexo B

Controlo do *Spindle*

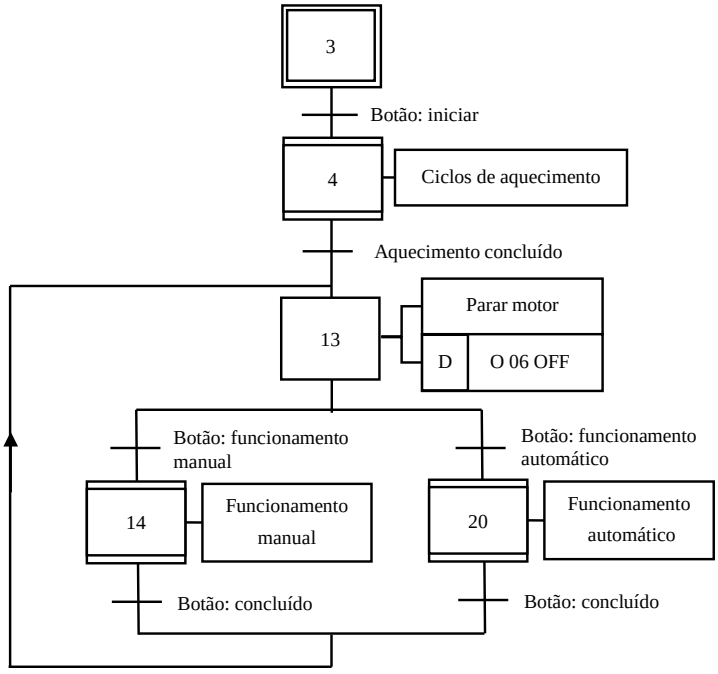
B.1 Grafcets implementados

(Consultar na próxima folha)

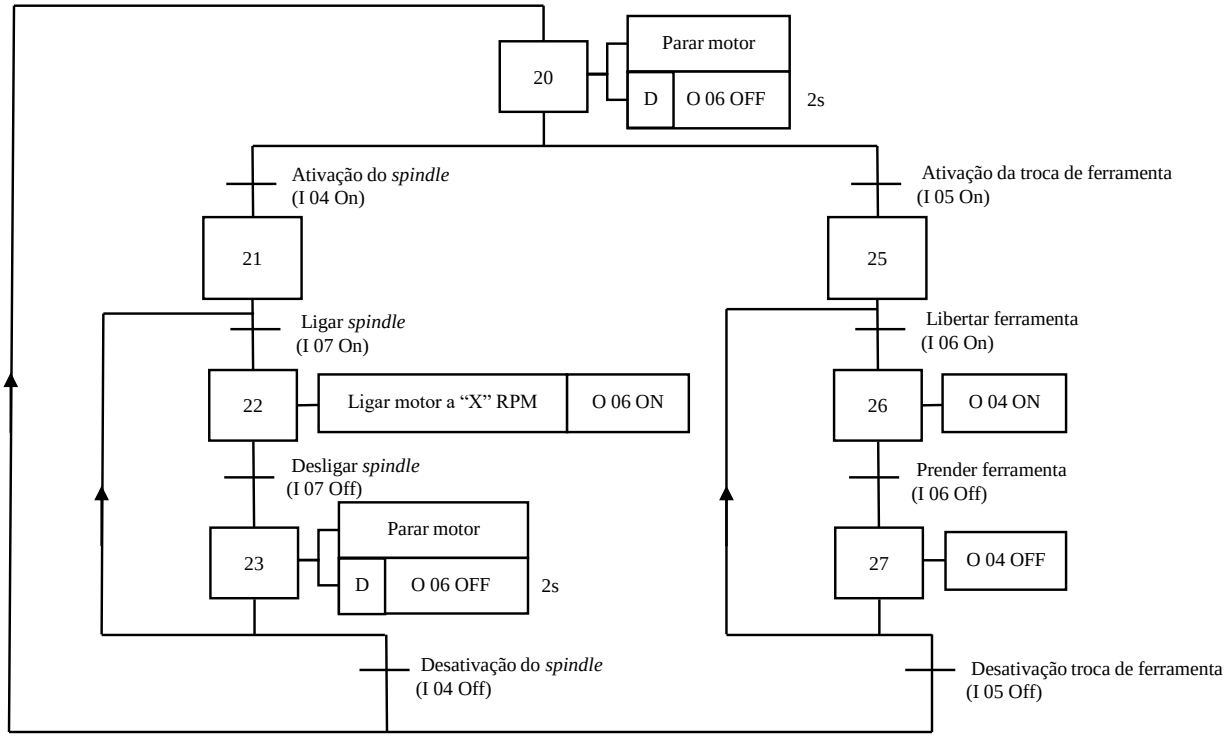
GRAFCET 1
Modos de funcionamento



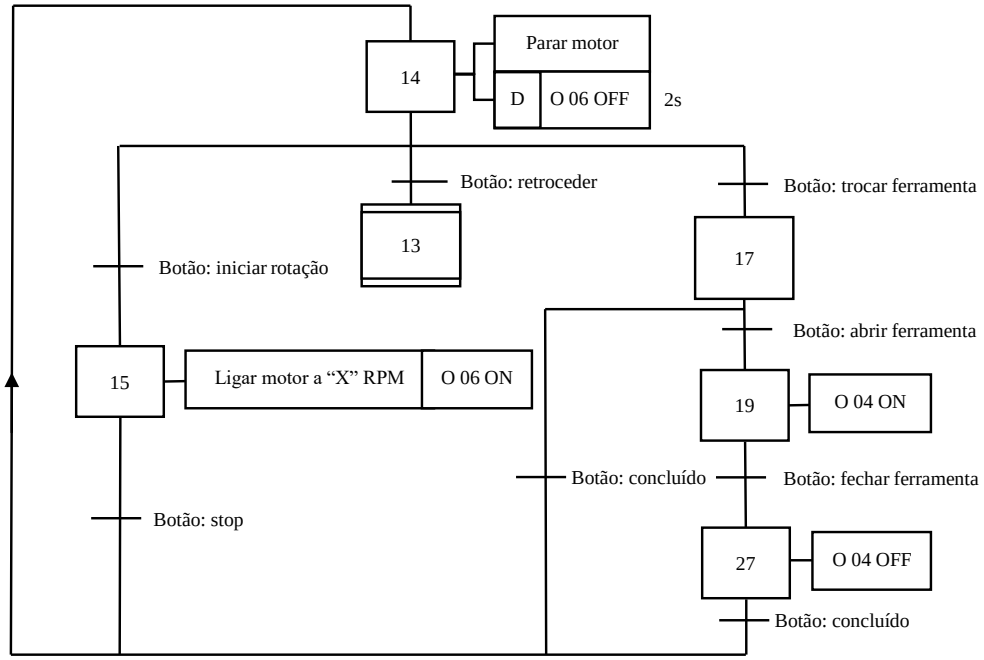
GRAFCET 2
Sequência de operação



GRAFCET 3
Funcionamento Automático



GRAFCET 4
Funcionamento Manual



B.2 Rotinas RAPID do *spindle*

B.2.1 Definição da velocidade

```
PROC set_speed(num x)
    VAR num pulsos;
    VAR num index:=0;
    VAR num tempo:=2.5;
    pulsos := x DIV 500;
    WHILE index < pulsos DO
            Set DO10_10_set_speed;
            WaitTime 0.05;
            tempo := tempo - 0.05;
            index:=index+1;
            IF index < pulsos THEN
                Reset DO10_10_set_speed;
                WaitTime 0.05;
                tempo := tempo - 0.05;
                index:=index+1;
            ENDIF
    ENDWHILE
    WaitTime tempo;
    Reset DO10_10_set_speed;
ENDPROC
```

B.2.2 Ativação do *spindle*

```
PROC ativar_spindle()
    Set DO10_11_ativar_spindle;
    WaitTime 0.1;
    WaitDI DI10_9_handshake,1;
    WaitTime 0.2;
ENDPROC
```

B.2.3 Desativação do *spindle*

```
1 PROC desativar_spindle ()
2     Reset DO10_11_ativar_spindle;
3     WaitTime 0.1;
4     WaitDI DI10_9_handshake,1;
5     WaitTime 0.2;
6 ENDPROC
```

B.2.4 Ligar *spindle*

```
1 PROC ligar_spindle ()
2     Set DO10_9_on_off_spindle;
3     WaitTime 0.1;
4     WaitDI DI10_9_handshake,1;
5     WaitTime 0.2;
6 ENDPROC
```

B.2.5 Desligar *spindle*

```
1 PROC desligar_spindle ()
2     Reset DO10_9_on_off_spindle;
3     WaitTime 0.1;
4     WaitDI DI10_9_handshake,1;
5     WaitTime 0.2;
6 ENDPROC
```

B.2.6 Ativação da troca de ferramenta

```
1 PROC ativar_troca_ferramenta ()
2     Set DO10_5_troca_ferramenta_spindle;
3     WaitTime 0.1;
4     WaitDI DI10_9_handshake,1;
5     WaitTime 0.2;
6 ENDPROC
```

B.2.7 Desativação da troca de ferramenta

```
1 PROC desativar_troca_ferramenta ()
2     Reset DO10_5_troca_ferramenta_spindle;
3     WaitTime 0.1;
4     WaitDI DI10_9_handshake,1;
5     WaitTime 0.2;
6 ENDPROC
```

B.2.8 Libertar ferramenta

```
1 PROC libertar_ferramenta ()
2     Set DO10_6_libertar_ferramenta;
3     WaitTime 0.1;
4     WaitDI DI10_9_handshake,1;
5     WaitTime 0.2;
6 ENDPROC
```

B.2.9 Prender ferramenta

```
1 PROC prender_ferramenta ()
2     Reset DO10_6_libertar_ferramenta;
3     WaitTime 0.1;
4     WaitDI DI10_9_handshake,1;
5     WaitTime 0.2;
6 ENDPROC
```

B.2.10 Rotação do *spindle* - sentido inverso

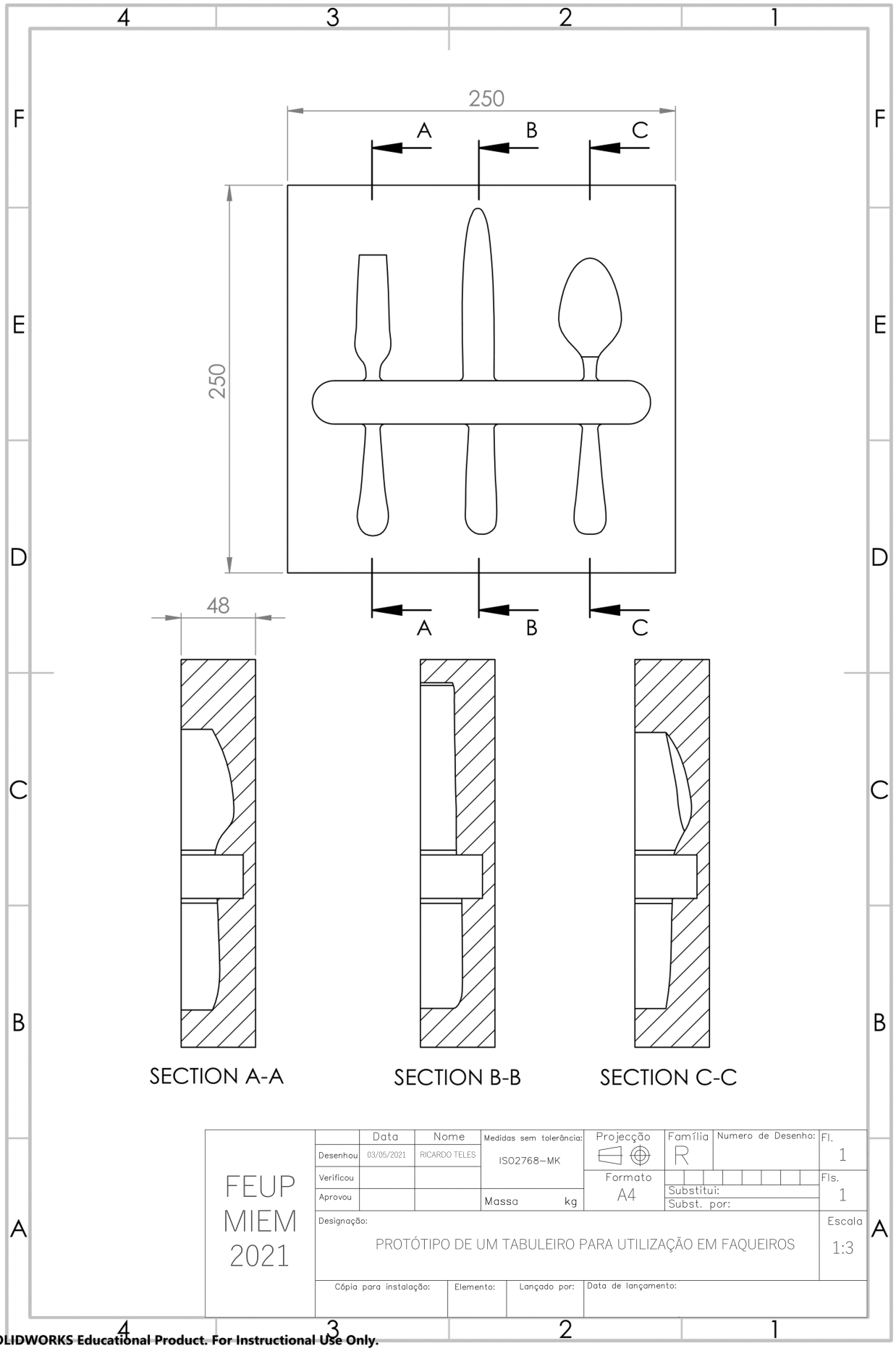
```
1  PROC sentido_inverso()
2      Set DO10_14_sentido_rotacao_spindle;
3      WaitTime 0.05;
4      Reset DO10_14_sentido_rotacao_spindle;
5      WaitDI DI10_9_handshake,1;
6      WaitTime 0.2;
7  ENDPROC
```

B.2.11 Rotação do *spindle* - sentido direto

```
1  PROC sentido_direto()
2      Set DO10_14_sentido_rotacao_spindle;
3      WaitTime 0.05;
4      Reset DO10_14_sentido_rotacao_spindle;
5      WaitTime 0.05;
6      Set DO10_14_sentido_rotacao_spindle;
7      WaitTime 0.05;
8      Reset DO10_14_sentido_rotacao_spindle;
9      WaitDI DI10_9_handshake,1;
10     WaitTime 0.2;
11 ENDPROC
```

Anexo C

Desenho Técnico do Tabuleiro



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Anexo D

Rotinas RAPID de Produção do Tabuleiro

D.1 Rotina principal

```
MODULE FAQUEIRO

    ! DECLARACAO VARIAVEIS - POSICAO DE SEGURANCA
    CONST robtarget
    Target:=[[13.436938449,-80.82020678,273.605259081],
        [0.000008392,-1,-0.000000011,0.000000021],[-1,1,-1,0],
        [9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

    ! DECLARACAO VARIAVEIS - FERRAMENTAS E WORKOBJECT
    PERS tooldata
    tl_:=[TRUE,[[-78.163,-192.593,173.284],
        [0.585042,0.397147,-0.585042,0.397147]],
        [20,[10,10,110],[1,0,0,0],0,0,0]];
    PERS tooldata
    tl_2:=[TRUE,[[-88.2675,-218.687,172.841],
        [0.585042,0.397147,-0.585042,0.397147]],
        [20,[10,10,110],[1,0,0,0],0,0,0]];
    TASK PERS wobjdata
    wob1:=[FALSE,TRUE,"",[[0,0,0],[1,0,0,0]],
        [[1153.95,-376.11,515.095],[1,0,0,0]]];

    ! DECLARACAO VARIAVEIS - LEITURA DE MODULOS
    LOCAL VAR string stPath:="HOME:";
    LOCAL VAR string stOP1_Module1:="OP1_Module1.MOD";
    LOCAL VAR string stOP1_Module2:="OP1_Module2.MOD";
    LOCAL VAR string stOP1_Module3:="OP1_Module3.MOD";
    LOCAL VAR string stOP1_Module4:="OP1_Module4.MOD";
    LOCAL VAR string stOP2_Module1:="OP2_Module1.MOD";
    LOCAL VAR string stOP2_Module2:="OP2_Module2.MOD";
    LOCAL VAR string stOP3:="OP3.MOD";
    LOCAL VAR string stOP4:="OP4.MOD";

    PROC MAIN()

        MoveJ Target,v100,fine,tl_\WObj:=wob1;
        ativar_spindle;
```

```
37          sentido_direto;
40          ligar_spindle;
41          set_speed (10000);
42
43          WaitTime 15;
44
45          AccSet 10,10;
46          ConfL\On;
47          SingArea\Wrist;
48
49          ! OPERACAO 1
50          Load stPath\File:=stOP1_Module1;
51          %"FAQUEIRO1_1"%;
52          UnLoad stPath\File:=stOP1_Module1;
53          Load stPath\File:=stOP1_Module2;
54          %"FAQUEIRO1_2"%;
55          UnLoad stPath\File:=stOP1_Module2;
56
57          ! OPERACAO 2
58          Load stPath\File:=stOP2_Module1;
59          %"FAQUEIRO2_1"%;
60          UnLoad stPath\File:=stOP2_Module1;
61          Load stPath\File:=stOP2_Module2;
62          %"FAQUEIRO2_1"%;
63          UnLoad stPath\File:=stOP2_Module2;
64
65          ! OPERACAO 3
66          Load stPath\File:=stOP3;
67          %"FAQUEIRO3"%;
68          UnLoad stPath\File:=stOP3;
69
70          ! TROCA DE FERRAMENTA
71          troca_de_ferramenta;
72
73          ativar_spindle;
74          sentido_direto;
75          ligar_spindle;
76          set_speed (10000);
77
```

```
78          ! OPERACAO 4
81          Load stPath\File:=stOP4;
82          %"FAQUEIRO4"%;
83          UnLoad stPath\File:=stOP4;
84
85          MoveJ Target,v100,z100,tl_\WObj:=wob1;
86          desligar_spindle;
87          desativar_spindle;
88
89      ENDPROC
90
91  ENDMODULE
```

D.2 Rotina de troca de ferramenta

```
1   PROC troca_de_ferramenta()
2
3       ! DECLARACAO VARIAVEIS - NUMERO DA RESPOSTA
4       VAR num answer;
5       ! DECLARACAO VARIAVEIS - MEMRIZACAO DAS RESPOSTAS
6       VAR bool memory_answer_1;
7       VAR bool memory_answer_2;
8
9       MoveJ Target,v100,z100,tl_\WObj:=wob1;
10
11      desligar_spindle;
12      desativar_spindle;
13
14      WaitTime 15;
15
16      TPErase;
17      next:
18      TPReadFK answer,"Que operacao pretende realizar?","Libertar",
            "Bloquear","Prosseguir","Abortar",stEmpty;
19      IF answer=1 THEN
20          TPErase;
21          ativar_troca_ferramenta;
22          libertar_ferramenta;
23          TPWrite "Ferramenta libertada.";
24          memory_answer_1:=TRUE;
25          memory_answer_2:=FALSE;
26          GOTO next;
27      ELSEIF answer=2 AND memory_answer_1 THEN
28          TPErase;
29          prender_ferramenta;
30          desativar_troca_ferramenta;
31          memory_answer_2:=TRUE;
32          TPWrite "Ferramenta bloqueada.";
33          GOTO next;
34      ELSEIF answer=3 AND memory_answer_1 and memory_answer_2 THEN
35          GOTO next_2;
```

```
36        ELSEIF answer=4 THEN
39            EXIT;
40        ELSEIF answer=2 AND (NOT memory_answer_1) THEN
41            TPErase;
42            TPWrite "Para bloquear a ferramenta, e necessario libertar
                  a ferramenta existente.";
43            GOTO next;
44        ELSEIF answer=3 AND ((NOT memory_answer_1) or (NOT
              memory_answer_2)) THEN
45            TPErase;
46            TPWrite "Impossivel prosseguir. A troca de ferramenta nao
                 foi realizada.";
47            GOTO next;
48        ENDIF
49        next_2:
50
51    ENDPROC
```