



M 2015

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE MAQUINAÇÃO DE PRODUTOS EM CÉLULA ROBÓTICA E EM FRESADORA CNC

NUNO EDUARDO LEITÃO MORAIS ROSA
DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR

VÍTOR MANUEL BRANCO MARTINS AUGUSTO

<i>CANDIDATO</i>	Nuno Eduardo Leitão Morais Rosa	<i>Código</i> 200403663
<i>TÍTULO</i>	Desenvolvimento de métodos de maquinação de produtos em célula robótica e em fresadora CNC.	
<i>DATA</i>	18 de Fevereiro de 2015	
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Sala F106 - 16:00h	
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente Maria Ascensão Lopes</i>	DEMM/FEUP
	<i>Arguente Carlos Relvas</i>	DEM/UA
	<i>Orientador Vitor Martins Augusto</i>	DEMM/FEUP

Agradecimentos

Ao engenheiro Victor Martins Augusto por ter aceite ser meu orientador, por me ter acompanhado ao longo da dissertação e por me ter proporcionado a integração em ambiente empresarial.

À Norcam pela cedência de licenças de PowerSHAPE e PowerMILL com o plugin de robô durante o período de dissertação.

Ao engenheiro Alexandre Pinto Basto pelos esclarecimentos proporcionados em relação ao plugin de robô do PowerMILL.

À IDEIA.M por ter aceite acolher a minha dissertação em ambiente empresarial e por ter disponibilizado os seus equipamentos.

Ao engenheiro João Petiz e ao engenheiro Pedro Oliveira por me terem orientado internamente na IDEIA.M.

Resumo

Esta dissertação foi dedicada à aplicação dos conhecimentos adquiridos durante o seminário em tecnologias CAD e CAM em ambiente empresarial. O estágio foi efetuado na empresa IDEIA.M onde foram programadas e executadas, pelo dissertando, várias maquinações em CNC e em célula robótica que estão descritas e ilustradas ao longo deste trabalho. Foi também efetuado um trabalho proposto pela empresa com o intuito de se iniciar uma base de dados de maquinação de diferentes tipos de cortiça.

Abstract

This thesis had the purpose to apply the knowledge acquired during the seminar over the technologies of CAD and CAM in a job environment. The internship was done in IDEIA.M in Oporto where were programmed several machining processes that were applied both on a 3 axis CNC machine and on a 3+2 axis robot and they are all described in detail thru the present paper. The company purposed the start of building a database with some cork machining properties to improve the overall cork machining process.

Índice

Resumo	i
Abstract	ii
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	viii
Objetivo	1
Capítulo 1 - Introdução	2
As empresas	2
IDEIA.M	2
Norcam	3
Equipamentos utilizados	4
Célula robótica	4
Fresadora	5
Capítulo 2 - Conhecimentos práticos adquiridos	7
Plugin Robô do PowerMILL	7
Abertura do plugin robô do PowerMILL	7
Biblioteca de ferramentas	8
Exportação de trabalhos de maquinação	9
Célula Robótica	12
Interface	12
Fresadora	22
Interface	22
Capítulo 3 - Trabalhos realizados	24
1 - Escala de guitarra	24
2 - Tampa “blade” para guitarra	30
3 - Escala para bandolim	33
4 - Cavalete para bandolim	37
5 - Chassis de fórmula student	40
Preparação dos blocos de cortiça	40
Maquinação do chassis	41
Capítulo 4 - Trabalho proposto pela empresa	46
Método experimental	47
Materiais a testar	48
Ferramenta utilizada	50
Testes práticos efetuados	50
Teste de sentido de corte	50

Cortiça 8122 _____	51
Cortiça 8003 _____	52
Cortiça 9436 e 8303 _____	53
Resultados gerais _____	54
Conclusão e continuidade do trabalho proposto pela empresa _____	56
Sugestões de melhoria _____	56
Conclusão geral _____	57
Referências bibliográficas _____	58
Anexos _____	59

Índice de figuras

Figura 1 - Logótipo da IDEIA.M.	2
Figura 2 - Logótipo da Norcam.	3
Figura 3 - Célula robótica da IDEIA.M.	4
Figura 4 - Controlador do Spindle.	4
Figura 5 - Controlador DX100 [4].	5
Figura 6 - Fresadora OPTIMUM BF 46 Vario da IDEIA.M.	6
Figura 7 - Interface NCdrive da fresadora.	6
Figura 8 - Abertura do plugin robô no PowerMILL.	7
Figura 9 - Abertura do robô na biblioteca do plugin.	8
Figura 10 - Ilustração do acesso à base de dados de ferramentas.	8
Figura 11 - Ilustração de seleção da ferramenta na base de dados de ferramentas.	8
Figura 12 - Célula de Robô (esquerda) e Controle de Robô (direita).	10
Figura 13 - Programa de Robô: zona de criação do programa NC (esquerda); zona de ajuste de parâmetros (direita).	10
Figura 14 - Criar programa NC (esquerda) e pontos a modificar no programa NC (direita).	11
Figura 15 - Fotografia do controlador do robô.	12
Figura 16 - Chave do controlador do robô virada para a opção "Teach".	12
Figura 17 - Menu "System info" (esquerda) e seleção de modo no "Security" (direita)	13
Figura 18 - Colocação do código de segurança após seleção do modo.	13
Figura 19 - Zona do controlador onde se coloca a pen com os trabalhos de maquinação.	14
Figura 20 - Acesso ao menu "Ex. memory" (esquerda) e acesso ao submenu "Job" (direita).	14
Figura 21 - Seleção de trabalhos a carregar para o controlador (esquerda) e janela que aparece ao pressionar "Enter" para carregar os trabalhos.	15
Figura 22 - Acesso ao menu "Job" e ao submenu "Select job" (esquerda) e seleção do trabalho (direita).	15
Figura 23 - Acesso ao submenu "User coordinate" a partir do menu "Robot" (esquerda) e aspeto do submenu "User coordinate" (direita).	16
Figura 24 - Seleção da opção "Clear data" para eliminar o conteúdo do plano de trabalho (esquerda e direita).	16
Figura 25 - Abertura do plano após se ter limpo o mesmo (esquerda) e seleção do ponto que se pretende guardar (direita).	17
Figura 26 - Marcação de duas linhas perpendiculares na base para demarcar o plano de trabalho.	17
Figura 27 - Ponta da ferramenta no ponto correspondente à origem do plano de trabalho.	18
Figura 28 - Ponta da ferramenta no ponto pertencente à linha do eixo x o mais longe possível da origem.	18
Figura 29 - Ponta da ferramenta no terceiro ponto necessário para definir um plano.	19

Figura 30 - Calibração da ferramenta da célula robótica: a) Calibre sem ferramenta; b) Calibre com a ferramenta montada com o comprimento desejado; c) Medição do comprimento calibrado da ferramenta. _____	20
Figura 31 - Interface de calibração da ferramenta no PowerMILL. _____	20
Figura 32 - Acesso ao submenu "Tool" a partir do menu "Robot". _____	21
Figura 33 - Seleção da ferramenta a calibrar (esquerda) e zona onde se insere os valores obtidos na interface de calibração do PowerMILL. _____	21
Figura 34 - Estratégia de desbaste do modelo com fresa plana de diâmetro 20 mm. _____	25
Figura 35 - Estratégia de acabamento do modelo com fresa esférica com 16 mm de diâmetro. ____	25
Figura 36 - Estratégia de maquinação de um trasto com fresa plana de 0,5 mm de diâmetro. ____	27
Figura 37 - Estratégia de maquinação da pestana com fresa plana de 4 mm de diâmetro. _____	28
Figura 38 - Estratégia de maquinação de marcadores com fresa plana de 2 mm de diâmetro. _____	28
Figura 39 - Estratégia de maquinação de corte lateral com fresa plana de 10 mm de diâmetro. ____	29
Figura 40 - Fotografia da tampa "blade" aplicada no produto final (elemento em carbono na zona dos botões). _____	30
Figura 41 - Tampa "blade" com as geometrias adquiridas para executar os furos. _____	31
Figura 42 - Estratégia programada para maquinar o corte lateral da tampa "blade" com 3 passos. 31	
Figura 43 - Fotografia da peça final. _____	32
Figura 44 - Escala para bandolim maquinada. _____	33
Figura 45 - Estratégia de desbaste do modelo com fresa toroidal D20R0,8 (vista sem ligações e movimentos rápidos). _____	34
Figura 46 - Estratégia de acabamento do modelo com fresa plana de 10 mm de diâmetro. _____	35
Figura 47 - Estratégia de corte lateral com fresa plana de 10 mm de diâmetro. _____	35
Figura 48 - Estratégia de desbaste do cavalete de bandolim com fresa de topo D10 (vista sem movimentos rápidos). _____	38
Figura 49 - Estratégia de maquinação do acabamento lateral com recurso a um bloco falso com fresa esférica D16R8. _____	38
Figura 50 - Modelo importado para o PowerMILL. _____	40
Figura 51 - Exemplo da estratégia de maquinação de uma lateral de um bloco. _____	41
Figura 52 - Metade menor do chassis do chassis do fórmula student. _____	42
Figura 53 - Exemplo de uma zona do modelo que seria suscetível de ter colisões. _____	43
Figura 54 - Exemplo de um zona do modelo em que se teve que utilizar o modelo maquinado para evitar colisões. _____	44
Figura 55 - Simulação em ViewMILL para mostrar a zona que se teve que remover manualmente. 44	
Figura 56 - Fotografia da peça final acabada completa. _____	45
Figura 57 - Fórmula de cálculo do feedrate por dente. _____	46
Figura 58 - Fórmula de cálculo da velocidade tangencial. _____	46
Figura 59 - Corpo de teste criado no PowerSHAPE. _____	47

<i>Figura 60 - Corpo de teste de meia pirâmide criada no PowerSHAPE.</i>	48
<i>Figura 61 - Exemplos de tipos de cortiça 1.</i>	48
<i>Figura 62 - Exemplos de tipos de cortiça 2.</i>	49
<i>Figura 63 - Exemplos de tipos de cortiça 3.</i>	49
<i>Figura 64 - Fotografia da fresa de topo de 20 milímetros.</i>	50
<i>Figura 65 - Corpo de teste em cortiça 8003 após desbaste.</i>	52
<i>Figura 66 - Corpo de teste em cortiça 9436 após desbaste.</i>	53
<i>Figura 67 - Corpo de teste em cortiça 8303 após desbaste.</i>	53
<i>Figura 68 - Fotografia da zona dos botões no controlador.</i>	59
<i>Figura 69 - Teste de maquinação no sentido concordante.</i>	60
<i>Figura 70 - Teste de maquinação no sentido discordante.</i>	61

Índice de tabelas

<i>Tabela 1 - Estratégias programadas para maquinar a escala de guitarra.</i>	24
<i>Tabela 2 - Estratégias para acabamento melhorado.</i>	26
<i>Tabela 3 - Estratégias programadas para a maquinação da tampa "blade".</i>	30
<i>Tabela 4 - Estratégias programadas para a maquinação da escala para bandolim.</i>	34
<i>Tabela 5 - Estratégias programadas para a maquinação do cavalete para bandolim.</i>	37
<i>Tabela 6 - Estratégias aplicadas no facejamento dos blocos.</i>	41
<i>Tabela 7 - Estratégias aplicadas na maquinação do chassis.</i>	42
<i>Tabela 8 - Estratégias utilizadas no teste da cortiça 8122 na metade esquerda da pirâmide.</i>	51
<i>Tabela 9 - Rotações por minuto e avanço utilizados em Swarf no lado direito da pirâmide.</i>	52
<i>Tabela 10 - Estratégias utilizadas para testar as cortiças 9436 e 8303.</i>	54
<i>Tabela 11 - Compilação dos resultados obtidos.</i>	54

Objetivo

A dissertação teve como objetivo a aplicação de conhecimentos adquiridos no seminário em CAD e CAM no desenvolvimento de métodos de maquinação em célula robótica e em fresadora CNC num ambiente empresarial, oferecendo assim ao dissertando a possibilidade de obter conhecimentos práticos na utilização de equipamentos de maquinação e a consequente introdução ao mercado de trabalho. Outro objetivo, proposto pela empresa, foi iniciar a implementação de uma base de dados de maquinação de cortiça para, através de consulta da mesma, facilitar e otimizar a maquinação futura dos diferentes tipos de cortiça.

Capítulo 1 - Introdução

As empresas

IDEIA.M

Empresa fundada em 2008 que deve o seu nome ao seu principal mote que é Investigação e Desenvolvimento de Instrumentos e Acessórios Musicais. Trata-se de uma pequena empresa que integra cinco a sete trabalhadores (dependendo de haver estagiários ou não) com formação em design e engenharia. Dedicar-se ao design, desenvolvimento e produção/prototipagem de produtos ligados não exclusivamente à música, encomendados por clientes ou por iniciativa própria. Tem parcerias com outras empresas de design de produtos.



Figura 1 - Logótipo da IDEIA.M.

Através dos diversos equipamentos disponíveis na empresa, possui a capacidade de fazer engenharia inversa, prototipagem rápida (através de uma impressora 3D), dispõe de uma cabine de pintura, uma cabine de carpintaria e uma célula robótica. Ainda dispõe uma fresadora CNC, um torno, uma quinadora e uma cabine de fotografia.

São proprietários de outras marcas, como a AVA Guitars, Douro Creative Studio, OXIO e Casal Vadio.

O principal material a que se dedicam é a cortiça. Devido ao facto da cortiça ser um material do qual Portugal é o principal produtor no mundo existem clientes de vários países do mundo que pretendem obter peças feitas a partir desse material. Para além de cortiça, também utilizam outros materiais compósitos, fibra de vidro, fibra de carbono, espuma de poliuretano e outros materiais, dependendo das especificações do produto e pretensões do cliente.

Norcam

A Norcam foi criada em 1991 com o apoio do BIC do Porto, NET - Novas Empresas e Tecnologias S.A. Implementam soluções industriais como sistemas de CAD/CAM/CAE, Prototipagem Rápida, Digitalizadores Tridimensionais e outros meios tecnológicos avançados numa ótica de *Concurrent Engineering*. A Norcam integra um conjunto de especialistas com experiência comprovada, formando uma equipa coesa nas áreas de Design Industrial, CAD/CAM/CAE e CNC.



Figura 2 - Logótipo da Norcam.

Das soluções fornecidas destacam-se o PowerSHAPE, PowerMILL e FeatureCAM, que são sistemas CAD/CAM da Delcam [1].

Equipamentos utilizados

Ao longo do estágio foram adquiridas competências para trabalhar com vários equipamentos existentes na empresa. No entanto os que têm interesse para esta dissertação são a célula robótica e a fresadora.

Célula robótica

Este modelo de robô da Yaskawa Motoman, fabricado para fins de soldadura, foi adaptado para ser utilizado em maquinação.

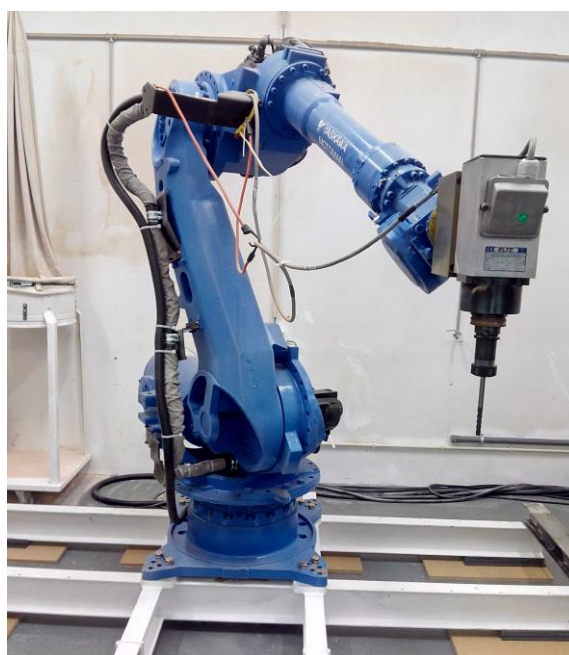


Figura 3 - Célula robótica da IDEIA.M.

A célula robótica tem uma carga útil de 165 kg, um alcance vertical de 3372 mm e horizontal de 2651 mm. Tem uma repetibilidade de $\pm 0,2$ mm [2].



Figura 4 - Controlador do Spindle.

O spindle nesta célula robótica é controlado manualmente no controlador que se pode observar na Figura 4 e tem um valor de RPM máximo de 15000 rotações (250 Hz).

O controlador do robô é o modelo DX100 da Yaskawa (ver Figura 5).



Figura 5 - Controlador DX100 [4].

Entre as características deste controlador destacam-se:

- Controlo patenteado de múltiplos robôs (até 8 robôs/72 eixos);
- Elevada velocidade de processamento;
- Interface de utilizador intuitiva em Windows CE num painel táctil;
- Importação de trabalhos através de porta USB [3].

Fresadora

A fresadora presente na IDEIA.M é do modelo OPTIMUM BF 46 Vario. Trata-se de uma fresadora de 3 eixos com 1230 milímetros de comprimento, 948 milímetros de largura e 1519 milímetros de altura. Tem uma base metálica incorporada com a finalidade de recolha de aparas e de líquido lubrificante (quando utilizado) assim como o suporte da própria fresadora. A base tem 1234 milímetros de comprimento, 750 milímetros de largura e 884 milímetros de altura [4].



Figura 6 - Fresadora OPTIMUM BF 46 Vario da IDEIA.M.

A interface de utilizador é feita através de um controlador instalado em ambiente Windows XP (NCdrive).

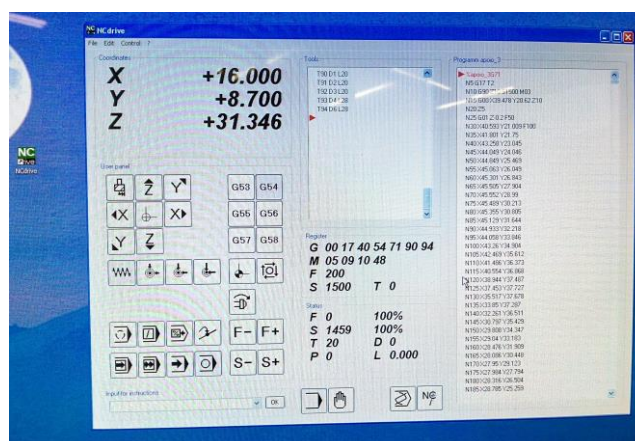


Figura 7 - Interface NCdrive da fresadora.

As especificações da marca indicam que os movimentos dos eixos permitem no máximo o movimento dos mesmos em cerca de:

- Eixo X 500 mm;
- Eixo Y 250 mm;
- Eixo Z 541 mm [4].

Isto indica, dependendo obviamente da geometria da peça, o tamanho máximo que o modelo pode ter para ser maquinado a três eixos na fresadora.

Capítulo 2 - Conhecimentos práticos adquiridos

No início e ao longo do estágio foram adquiridos conhecimentos práticos acerca do funcionamento dos equipamentos e ferramentas disponíveis na empresa. No entanto antes de aplicar os conhecimentos adquiridos anteriormente em PowerMILL foi necessário fazer uma formação acerca do plugin robô do PowerMILL.

Plugin Robô do PowerMILL

Foi efetuada uma formação acerca do plugin do robô do PowerMILL. Formação essa efetuada durante cerca de três horas repartidas entre o estudo de apresentações e tutoriais e posteriormente com o acompanhamento do engenheiro Alexandre Pinto Basto com a finalidade de apresentar as diferenças e melhorias entre as versões 2012 e 2015 do plugin, isto devido à versão utilizada na IDEIA.M se tratar da 2012 e a versão disponibilizada para esta dissertação ser a 2015.

Abertura do plugin robô do PowerMILL

Após a instalação do plugin efetuou-se a importação do robô da base de dados utilizada na empresa. Para se abrir a janela do plugin no PowerMILL clica-se com o botão direito do rato ao lado de uma das barras de ferramentas e seleciona-se “Janela de Plugin Vertical” (ver Figura 8).

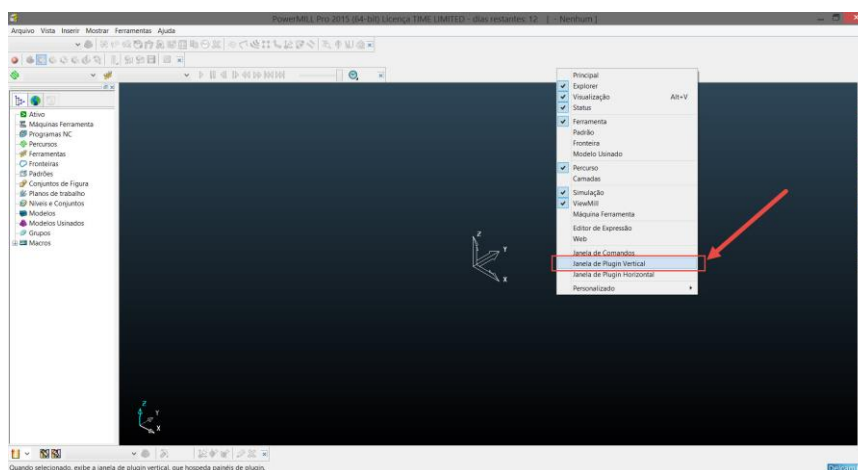


Figura 8 - Abertura do plugin robô no PowerMILL.

Depois seleciona-se o robô que vai ser utilizado na “Biblioteca de Robô”, neste caso o “Motoman ES165D Uptec” na versão sem mesa rotativa (ver Figura 9).

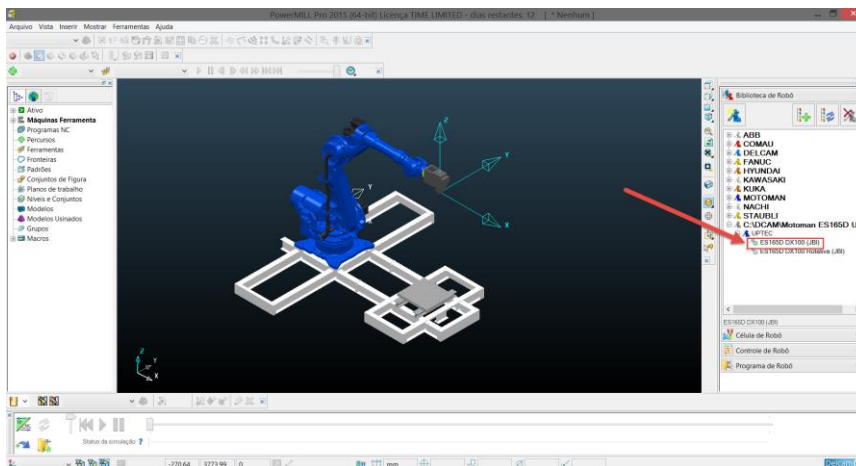


Figura 9 - Abertura do robô na biblioteca do plugin.

Biblioteca de ferramentas

Efetuoou-se a importação da biblioteca de ferramentas utilizadas na empresa. O acesso às ferramentas faz-se no botão que se pode observar na Figura 10. Depois selecciona-se a ferramenta e clica-se onde está destacado na Figura 11.

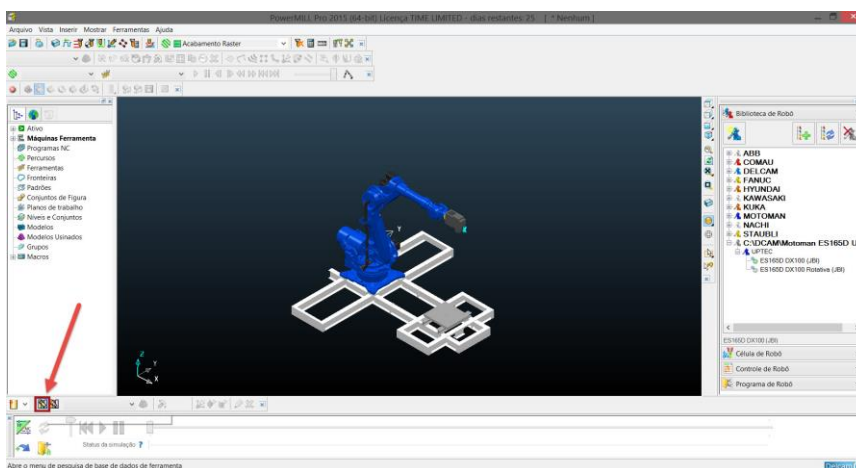


Figura 10 - Ilustração do acesso à base de dados de ferramentas.

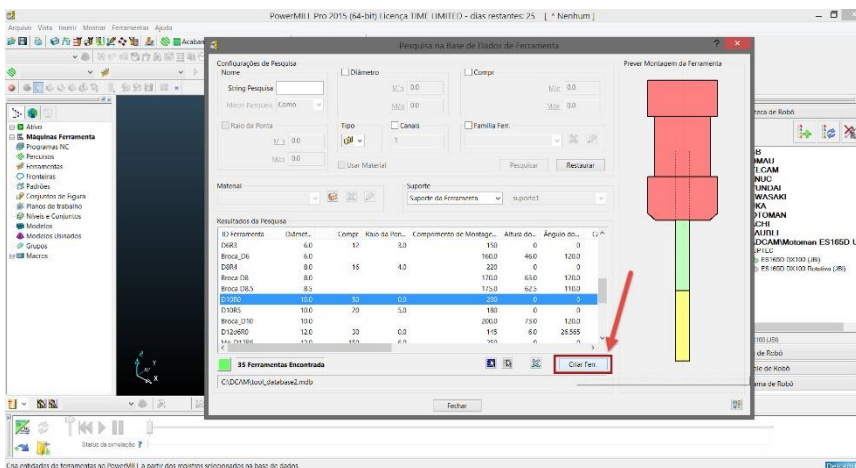


Figura 11 - Ilustração de seleção da ferramenta na base de dados de ferramentas.

A criação de ferramentas a partir da base de dados faz com que estas sejam adicionadas ao projeto atual.

Exportação de trabalhos de maquinação

I. Para célula robótica

Para se efetuar a exportação do trabalho de maquinação é necessário utilizar o plugin de robô do PowerMILL seguindo os seguintes passos (ver Figura 12 e Figura 13 para ilustração dos passos):

- Importar o robô da biblioteca (ver Abertura do plugin robô do PowerMILL);
- Na “Célula do Robô” ajustar o posicionamento da peça relativamente ao robô (no botão destacado na Figura 12 esquerda);
- No “Controle do Robô” efetuar as simulações para cada percurso para verificação de colisões, singularidades e limites de eixos, efetuar os ajustes necessários (e voltar a simular se necessário com os ajustes), e gravar as simulações;
- Em “Programa de Robô” escrever um nome de exportação, selecionar o plano de exportação, adicionar ao programa NC as simulações gravadas no passo anterior e criar transições caso sejam necessárias (depois de adicionar aparece a caixa para escrever o número referente à ferramenta calibrada no controlador do robô) e depois abrir a aba dos parâmetros e colocar o número referente ao plano de exportação atribuído no controlador do robô (e ajustar outros parâmetros que possam ser necessários);
- Clicar em “Escrever programa NC do robô”.

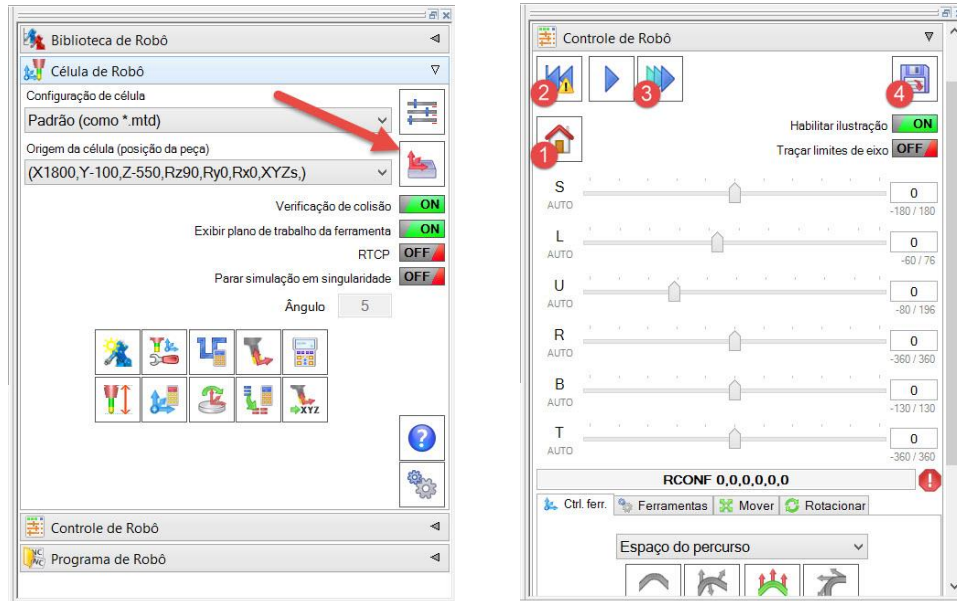


Figura 12 - Célula de Robô (esquerda) e Controle de Robô (direita).

Na figura de “Controle de robô” (Figura 12 - direita), os valores 1 a 4 indicam a sequência de botões a clicar para se efetuar e gravar cada simulação, sendo que pode ser necessário modificar outras opções (visíveis na parte de baixo da mesma imagem) para evitar colisões, singularidades, ou limites de eixos.

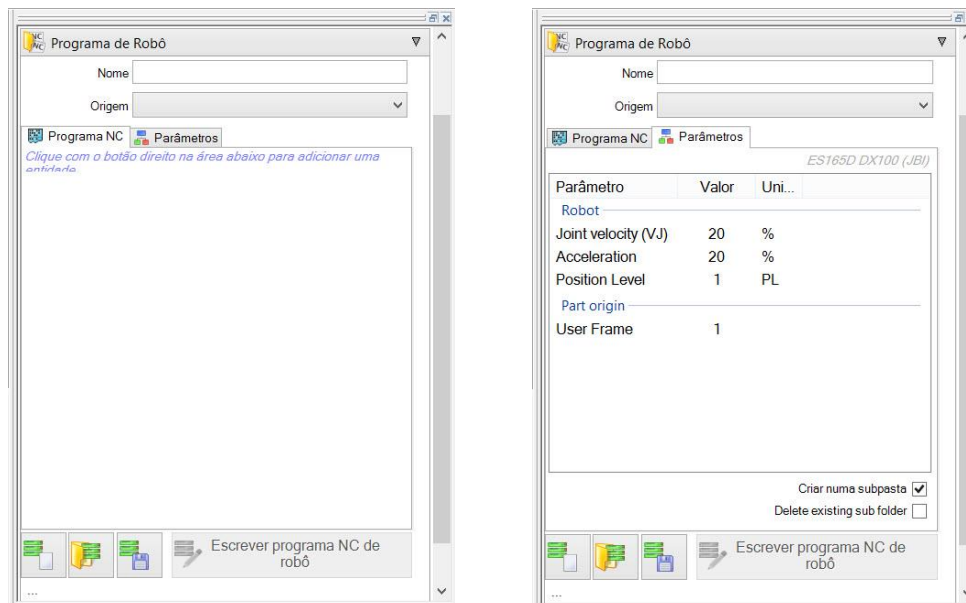


Figura 13 - Programa de Robô: zona de criação do programa NC (esquerda); zona de ajuste de parâmetros (direita).

II. Para fresadora CNC

A exportação de trabalhos para a fresadora CNC faz-se de forma mais simples utilizando a interface básica do PowerMILL.

Para exportar é necessário (ver Figura 14):

- Criar um programa NC para cada sequência pretendida de percursos de maquinação;
- Adicionar os percursos de maquinação ao programa NC (basta arrastar o percurso para cima do programa NC);
- Selecionar a linguagem adequada no “Arquivo de Opção de Máquina”, neste caso HeidenhainISO;
- Selecionar o plano de trabalho de exportação;
- Escrever o programa NC;
- Devido à ligeira diferença da linguagem é necessário abrir os ficheiros NC depois de criados (em, por exemplo, notepad++) e eliminar os asteriscos que aparecem no final de cada linha.

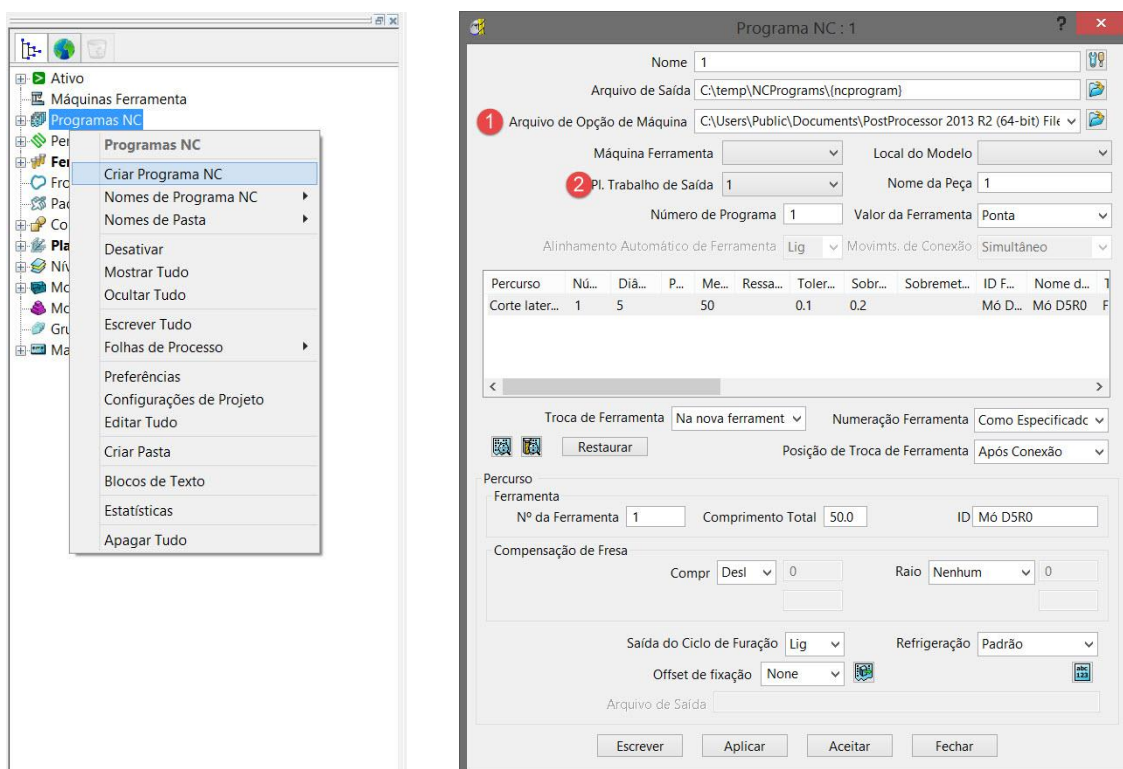


Figura 14 - Criar programa NC (esquerda) e pontos a modificar no programa NC (direita).

Célula Robótica

Interface

A operação do robô é feita através de um controlador próprio que tem uma interface intuitiva.



Figura 15 - Fotografia do controlador do robô.

- **Ativar o modo “Teach” e desbloquear todas as opções colocando em modo “Management”**

Para se conseguir efetuar a maior parte dos procedimentos que vão ser descritos a seguir é necessário ativar o modo “Teach” e desbloquear o controlador colocando em modo “Management”. Para colocar em modo “Teach” basta rodar a chave no canto superior esquerdo do controlador de forma a que este fique a apontar para a palavra “Teach” (ver Figura 16).



Figura 16 - Chave do controlador do robô virada para a opção “Teach”.

Para se conseguir aceder a algumas operações é necessário mudar o nível de segurança para “Management”. Os níveis de segurança existem para que, no caso do robô for operado por alguém sem a formação necessária, não se modifiquem inadvertidamente opções que poderiam comprometer, por exemplo, a calibração do spindle. No anexo encontra-se a Figura 68 para consultar caso pretenda ver a localização de teclas do controlador que vão ser referidas ao longo da dissertação. Para se mudar o nível de segurança é necessário (seguir sequência de imagens abaixo):

1. Aceder ao menu “System info” e seleccionar “Security”;
2. Seleccionar o modo “Management mode”;
3. Colocar o código de segurança, que é por defeito 99999999.

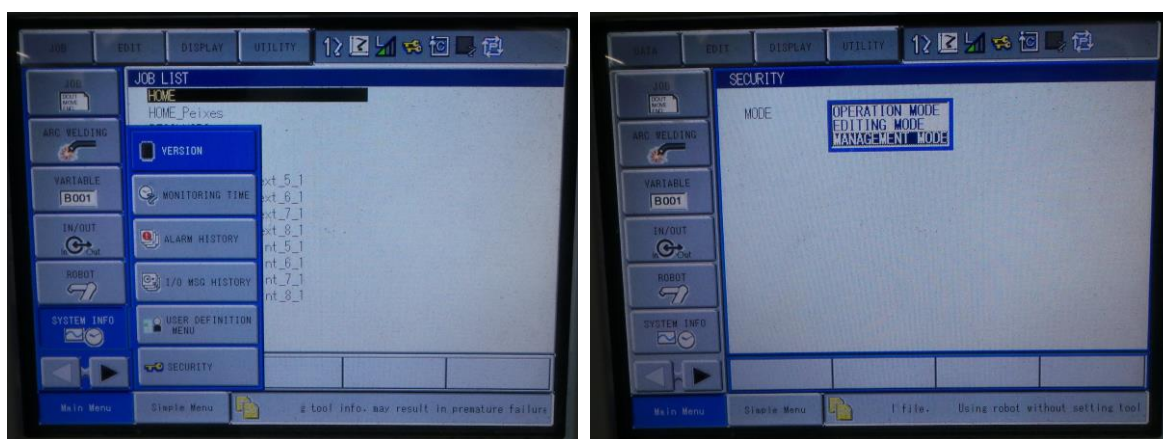


Figura 17 - Menu “System info” (esquerda) e seleção de modo no “Security” (direita)

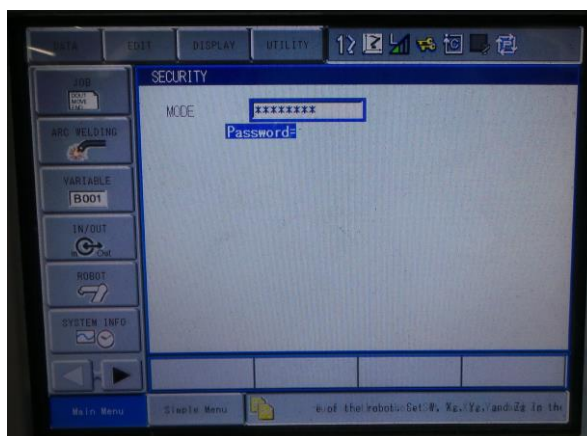


Figura 18 - Colocação do código de segurança após seleção do modo.

- **Transferência de trabalhos**

Para os trabalhos poderem ser executados pelo robô é necessário transferi-los para a memória interna do controlado. A transferência de trabalhos de maquinação faz-se por interface USB com uma pen que se coloca na parte traseira do controlador.

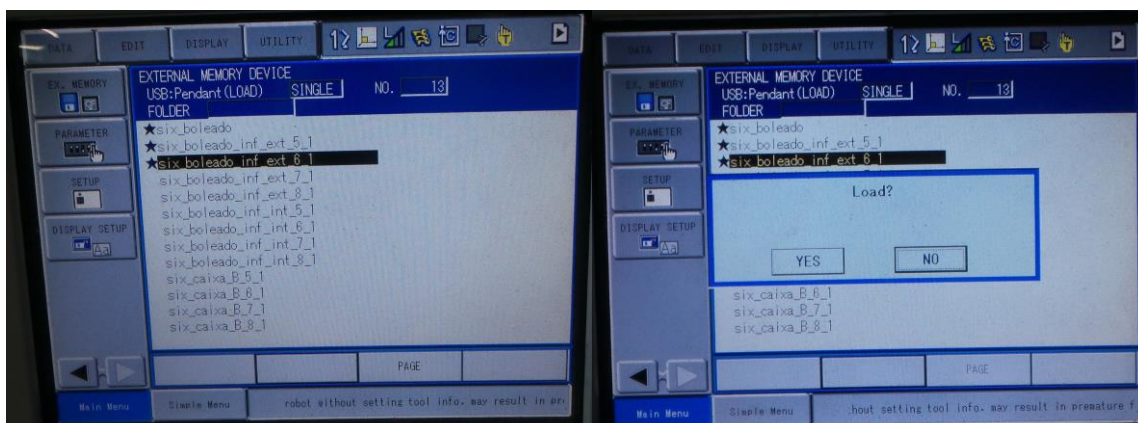


Figura 21 - Seleção de trabalhos a carregar para o controlador (esquerda) e janela que aparece ao pressionar "Enter" para carregar os trabalhos.

- **Seleção de trabalhos**

A seleção faz-se no controlador seguindo os passos (demonstrados na sequência de imagens posteriores):

1. Aceder ao menu "Job" seguido do submenu "Select Job"
2. Selecionar o trabalho da lista.

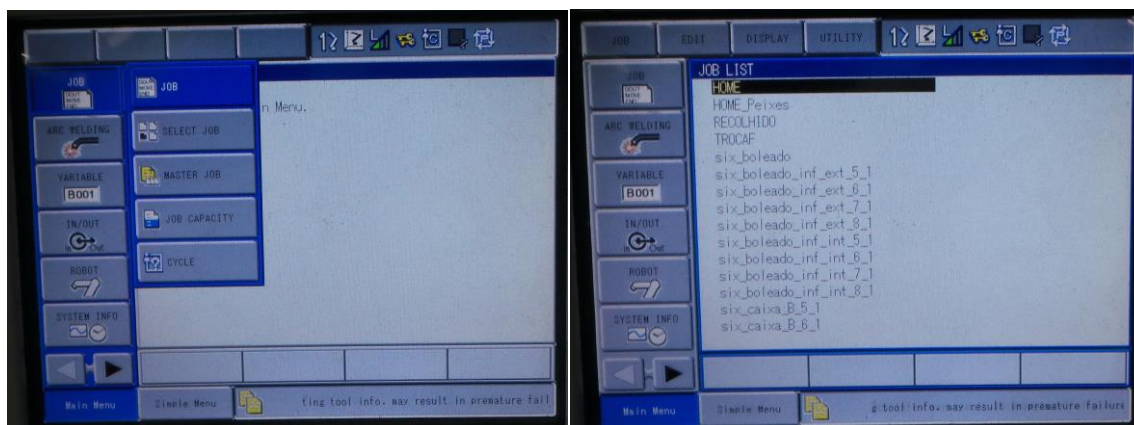


Figura 22 - Acesso ao menu "Job" e ao submenu "Select job" (esquerda) e seleção do trabalho (direita).

- **Programação do plano de trabalho de origem/exportação**

A atribuição do plano de trabalho faz-se quando da exportação dos trabalhos de maquinação (ver Exportação de trabalhos de maquinação).

Para se iniciar a programação do plano de trabalho de origem/exportação é necessário, através do controlador do robô, efetuar os seguintes passos (ilustrados nas imagens abaixo):

1. Aceder ao submenu "User coordinate" localizado no menu "Robot";

2. Selecionar o número do plano de trabalho que se pretende alterar e abrir;
3. Limpar o plano de trabalho para eliminar os valores antigos;
4. Sair do plano de trabalho selecionado e voltar a entrar;
5. Selecionar a ferramenta com que se vai programar o plano de trabalho com as teclas “Shift” e “Tool set”;
6. Guardar os três pontos que definem um plano, a origem, um ponto no eixo do x e um terceiro ponto no primeiro quadrante.

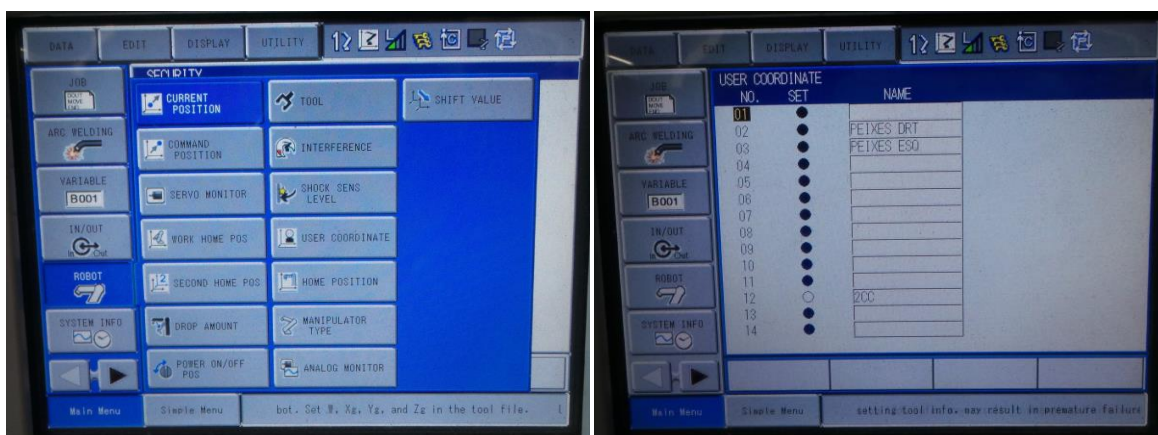


Figura 23 - Acesso ao submenu "User coordinate" a partir do menu "Robot" (esquerda) e aspeto do submenu "User coordinate" (direita).

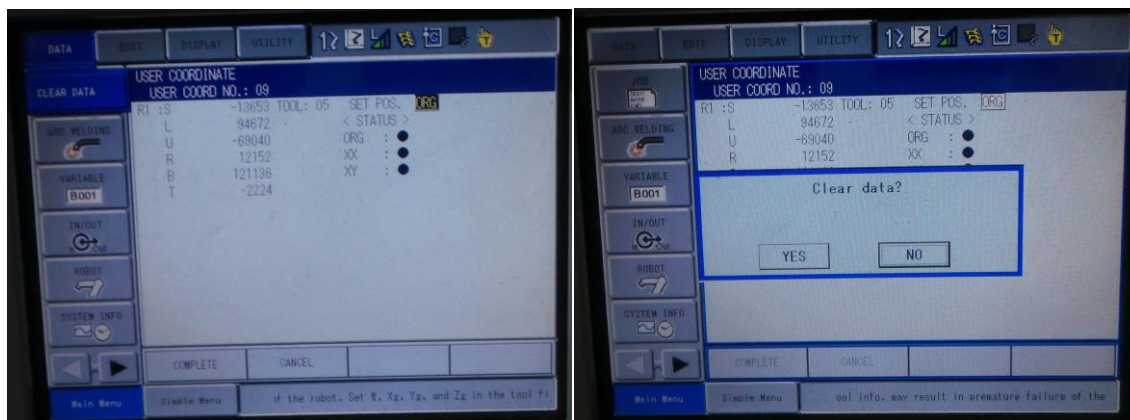


Figura 24 - Seleção da opção "Clear data" para eliminar o conteúdo do plano de trabalho (esquerda e direita).

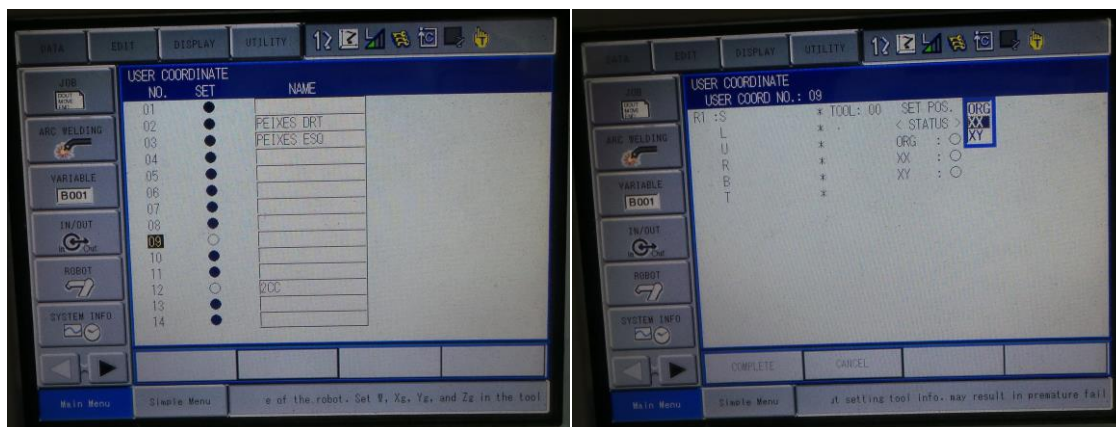


Figura 25 - Abertura do plano após se ter limpo o mesmo (esquerda) e seleção do ponto que se pretende guardar (direita).

Para guardar os três pontos necessários (ver Figura 25 - direita) para fazer um plano é necessário seguir os passos:

1. Marcar na base duas linhas perpendiculares correspondentes ao eixo x e y na base onde se vai colocar o material a maquinar (no caso do plano de trabalho de exportação ser na base da peça - caso mais comum);



Figura 26 - Marcação de duas linhas perpendiculares na base para demarcar o plano de trabalho.

2. Com o controlador do robô levar a ponta da ferramenta até à interseção dessas duas linhas e gravar como origem utilizando as teclas “Modify” seguida de “Enter”;



Figura 27 - Ponta da ferramenta no ponto correspondente à origem do plano de trabalho.

3. Com o controlador do robô levar a ponta da ferramenta ao longo do eixo x (quanto mais longe da origem melhor) e gravar como xx;

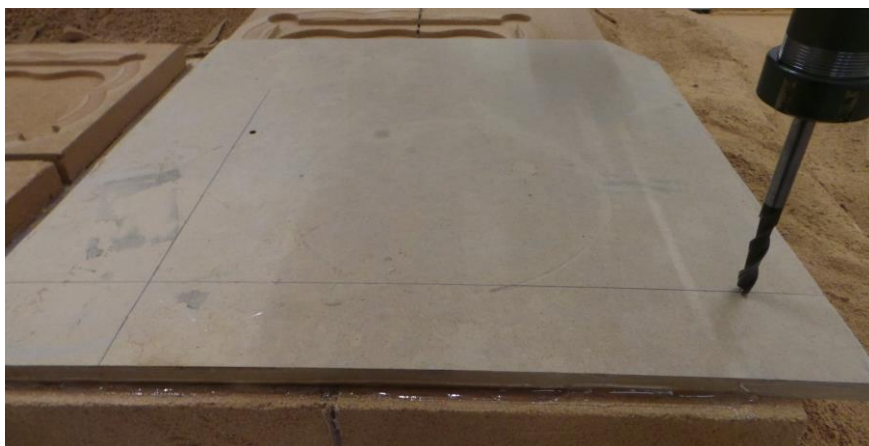


Figura 28 - Ponta da ferramenta no ponto pertencente à linha do eixo x o mais longe possível da origem.

4. Com o controlador do robô levar a ponta da ferramenta até a um ponto o mais longe possível da linha do eixo x (mais ou menos a meio do eixo x) e gravar como xy.

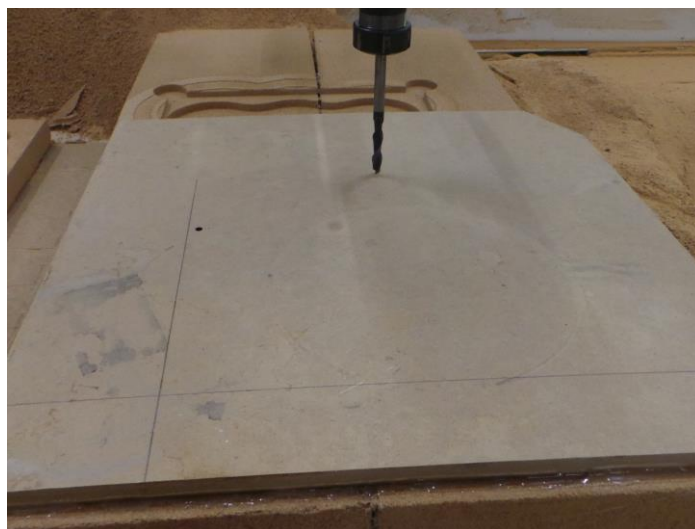


Figura 29 - Ponta da ferramenta no terceiro ponto necessário para definir um plano.

Os passos descritos acima, bem como o que as imagens ilustram, são referentes ao caso do plano de trabalho de exportação ser na base do modelo (que é o método mais comum utilizado para o plano de trabalho de exportação tal como foi dito no ponto 1 de como guardar os pontos). No entanto a programação do plano de trabalho depende sempre do plano de trabalho de exportação selecionado no modelo do PowerMILL e tem que ser interpretado e colocado na mesma localização quando programado no robô.

- **Restringimento do material a ser maquinado**

O restringimento pode ser efetuado de diversas formas dependendo do material e da geometria da peça. Normalmente utiliza-se cola quente e/ou pregos para prender o material a ser maquinado. Outra maneira de se restringir é a utilização de um gabari que pode ser maquinado para se adaptar à peça. Os gabaris são normalmente utilizados em peças frágeis, ocas ou então em peças nas quais se pretenda que não sofram qualquer dano por cola quente que origine a necessidade de execução de um processo de acabamento manual. Os gabaris podem também ser utilizados para maquinar peças em série pois facilitam a colocação e restrição do material a maquinar.

- **Montagem/troca de ferramenta e calibração**

A montagem da ferramenta é efetuada no suporte que se pode observar na Figura 30.

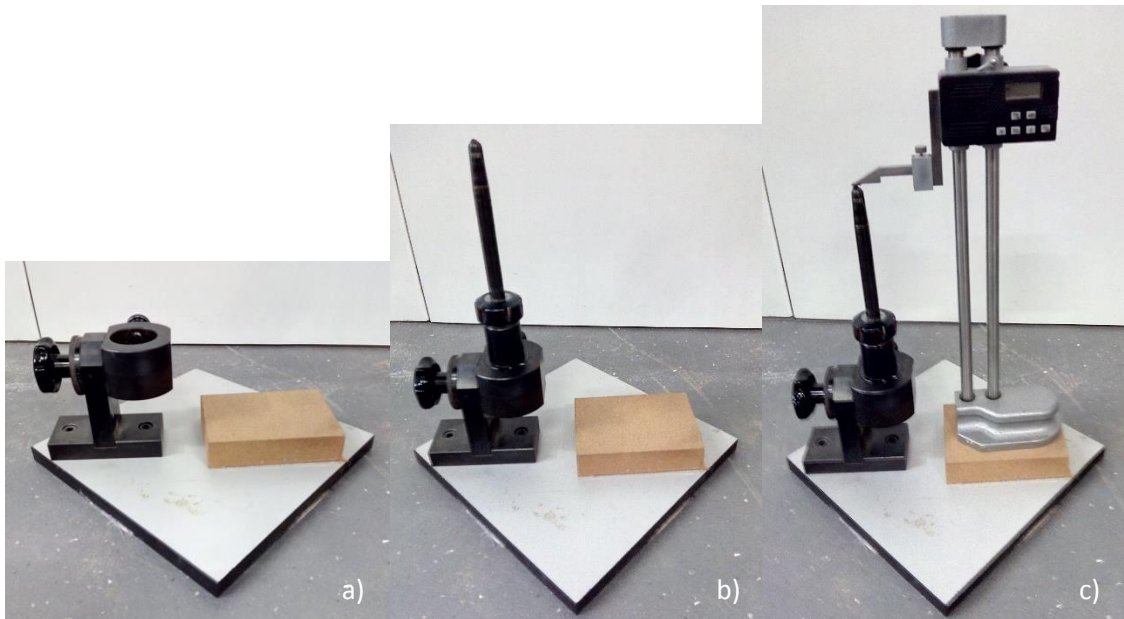


Figura 30 - Calibração da ferramenta da célula robótica: a) Calibre sem ferramenta; b) Calibre com a ferramenta montada com o comprimento desejado; c) Medição do comprimento calibrado da ferramenta.

A calibração da ferramenta é efetuada depois da montagem da mesma no suporte (ver b)). É necessário calibrar a ferramenta sempre que se altera o comprimento da mesma e sempre que se calibra o robô. Mede-se então o seu comprimento (ver c)) e depois coloca-se o valor obtido na interface do PowerMILL no computador para ser convertido em valores cartesianos que posteriormente são atualizados no controlador do robô (ver Figura 31).

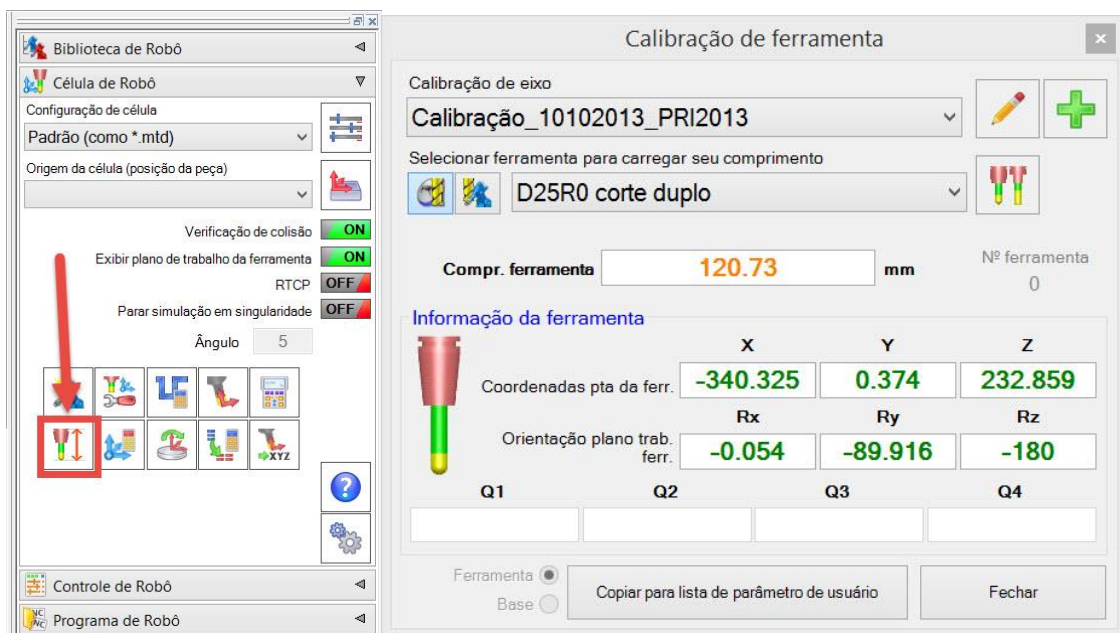


Figura 31 - Interface de calibração da ferramenta no PowerMILL.

Para colocar os valores obtidos na interface de calibração do PowerMILL no controlador do robô basta seguir os passos:

1. Abrir o submenu “Tool” localizado no menu “Robot”;



Figura 32 - Acesso ao submenu "Tool" a partir do menu "Robot".

2. Selecionar a ferramenta que se calibrou e inserir os valores obtidos na interface de calibração do PowerMILL.

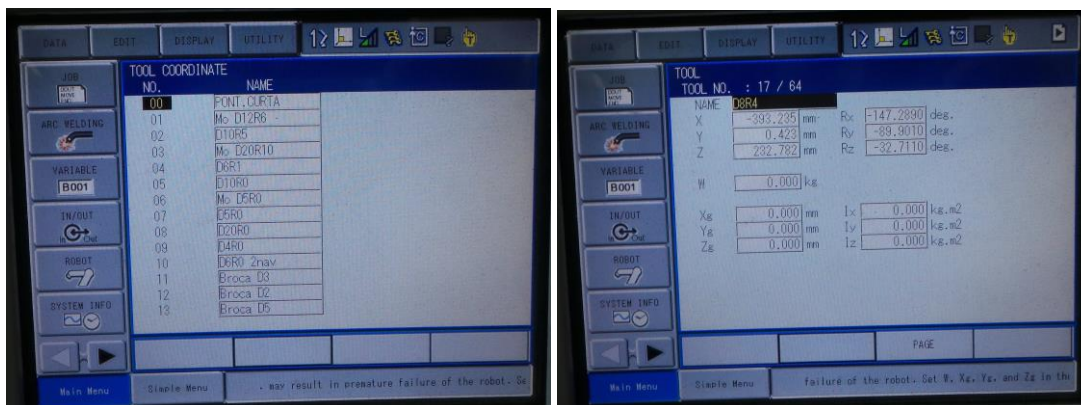


Figura 33 - Seleção da ferramenta a calibrar (esquerda) e zona onde se insere os valores obtidos na interface de calibração do PowerMILL.

- Troca de ferramenta no robô

A troca de ferramenta é um processo manual (ou seja não automatizado). Para trocar a ferramenta seleciona-se o trabalho “TrocaF” para o robô assumir uma posição adequada para se trocar a ferramenta. Depois desaperta-se o parafuso da ferramenta localizado na ponta do spindle, remove-se a ferramenta e coloca-se a que se pretende utilizar.

Fresadora

Interface

A interface de controlador da fresadora está instalado num computador e os programas são pós-processados em linguagem ISO.

Tem uma velocidade máxima de movimento de eixos de 600 mm/min.

- **Posicionamento da peça a maquinar**

Devido ao plano de trabalho na fresadora ter sempre a mesma orientação, isto por trabalhar a 3 eixos (e não a 3+2 como o robô), é necessário colocar o material a maquinar assente na base da fresadora e depois orientar o mesmo corretamente segundo o eixo x. Isto faz-se encostando a ferramenta ao material a maquinar e movimentando a ferramenta ao longo do eixo x para que o material fique orientado segundo o eixo x. Posteriormente procede-se ao restringimento do material a maquinar da forma que for mais apropriada, normalmente com cola quente ou com o auxílio de grampos que se prendem com parafusos nas calhas da mesa da fresadora.

- **Atribuição do plano de origem**

Para se atribuir o plano de origem é necessário encostar a ferramenta ao material a maquinar num ponto na linha do eixo x e guardar esse ponto na interface, depois encostar ao material num ponto na linha do eixo y e guardar esse ponto e finalmente encostar a um ponto referente à origem do eixo z (que pode ser atribuído no topo do material ou mais normalmente na base do material) e guardar esse ponto na interface. Após se guardar os três pontos sobe-se um bocado segundo o eixo do z para se evitar colisões com o material e envia-se a ferramenta para o ponto em que o centro da ferramenta fica coincidente com a interseção do eixo x com o eixo y, por exemplo se a ferramenta for uma fresa com 10 milímetros de diâmetro envia-se a fresa para o ponto x5y5, e guarda-se esses pontos como sendo as origens do eixo x e do eixo y.

- **Troca e calibração da ferramenta**

A troca de ferramenta é um processo manual e após cada mudança de ferramenta é necessário efetuar a calibração da mesma.

A calibração da ferramenta faz-se encostando a ferramenta a um ponto referente à origem do eixo z e guardando esse ponto na interface como sendo a origem do eixo z (isto diz à interface da fresadora o comprimento da ferramenta).

Capítulo 3 - Trabalhos realizados

Foram executados vários trabalhos ao longo do estágio tanto na célula robótica como na fresadora. Os tempos apresentados nas tabelas correspondem ao tempo obtido nas estatísticas do PowerMILL sendo que na realidade a maquinação demora, em média, 10 % mais.

1 - Escala de guitarra

Esta peça de geometria aparentemente simples foi maquinada na fresadora em compacto fenólico HPL (High Pressure Laminate) que é um material obtido a partir da compactação de folhas de papel kraft sobrepostas com uma resina fenólica.

Esta peça tem aproximadamente 475 milímetros de comprimento, 55 milímetros de largura na parte mais larga e 6 milímetros de altura máxima.

As Estratégias aplicadas estão resumidas na tabela seguinte.

Tabela 1 - Estratégias programadas para maquinar a escala de guitarra.

Nome do percurso		Desbaste	Acabamento	Trastos	Pestana	Marcadores	Corte Lateral	
Ferramenta		Topo D20	Esférica D16	Topo D0,5	Topo D4	Topo D2	Topo D10	
Estratégia	Tipo	Desbaste do modelo	Acabamento raster	Acabamento por padrão	Acabamento swarf	Acabamento 3D offset	Acabamento Z constante	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	0 *	0,3	0	0	0	0 *	
	Passo (mm)	Lateral	12	2	-	-	1	-
		Vertical	3,5	-	Máximo 0,3 *	Máximo 1,5 *	Máximo 1 *	3 a 5
	Ligações	Curta	Arco circular	Arco circular	Arco circular	Arco circular	Arco circular	Arco circular
		Longa	Rasante	Seguro	Rasante	Rasante	Rasante	Rasante
	Entradas	Rampa	-	Rampa	Rampa	Rampa	Rampa	
	Saídas	-	-	Rampa	Rampa	Rampa	Rampa	
	* Particularidade	Limite Z	Crista aproximada 0,126 mm	Número máximo de cortes = 8 Limite superior = 2	Número máximo de cortes = 4	Número máximo de cortes = 4	Limites Z	
mínimo = 7 mm	máximo = 4,43 mm							
	mínimo = 0,5 mm							
Velocidade (mm/min)	Avanço	300	300	200	300	300	300	
	Mergulho	150	150	100	150	150	150	
	Rasante	600	600	600	600	600	600	
Duração		20 minutos	56 minutos	3 minutos (por cada trasto)	3 minutos	2 minutos	8 minutos	

- **Desbaste**

Esta estratégia teve como objetivo remover a maior quantidade possível de material do topo da peça, aproximando assim este ao pretendido na geometria final, deixando uma pequena sobre-espessura para se efetuar o acabamento. Este passo permite a posterior maquinação do acabamento e dos detalhes com maior facilidade e com menor desgaste das ferramentas.

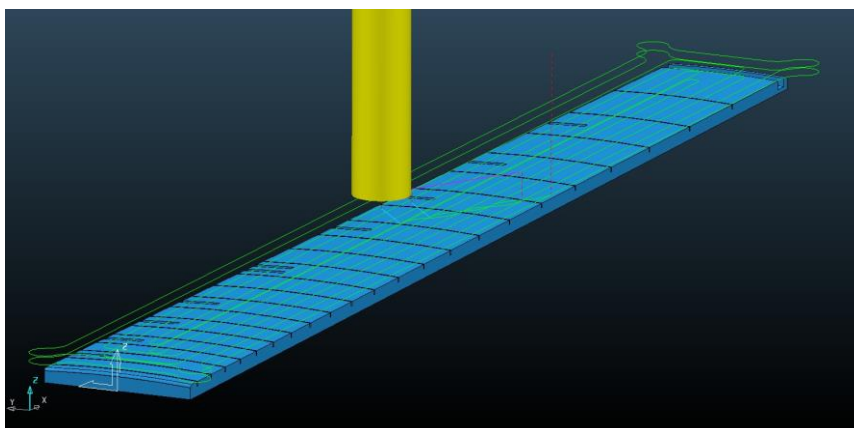


Figura 34 - Estratégia de desbaste do modelo com fresa plana de diâmetro 20 mm.

Para esta estratégia não foi selecionada sobre-espessura, mas foi selecionado um limite inferior de 7 milímetros. Optou-se por esse limite pois a peça tem 6 milímetros na parte mais elevada e também porque não era desejável maquinar o bloco totalmente dos lados da peça até à base, isto para diminuir o tempo de maquinação e para manter a estabilidade da peça nas estratégias seguintes.

- **Acabamento**

Esta estratégia teve como finalidade aproximar o topo da peça ao pretendido na geometria final.

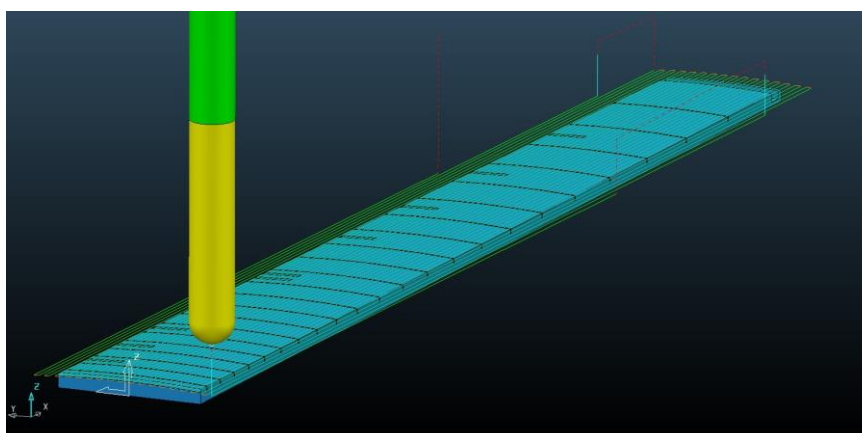


Figura 35 - Estratégia de acabamento do modelo com fresa esférica com 16 mm de diâmetro.

Para esta maquinação, a fim de assegurar que a ferramenta percorresse apenas a superfície (sem tentar entrar nos rasgos), criou-se uma superfície de preenchimento (não visível na imagem anterior). A maquinação foi efetuada com dois sentidos. Selecionou-se uma sobre-espessura com a finalidade de se poder efetuar acabamento manual na peça para se remover as cristas e alisar.

No entanto esta maquinação não foi muito satisfatória devido ao tamanho de crista provocada e à consequente dificuldade em se obter um bom acabamento manual. Por isso foi testado o acabamento em PowerMILL de outras duas formas, ambas com um passo lateral de 1 milímetros que provocaria uma crista de 0.03 milímetros (em vez de 0,126 milímetros) e com maquinação apenas num sentido.

Tabela 2 - Estratégias para acabamento melhorado.

Nome do percurso		Acabamento (ao comprimento)	Acabamento (à largura)	
Ferramenta		Esférica D16	Esférica D16	
Estratégia	Tipo	Acabamento raster	Acabamento raster	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	0,3	0,3	
	Passo (mm)	Lateral	1	1
		Vertical	-	-
	Ligações	Curta	Arco circular	Arco circular
		Longa	Seguro	Seguro
	Entradas	-	-	
	Saídas	-	-	
	Particularidade	Crista aproximada de 0,03 mm	Crista aproximada de 0,03 mm	
Velocidade (mm/min)	Avanço	300	300	
	Mergulho	150	150	
	Rasante	600	600	
Duração		2 horas e 22 minutos	3 horas e 21 minutos	

A primeira seria ao comprimento, como na Figura 35, e a segunda seria com um ângulo de 90 °. A primeira opção, ao comprimento, foi a escolhida como sendo a melhor apenas por uma razão, o tempo de maquinação. Segundo as estatísticas do PowerMILL a primeira demoraria 2 horas e 22 minutos enquanto que a segunda demoraria cerca de 3 horas e 21 minutos. Isto acontece devido aos movimentos de entrada/saída e ligações que seriam em muito maior número no segundo caso.

- **Maquinação de detalhes**

Para a maquinação dos trastos, pestana e marcadores foram utilizadas rampas de entrada e saída para se assegurar que seriam maquinados sem deixar material nas bordas. Os passos verticais foram selecionados tendo em conta que as ferramentas utilizadas são muito finas e que são mais suscetíveis de quebrarem, daí terem passos muito pequenos.

- **Trastos**

Para a maquinação dos trastos foi utilizada a estratégia acabamento por padrão com uma fresa plana de 0,5 milímetros de diâmetro. A seleção desta estratégia deveu-se ao facto de se poder alterar a largura dos trastos simplesmente alterando a ferramenta facilitando assim a maquinação de trastos com diferentes larguras se for pretendido. Para esta estratégia foi necessário criar um padrão que a ferramenta pudesse seguir. Esse padrão foi criado abrindo o PowerSHAPE através do PowerMILL, onde para isso se cria no PowerMILL um padrão vazio e, selecionando as faces necessárias, se clica em “inserir modelagem em arames”. No PowerSHAPE utiliza-se a opção “criar curva bezier” para criar uma linha que acompanhe a curvatura do trasto. O passo vertical escolhido foi de cerca de 0,3 milímetros com o limite máximo nos cortes múltiplos selecionado de 2 milímetros (apesar do trasto ter profundidade de 1,6 milímetros foi selecionado este limite para ter a certeza que a ferramenta não corta demasiado em cada passo devido ao material deixado por estratégias de maquinação anteriores).

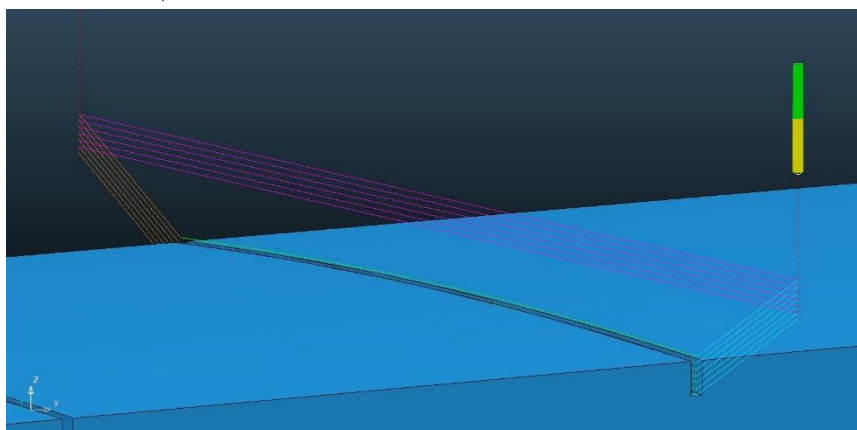


Figura 36 - Estratégia de maquinação de um trasto com fresa plana de 0,5 mm de diâmetro.

- **Pestana**

Para a maquinação da pestana foi utilizada a estratégia swarf com uma fresa plana de 4 milímetros de diâmetro. O passo vertical selecionado foi de 1,5 milímetros com cerca de 4 passos no máximo (seleção efetuada nos passos múltiplos).

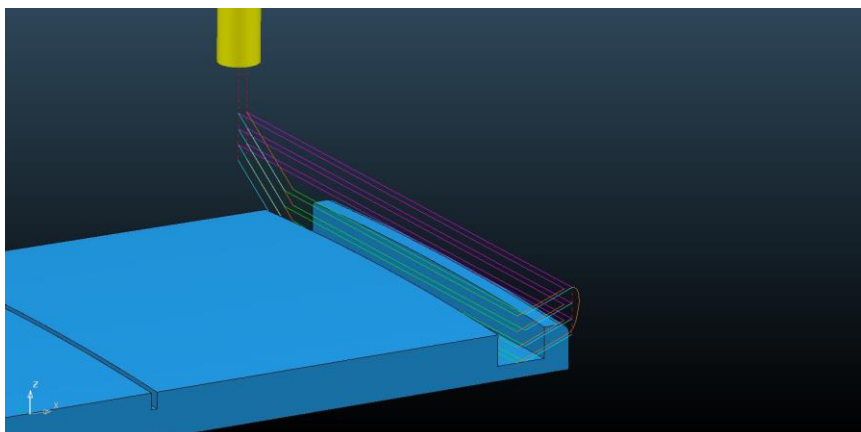


Figura 37 - Estratégia de maquinação da pestana com fresa plana de 4 mm de diâmetro.

- **Marcadores**

A maquinação dos marcadores foi executada utilizando a estratégia swarf com uma fresa plana de 2 milímetros de diâmetro. O passo vertical utilizado foi de 1 milímetros com seleção de 4 cortes (nos cortes múltiplos).

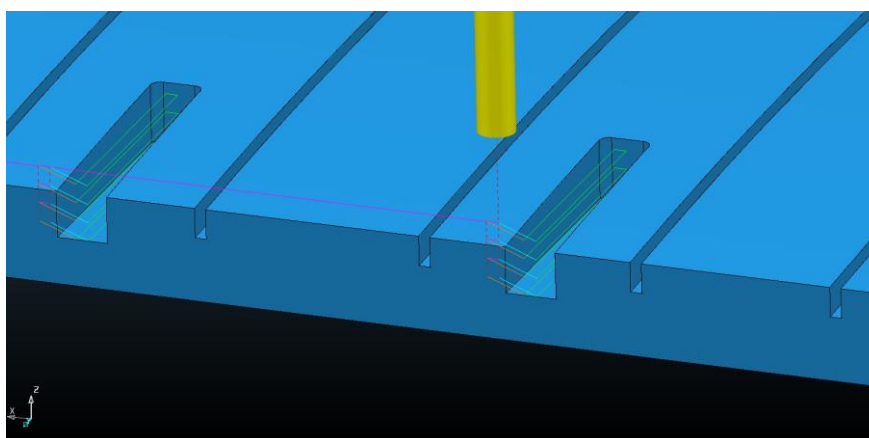


Figura 38 - Estratégia de maquinação de marcadores com fresa plana de 2 mm de diâmetro.

- **Corte lateral**

Aplicou-se a estratégia de Z constante com uma fresa plana de 10 milímetros de diâmetro. Utilizou-se uma fronteira para limitar o alcance da ferramenta, isto para evitar que a ferramenta tentasse entrar nos detalhes maquinados anteriormente. O passo vertical mínimo foi 3 milímetros e selecionou-se um limite inferior aos 0,5 milímetros para permitir que a peça ficasse segura durante a maquinação deste percurso, sendo que o corte final (separação da escala do material excedente) seria executado à mão.

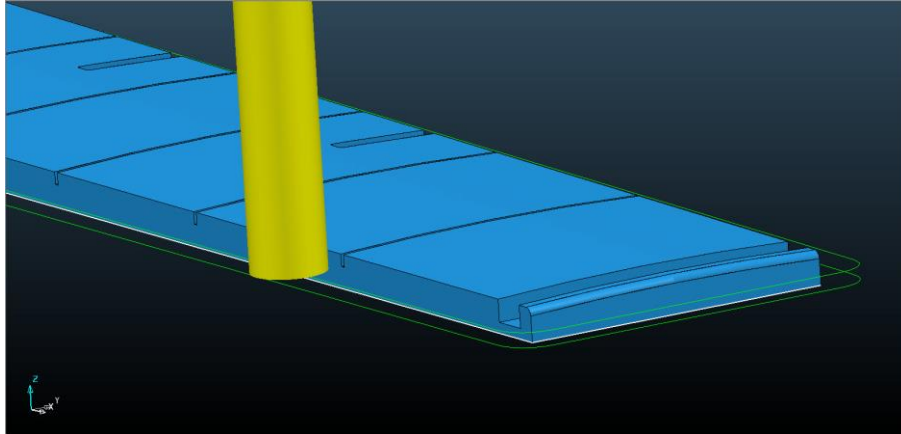


Figura 39 - Estratégia de maquinação de corte lateral com fresa plana de 10 mm de diâmetro.

2 - Tampa “blade” para guitarra

A tampa “blade” é uma pequena tampa, neste caso em fibra de carbono, que fica a tapar a zona onde encaixam os botões de controlo da guitarra.

Esta peça tem aproximadamente 185 milímetros de comprimento, 60 milímetros de largura e 3 milímetros de espessura.



Figura 40 - Fotografia da tampa “blade” aplicada no produto final (elemento em carbono na zona dos botões).

Tabela 3 - Estratégias programadas para a maquinação da tampa “blade”.

Nome do percurso		1 Furo 12 mm	2 Furos 9,5 mm	4 Furos 2 mm	Corte Lateral	
Ferramenta		Broca D12	Broca D9,5	Broca D2	Mó D5	
Estratégia	Tipo	Furação	Furação	Furação	Acabamento Z constante	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	Furo passante	Furo passante	Furo passante	0,2	
	Passo (mm)	Lateral	-	-	-	-
		Vertical	-	-	-	1 a 5
	Ligações	Curta	Seguro	Seguro	Seguro	Seguro
		Longa	Seguro	Seguro	Seguro	Seguro
Entradas		Rampa	Rampa	Rampa	Rampa	
Saídas		Rampa	Rampa	Rampa	Rampa	
Velocidade (mm/min)	Avanço	100	100	100	200	
	Mergulho	75	75	75	100	
	Rasante	600	600	600	600	
Duração		Manual	Manual	Manual	7 minutos (3 passos) 4 minutos (1 passo)	

- **Maquinação de furos**

Programou-se a maquinação dos furos procedendo-se inicialmente à aquisição das figuras na geometria, nomeadamente dos furos.

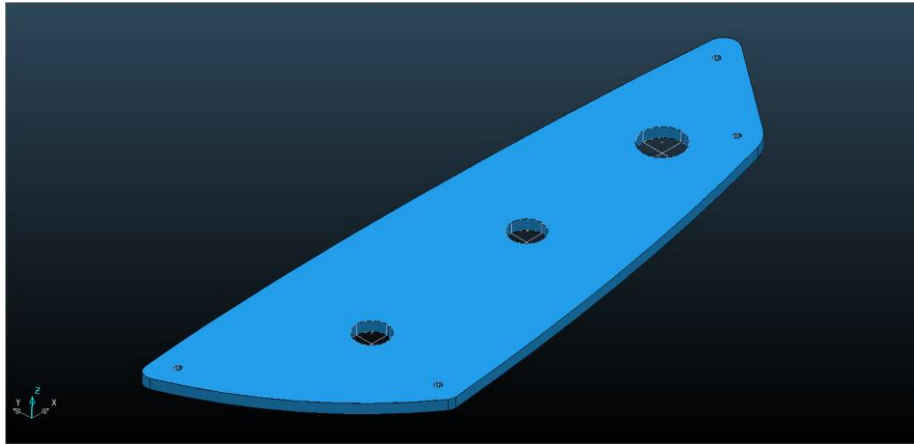


Figura 41 - Tampa "blade" com as geometrias adquiridas para executar os furos.

A maquinação dos furos foi efetuada de forma manual, através de uma alavanca na fresadora que permite a descida manual da broca, sendo que a estratégia programada serviu apenas para levar a broca para a localização correta de cada furo.

- **Corte lateral**

Para esta maquinação aplicou-se a estratégia de Z constante com uma mó de 5 milímetros de diâmetro. Utilizou-se uma mó em vez de uma fresa devido ao material a maquinar ser fibra de carbono. Utilizando uma mó evita-se que haja delaminação das fibras de carbono e que, por isso, fique com um acabamento inferior.

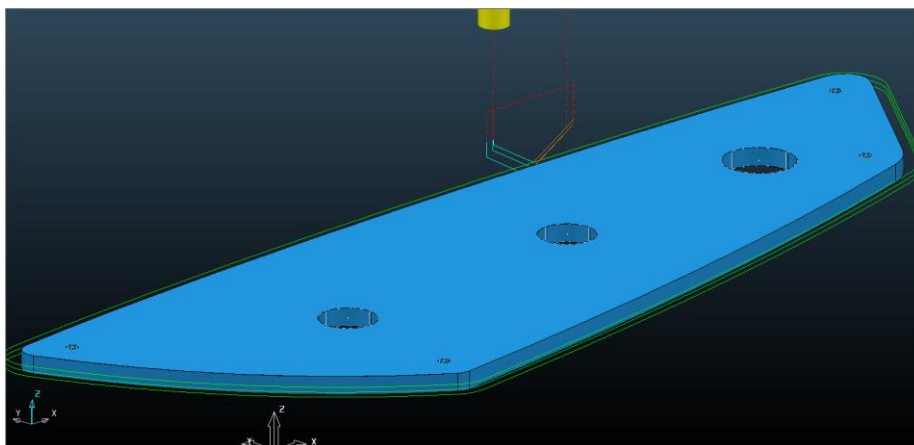


Figura 42 - Estratégia programada para maquinar o corte lateral da tampa "blade" com 3 passos.

Foram testadas duas formas de maquinação para se verificar com qual se obteria melhor acabamento (menor delaminação das fibras de carbono). Para isso experimentou-se maquinar com 3 passos verticais e com apenas 1 passo vertical.

Também se experimentou maquinar uma das peças virada para baixo. A conclusão a que se chegou foi que o melhor acabamento é obtido efetuando o corte lateral com apenas um passo e com a peça virada para cima, isto porque com apenas um passo as fibras apenas sofrem um corte e são menos empurradas sendo que a parte mais distorcida (onde as fibras que foram empurradas) fica na parte de baixo da peça.

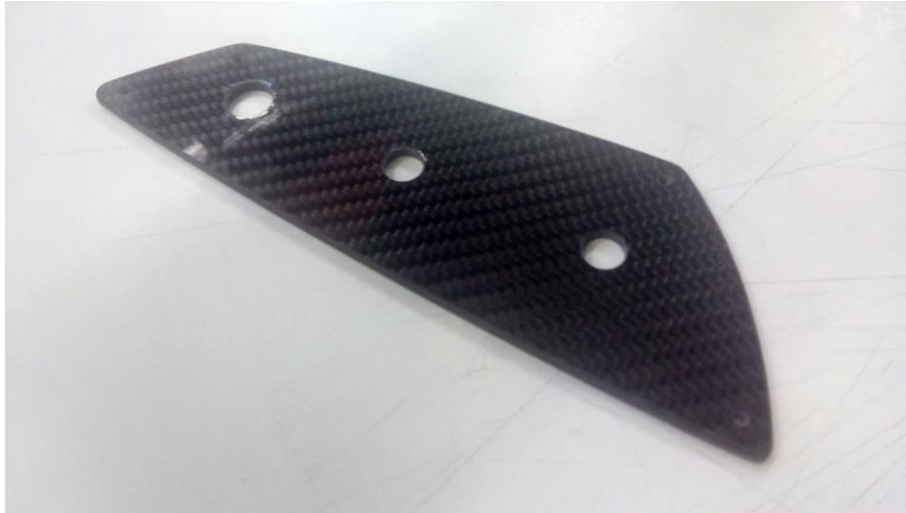


Figura 43 - Fotografia da peça final.

3 - Escala para bandolim

A escala para o bandolim foi produzida no mesmo material que a escala para a guitarra (abordada anteriormente). No entanto devido a se tratar de uma escala para um modelo de volume, ou seja um protótipo para observação de proporções e de detalhes no bandolim, a sua maquinação foi mais simples como se pode observar na escala finalizada abaixo. Esta peça tem 270 milímetros de comprimento, 48 milímetros de largura e 5,8 milímetros de altura máxima.



Figura 44 - Escala para bandolim maquinada.

Devido a não ser necessário a maquinação de detalhes como na escala de guitarra (abordada anteriormente) poupou-se tempo de maquinação. Esta escala, para além de ser menor que a de guitarra, também apresenta um topo plano que permitiu que fosse maquinada com uma fresa de topo enquanto que a escala de guitarra tinha uma curvatura que exigia que fosse maquinada com uma fresa esférica, o que obrigaria a um acabamento mais trabalhoso devido às cristas formadas.

Tabela 4 - Estratégias programadas para a maquinação da escala para bandolim.

Nome do percurso		Desbaste	Acabamento plano	Corte Lateral	
Ferramenta		Toroidal D20R0,8	Topo D10	Topo D10	
Estratégia	Tipo	Desbaste do modelo	Desbaste de modelo	Acabamento Z constante	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	1	0,1	0,1	
	Passo (mm)	Lateral	12	5	-
		Vertical	3	5	3 a 5
	Ligações	Curta	Rasante	Rasante	Rasante
		Longa	Rasante	Rasante	Rasante
	Entradas	Rampa	Rampa	Rampa	
Saídas	Rampa	Rampa	Rampa		
Particularidade		Limite Z	Limite Z	Limites Z	
		mínimo = 4,49 mm	máximo = 6 mm	máximo = 4,5 mm mínimo = 0,5 mm	
Velocidade (mm/min)	Avanço	200	200	200	
	Mergulho	100	100	100	
	Rasante	600	600	600	
Duração		26 minutos	15 minutos	7 minutos	

- **Desbaste**

Para o desbaste utilizou-se a estratégia “desbaste do modelo” com a fresa toroidal D20R0.8. Aplicou-se um limite inferior selecionando na face superior a zona menos espessa, desta forma assegurou-se que todo o modelo ficaria com exatamente a sobre-espessura selecionada, de 1 milímetro, e que não se maquinaria o bloco nas laterais do modelo, permitindo que este se mantivesse estável e seguro nas operações posteriores. As velocidades e o passo vertical e horizontal foram selecionados de acordo com o material a maquinar que apresenta características que não permitem uma maior velocidade.

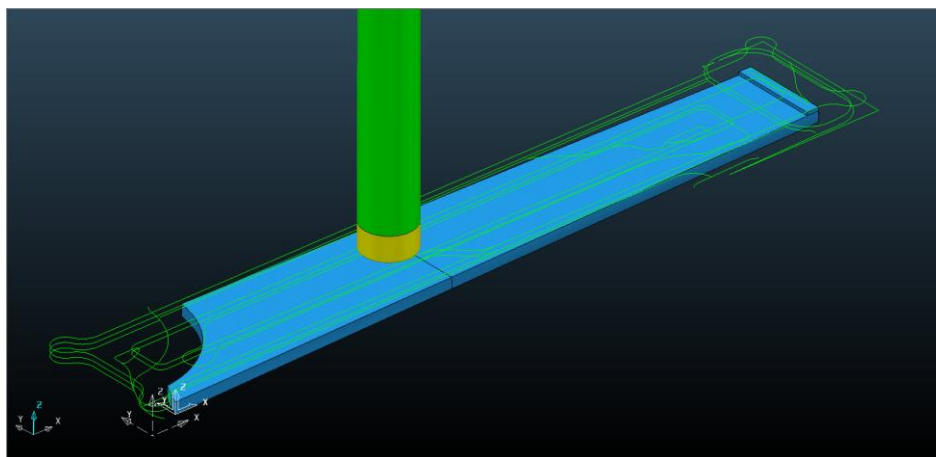


Figura 45 - Estratégia de desbaste do modelo com fresa toroidal D20R0,8 (vista sem ligações e movimentos rápidos).

- **Acabamento plano**

Nesta estratégia também se aplicou o “desbaste do modelo” isto por se tratar de uma área plana. Limitou-se a maquinação utilizando duas fronteiras (visíveis a branco na Figura 46) que limitam a área maior a maquinar e a parte da escala. Selecionou-se uma sobre-espessura de 0,1 milímetros. A seleção de uma sobre-espessura pequena deveu-se ao facto de se tratarem de áreas planas e que, por isso, não necessitariam de muito trabalho de acabamento manual que apenas seria para tirar eventuais marcas de maquinação e para dar brilho.

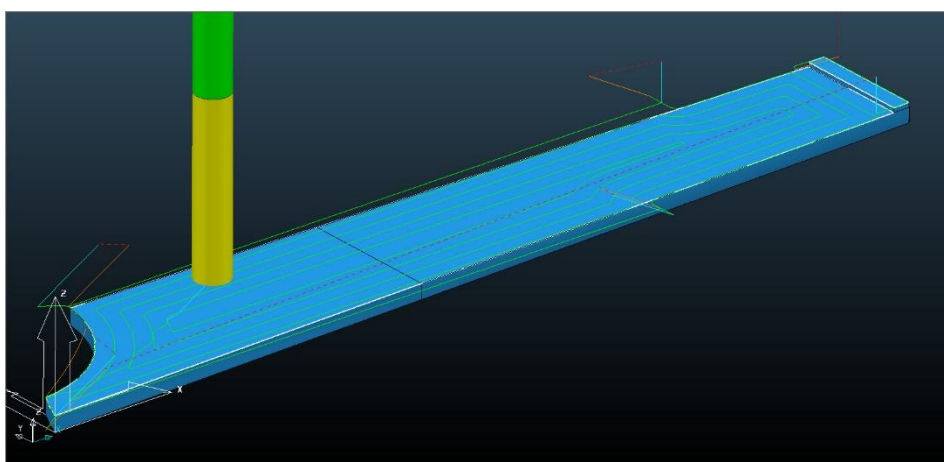


Figura 46 - Estratégia de acabamento do modelo com fresa plana de 10 mm de diâmetro.

- **Corte lateral**

Esta estratégia, executada com “Z constante” com uma fresa plana de 10 milímetros de diâmetro, teve a finalidade de efetuar o corte lateral da peça para facilitar a separação da mesma do material excedente.

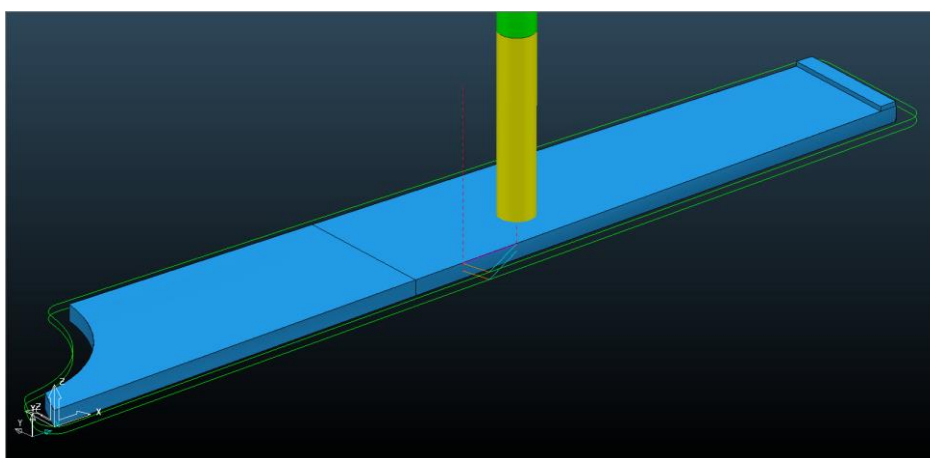


Figura 47 - Estratégia de corte lateral com fresa plana de 10 mm de diâmetro.

Para fazer com que a estratégia fosse apenas aplicada na lateral do modelo selecionou-se um limite superior de 4,5 milímetros, fazendo assim com que a

estratégia não fosse aplicada na pestana e que apenas se maquinasse zonas em que ainda houvesse material (no desbaste removeu-se material até ao limite inferior de 4,49 milímetros com 1 milímetro de sobre-espessura). Selecionou-se também um limite inferior de 0,5 milímetros para que a peça permanecesse estável durante esta estratégia, sendo que a separação final seria feita manualmente.

4 - Cavalete para bandolim

O cavalete para bandolim foi maquinado na fresadora em sikablock (poliuretano de média densidade). Este cavalete foi maquinado para o modelo de volume (assim como a escala para bandolim abordada anteriormente). O cavalete é a peça que auxilia a esticar e a afastar as cordas do tampo do bandolim. Devido à geometria da peça e ao tipo de estratégias utilizadas (mais especificamente no acabamento) a restrição do material fez-se com recurso a cola quente na base da mesma. Como para o acabamento foi necessário maquinar abaixo da peça utilizou-se um pedaço de MDF como base entre o material a maquinar e a mesa da fresadora. Esta peça tem 120 milímetros de comprimento, 6 milímetros de largura e 11,5 de altura máxima.

Tabela 5 - Estratégias programadas para a maquinação do cavalete para bandolim.

Nome do percurso		Desbaste	Acabamento Lateral	
Ferramenta		Topo D10	Esférica D16	
Estratégia	Tipo	Desbaste do modelo	Acabamento Z constante otimizado	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	1,5	0,1	
	Passo (mm)	Lateral	5	0,5
		Vertical	3	-
	Ligações	Curta	Rasante	Rasante
		Longa	Rasante	Rasante
	Entradas	Rampa	Rampa	
Saídas	-	Rampa		
Particularidade	-	Bloco falso com profundidade maior que a peça		
Velocidade (mm/min)	Avanço	300	250	
	Mergulho	150	150	
	Rasante	600	600	
Duração		12 minutos	46 minutos	

- **Desbaste**

Esta estratégia teve como objetivo remover o máximo possível de material em excesso para permitir que se efetue o acabamento na estratégia seguinte. Devido à curvatura do modelo deixou-se uma sobre-espessura de 1,5 milímetros de material para assegurar que durante o desbaste não fosse removido demasiado material.

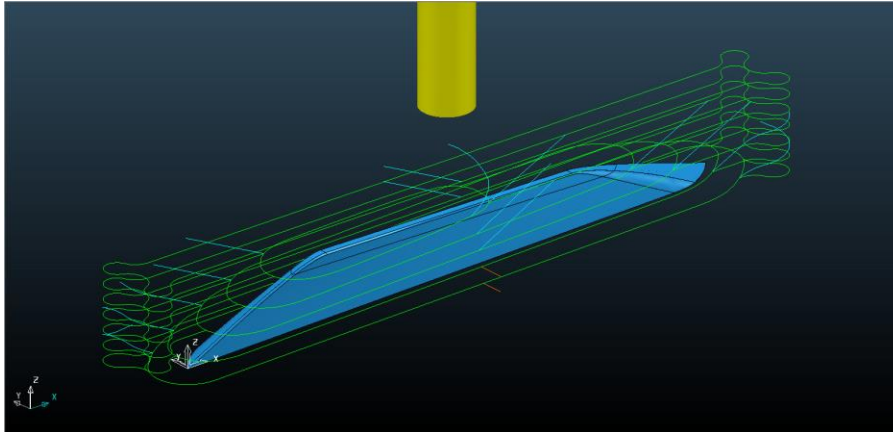


Figura 48 - Estratégia de desbaste do cavalete de bandolim com fresa de topo D10 (vista sem movimentos rápidos).

- **Acabamento lateral**

Para o acabamento lateral foi necessário criar um “bloco falso” mais fundo 8 milímetros que o bloco da peça a maquinar. Fez-se isto com a finalidade de levar o PowerMILL a pensar que poderia maquinar a peça até um nível inferior, isto para se conseguir acabar a peça totalmente com a fresa esférica de 16 milímetros de diâmetro. Obviamente, como se referiu na introdução desta peça, teve que se colocar uma placa de MDF para servir de espaçador entre a peça a maquinar e a mesa da fresadora a fim de se maquinar os 8 milímetros extra no MDF e não na mesa da fresadora.

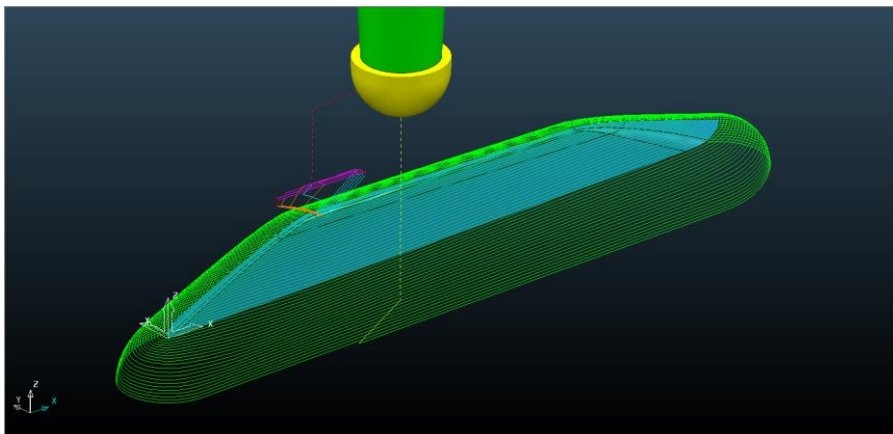


Figura 49 - Estratégia de maquinação do acabamento lateral com recurso a um bloco falso com fresa esférica D16R8.

Para criar a estratégia ilustrada acima foi necessário eliminar partes do percurso que não interessariam, mais propriamente os cantos. A estratégia utilizada foi a “Z constante otimizado” ao invés da estratégia “Z constante” porque a versão otimizada faz com que cada passo esteja exatamente à mesma distância do anterior independentemente da inclinação do modelo, ao contrário da versão não otimizada

que faria mais passos numa zona inclinada e menos numa zona mais perto do vertical. Assim assegurou-se um acabamento igual em toda a peça.

5 - Chassis de fórmula student

Esta foi a primeira peça com a maquinação inteiramente programada pelo dissertando para execução a 3+2 eixos na célula robótica (as anteriores foram todas executadas a 3 eixos na fresadora). A peça final tem aproximadamente 2000 mm de comprimento, por 1570 mm de largura e 200 mm de altura no seu ponto mais alto.

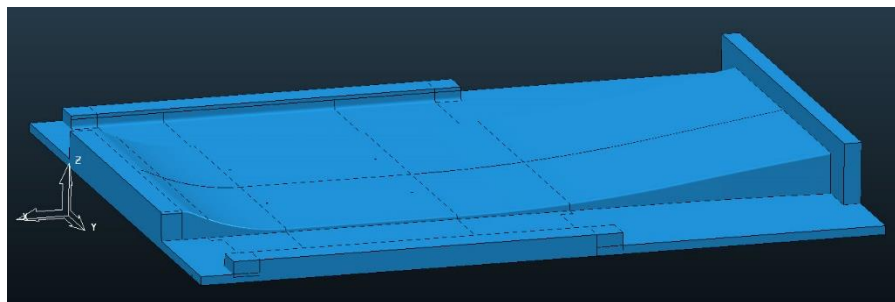


Figura 50 - Modelo importado para o PowerMILL.

O tamanho da peça obrigou a que se tivesse que maquinar a peça em duas partes, isto devido aos limites de eixos do robô. Na Figura 50 pode-se observar a peça a maquinar. A linha de apartação selecionada foi exatamente a linha que percorre o comprimento da peça ficando assim uma peça a maquinar com 635 mm de largura e outra com 935 mm de largura.

Preparação dos blocos de cortiça

Os blocos para a maquinação desta peça tinham inicialmente 640 milímetros por 940 milímetros por 200 milímetros de altura. Para haver apartações direitas e para haver a certeza que os blocos assentariam todos direitos (poderia haver empenamento dos blocos) efetuou-se uma maquinação para os retificar nas faces em que haveria união entre blocos e na face que ficaria virada para baixo. Foram todos retificados no topo (para posteriormente serem virados para baixo) removendo cerca de 5 milímetros de espessura. Nas laterais removeu-se cerca de 4 milímetros a cada lateral que iria estar em contacto com outro bloco. Para utilizar esta estratégia nas laterais foi necessário criar um plano de trabalho em cada face.

Tabela 6 - Estratégias aplicadas no facejamento dos blocos.

Nome do percurso	Estratégia	Ferramenta	Passo lateral	Entrada	Saída	Avanço de corte	Avanço de mergulho
Facejamento Lateral	Acabamento Raster	Toroidal D20R0.8	15	Rampa	-	5000	500
Facejamento de Topo	Fresagem de topo	Toroidal D20R0.8	19	Rampa	-	9000	800

Na Tabela 6 o percurso denominado facejamento lateral foi assim denominado na tabela pois a estratégia aplicada para todas as faces laterais foi idêntica (tendo apenas que se mudar o plano de trabalho e calcular), não sendo por isso necessário repetir a estratégia na tabela com nomes diferentes para cada lado.

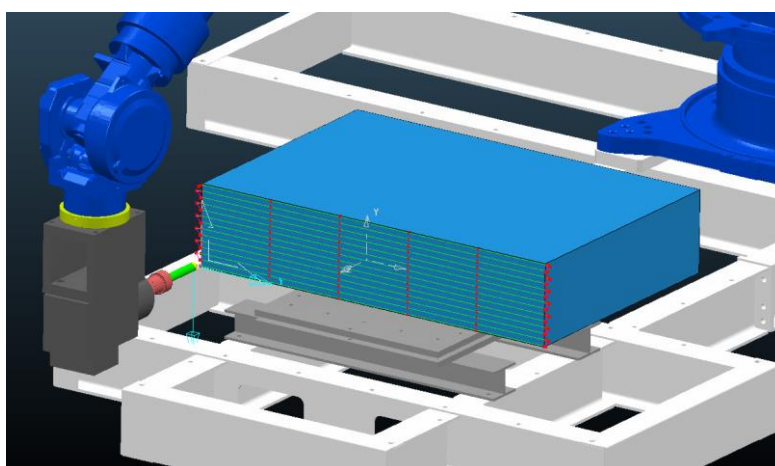


Figura 51 - Exemplo da estratégia de maquinação de uma lateral de um bloco.

Na Figura 51 pode-se observar a distribuição de pontos na estratégia (pontos vermelhos na figura). Normalmente a distribuição, devido a se tratarem de linhas retas, faria com que apenas existissem pontos nas pontas do percurso. Para evitar problemas efetuou-se uma redistribuição de pontos com distância máxima de 200 milímetros.

Maquinação do chassis

Tal como foi referido anteriormente foi necessário maquinar o chassis em duas partes. Para garantir uma posterior apartação perfeita entre estas duas metades utilizou-se o mesmo plano de trabalho de exportação em ambas.

As estratégias de maquinação foram idênticas para as duas metades e estão resumidas na Tabela 7.

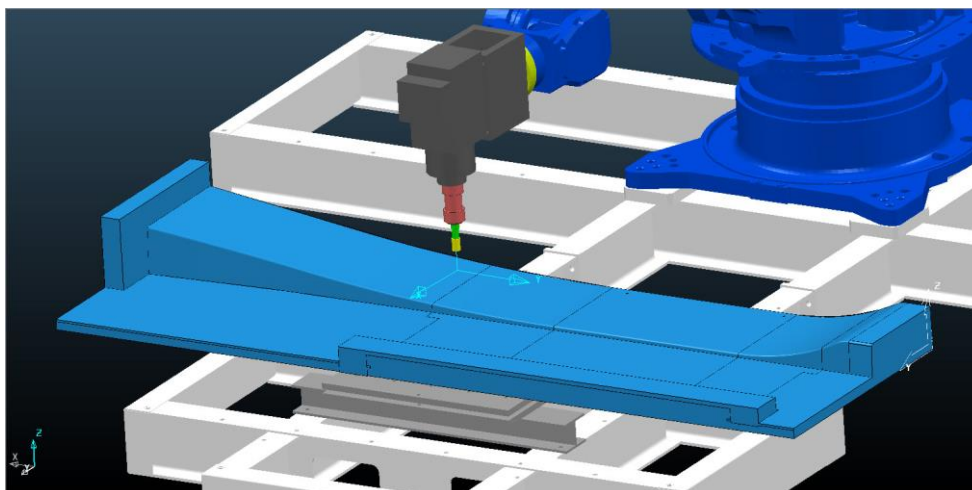


Figura 52 - Metade menor do chassis do chassis do fórmula student.

Tabela 7 - Estratégias aplicadas na maquinação do chassis.

Nome do percurso		Desbaste	Re-desbaste	Acabamento plano	Acabamento vertical	Acabamento de cantos	
Ferramenta		Topo D20	Toroidal D20R0,8	Esférica D16	Esférica D16	Toroidal D20R0,8	
Estratégia	Tipo	Desbaste do modelo	Desbaste de resíduo do modelo	Acabamento raster	Acabamento Z constante	Acabamento de cantos pencil	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	3	3	0	0	0	
	Passo (mm)	Lateral	18	18	1,5	-	-
		Vertical	28	8	-	1,5 a 5	-
	Ligações	Curta	Arco circular	Arco circular	Arco circular	Arco circular	Arco circular
		Longa	Rasante	Rasante	Rasante	Rasante	Rasante
	Entradas	Rampa	Rampa	Rampa	Rampa	Rampa	
Saídas	-	-	-	-	-		
Velocidade (mm/min)	Avanço	7000	7000	5000	5000	8000	
	Mergulho	1000	1000	1000	1000	1000	
	Rasante	10000	10000	10000	10000	10000	
Duração	Metade da peça	Maior	1 hora e 47 minutos	22 minutos	4 horas e 28 minutos	39 minutos	< 1 minuto
		Menor	1 hora e 29 minutos	19 minutos	3 horas	35 minutos	< 1 minuto

As velocidades de avanço apresentadas foram as inicialmente programadas, mas ao se observar que era possível maquinar a uma velocidade superior, especialmente no desbaste, optou-se por efetuar no controlador “Speed Override” (alteração direta da velocidade em percentagem) para 120 % ou superior (até ao máximo de 150 %) diminuindo consideravelmente o tempo de maquinação.

- **Desbaste**

Para executar a estratégia de desbaste teve que se efetuar um modelo maquinado para se evitar colisões (pode-se observar uma das zonas problemáticas do modelo na Figura 53).

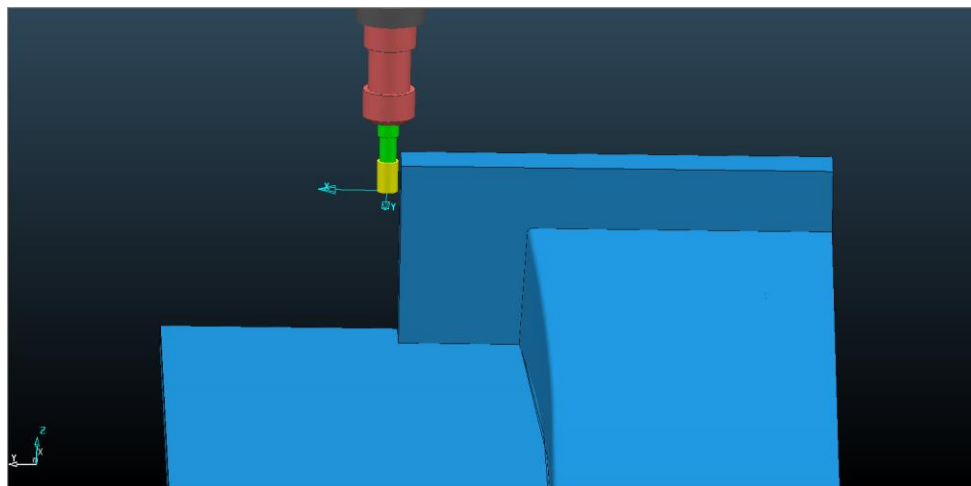


Figura 53 - Exemplo de uma zona do modelo que seria suscetível de ter colisões.

Devido à altura da ferramenta ser muito inferior à altura do modelo a maquinar foi necessário criar um modelo maquinado sobre modelo maquinado da seguinte forma:

1. Cria-se inicialmente o percurso de maquinação. Depois efetua-se os passos seguintes:
 - Efetua-se uma verificação de colisões com o modelo e seleciona-se a opção para dividir o percurso entre movimentos seguros e não seguros;
 - Apaga-se a parte do percurso referente aos movimentos não seguros;
 - Cria-se um modelo maquinado com o percurso com os movimentos seguros.
2. Com o percurso efetuado para o modelo maquinado atual segue-se estes passos:
 - Verifica-se novamente as colisões com divisão do percurso, neste caso selecionando a verificação contra “modelo maquinado”;
 - Se ainda houver colisões recalcula-se o modelo maquinado com novo percurso que contém os movimentos seguros e volta-se ao ponto 2;
 - Se não houver colisões temos o percurso calculado corretamente.

No final obteve-se um modelo maquinado como se pode observar na Figura 54 (na mesma zona que se observou na Figura 53).

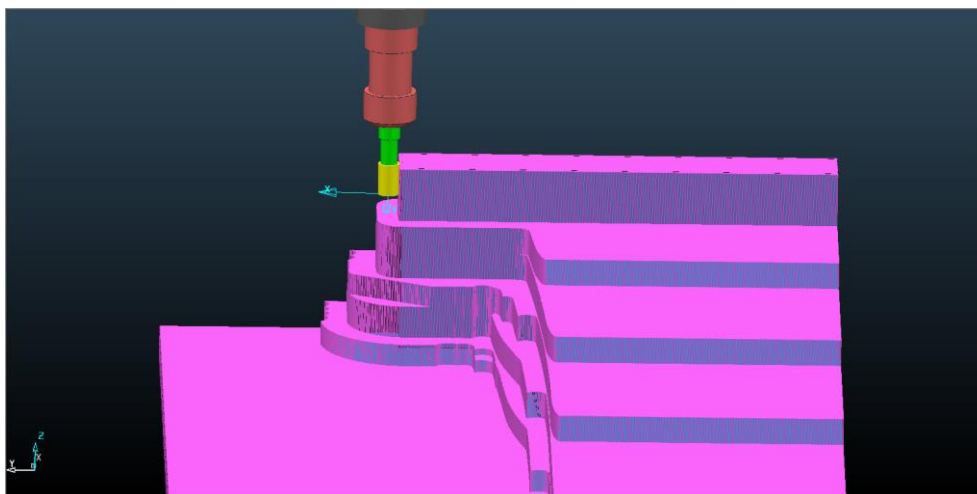


Figura 54 - Exemplo de um zona do modelo em que se teve que utilizar o modelo maquinado para evitar colisões.

- **Re-desbaste**

O re-desbaste foi efetuado a partir do modelo maquinado mas com outra ferramenta para se conseguir remover material de algumas zonas que não eram acessíveis com a ferramenta anterior e para, através do passo vertical inferior, diminuir a quantidade de material que teria de ser removido no acabamento. No entanto mesmo após este re-desbaste ainda permaneceu um pedaço de material que teve que ser removido manualmente (ver Figura 55).

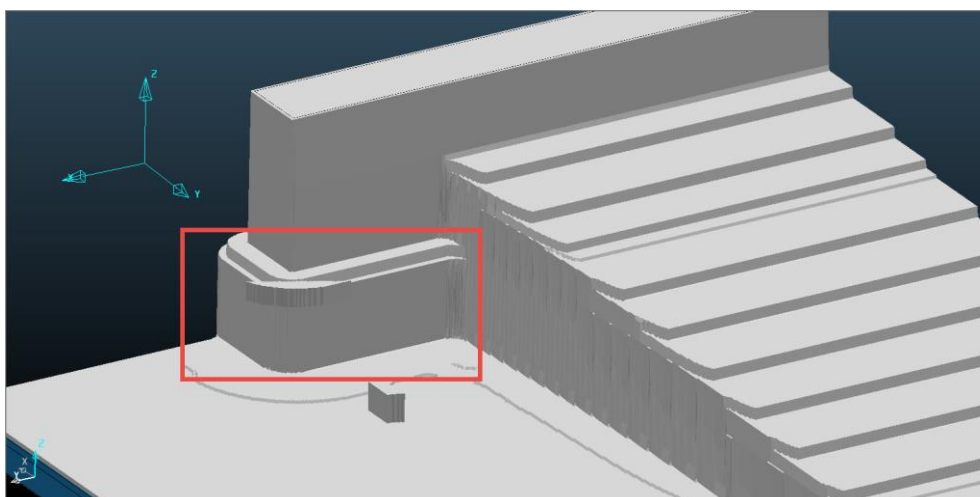


Figura 55 - Simulação em ViewMILL para mostrar a zona que se teve que remover manualmente.

- **Acabamento plano e acabamento vertical**

As duas estratégias de acabamento seguintes, plana e vertical, foram programadas para deixar uma crista quase impercetível (com cerca de 0,07 mm) para diminuir o tempo necessário para o acabamento manual.

- **Acabamento de cantos**

Por fim a estratégia “acabamento de cantos” teve como objetivo cortar os cantos que tinham sido arredondados pela ferramenta esférica utilizada nos acabamentos anteriores de forma a que estes ficassem com 90 °.

No final a peça obtida estava de acordo com o especificado e de acordo com o desenho CAD fornecido.

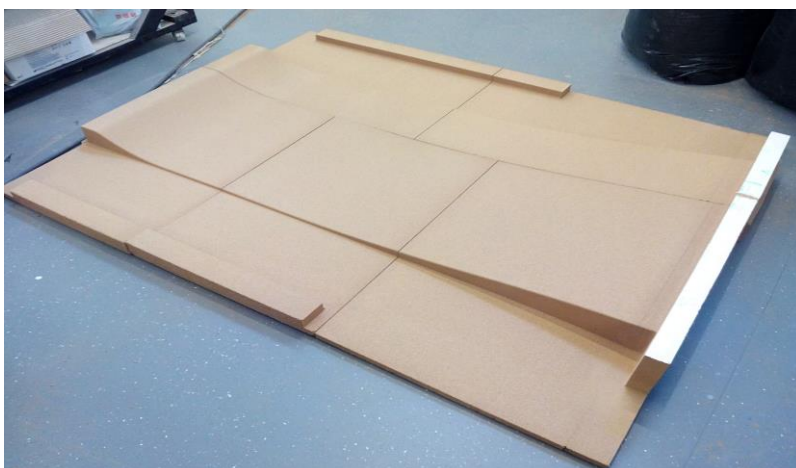


Figura 56 - Fotografia da peça final acabada completa.

Capítulo 4 - Trabalho proposto pela empresa

Foi proposto pela empresa o início da criação de uma base de dados para se poder aplicar à maquinação de diferentes materiais com especial incidência na cortiça que, visto ser um material pouco maquinado a nível mundial, ainda tem muita pouca informação acerca do mesmo.

Inicialmente foi efetuada uma pesquisa bibliográfica para determinar as propriedades principais a ter em conta, assim como a interligação entre elas. Após a pesquisa chegou-se à conclusão que as duas propriedades de corte fundamentais para a maquinação seriam o *feedrate* por cada dente da ferramenta e a velocidade tangencial da ferramenta.

O *feedrate* por cada dente é expresso em milímetros por dente e pode ser calculado com a seguinte fórmula:

$$s_z = \frac{s'}{Z \times n}$$

Figura 57 - Fórmula de cálculo do feedrate por dente.

Onde s' é o avanço da mesa, Z é o número de dentes e n o número de rotações por minuto (RPM).

O número de rotações por minuto é obtido através da frequência que se seleciona no spindle do robô. O valor máximo para o robô é cerca de 250 Hz que corresponde a 15000 RPM e o valor mínimo é cerca de 50 Hz que corresponde a 3000 RPM.

A velocidade tangencial da ferramenta é expressa em radianos por segundo e é calculada a partir dos RPM com a seguinte fórmula:

$$\omega = n \times \frac{2\pi}{60}$$

Figura 58 - Fórmula de cálculo da velocidade tangencial.

Onde n é o número de rotações por minuto (RPM) como na fórmula anterior.

Método experimental

Foi criado no PowerSHAPE um corpo de teste para se testar o efeito de diferentes velocidades tangenciais e *feedrates* por dente no material (ver Figura 59). Esse corpo de teste foi maquinado a partir de um bloco de cortiça deixando uma sobre-espessura para efetuar os testes necessários.

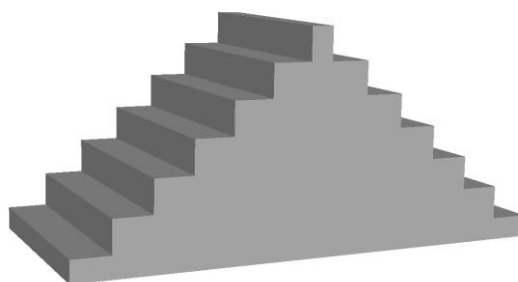


Figura 59 - Corpo de teste criado no PowerSHAPE.

Para o primeiro teste decidiu-se efetuar testes num dos lados da pirâmide com uma passagem por cada degrau mantendo a velocidade do spindle no valor máximo de 250 Hz e modificou-se a velocidade de avanço da mesa, obtendo assim *feedrates* diferentes em cada degrau. Posteriormente selecionou-se, através de avaliação táctil e visual, o degrau que apresentava o acabamento com o *feedrate* mais elevado possível que se pudesse considerar aceitável, isto porque o que interessa em ambiente de maquinação real de peças é ter o melhor acabamento possível no menor tempo possível para diminuir custos de produção. Depois de se selecionar o valor de *feedrate* ideal maquinou-se o lado oposto da pirâmide mantendo o *feedrate* constante mas utilizando velocidades de spindle diferentes (e conseqüentemente velocidades de avanço da mesa também diferentes para manter o *feedrate*) para se verificar se o acabamento se manteria igual em todos os degraus, o que se veria a confirmar. Após este teste decidiu-se que o mais lógico seria dar apenas importância ao *feedrate* por dente, excluindo definitivamente a velocidade tangencial do trabalho.

Devido à conclusão tirada do primeiro teste decidiu-se que para os testes seguintes apenas se maquinaria meia pirâmide.

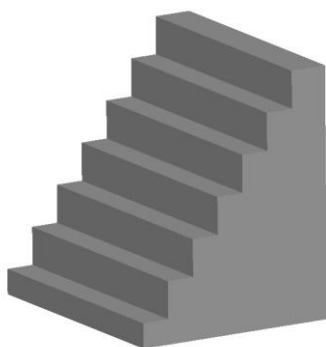


Figura 60 - Corpo de teste de meia pirâmide criada no PowerSHAPE.

Sendo assim os testes seguintes foram efetuados de forma igual à primeira metade da primeira pirâmide com testes alterando o feedrate por cada degrau.

Materiais a testar

Para este trabalho foram disponibilizados alguns tipos de cortiça para serem testados. Existem vários tipos de cortiça e nas figuras seguintes podem-se observar algumas diferenças nos tipos de cortiça como granulometria e cor. Outras diferenças mais notórias ao tato são a dureza e a densidade.



Figura 61 - Exemplos de tipos de cortiça 1.



Figura 62 - Exemplos de tipos de cortiça 2.



Figura 63 - Exemplos de tipos de cortiça 3.

Ferramenta utilizada

A ferramenta utilizada no primeiro teste foi uma fresa de topo com 20 milímetros de diâmetro com 4 lâminas. Nos outros testes a fresa utilizada foi uma idêntica à anterior mas com 25 milímetros de diâmetro. A única razão desta mudança foi o facto de se tratar de uma fresa experimental que se encontrava na empresa para testes e entretanto a primeira foi substituída pela segunda. A escolha desta ferramenta em detrimento de outras focou-se no facto de se tratar da ferramenta (das disponíveis na empresa) que em maquinações anteriores apresentou melhor comportamento em situações de desgaste. Devido a isto achou-se que seria interessante efetuar testes com esta ferramenta em situações de acabamento.



Figura 64 - Fotografia da fresa de topo de 20 milímetros.

Testes práticos efetuados

Teste de sentido de corte

No primeiro corpo de teste, para além do que já foi referido anteriormente no método experimental, também foi efetuado um teste suplementar para se saber se se obteria melhor acabamento superficial a maquinar no sentido concordante ou no sentido discordante.

O resultado pode ser observado na Figura 69 e na Figura 70 nos anexos. Como se pode observar, apesar da dificuldade encontrada em mostrar os resultados em fotografia, a maquinação no sentido discordante origina melhores resultados no acabamento da superfície.

Cortiça 8122

Esta cortiça foi a primeira testada e na qual se efetuou o teste de sentido de corte mencionado anteriormente, teste este efetuado antes de se executar o desbaste. Os testes de diferentes feedrates foram efetuados com as estratégias descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Estratégias utilizadas no teste da cortiça 8122 na metade esquerda da pirâmide.

Nome do percurso		Desbaste	Teste acabamento	
Ferramenta		Topo D20	Topo D20	
Estratégia	Tipo	Desbaste do modelo	Swarf	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	5	0	
	Passo (mm)	Lateral	15	-
		Vertical	20	-
	Ligações	Curta	Arco circular	Arco circular
		Longa	Rasante	Rasante
	Entradas	Rampa	Rampa	
Saídas	Rampa	Rampa		
Velocidade (mm/min)	Avanço	4000	2000 a 17000 (incrementos de 3000)	
	Mergulho	1000	1000	
	Rasante	8000	8000	
Duração		14 minutos	< 1 minuto	

Resultados

O acabamento melhor para o feedrate maior possível foi o correspondente ao avanço de 8000 milímetros por minuto, ou seja feedrate de 0,13 milímetros por dente.

Devido a isto, e como já foi referido anteriormente no método experimental, no outro lado da pirâmide manteve-se o feedrate constante e mudou-se a velocidade tangencial para se testar se esta teria alguma influência notória.

As rotações por minuto e os avanços utilizados foram os presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Rotações por minuto e avanço utilizados em Swarf no lado direito da pirâmide.

Nível	RPM (Hz)	Avanço
1 (Topo)	3000 (50)	1600
2	5100 (85)	2820
3	7200 (120)	3840
4	9300 (155)	4960
5	11400 (190)	6080
6 (base)	13500 (225)	7200

O acabamento obtido foi praticamente idêntico em todas as passagens pelo que se concluiu que para nos testes seguintes apenas se teria em conta a mudança de feedrate por dente, excluindo assim dos testes a velocidade tangencial.

Cortiça 8003

Para testar esta cortiça utilizou-se as mesmas estratégias e velocidades descritas na Tabela 8 referente à cortiça 8122. Apenas se alterou o passo vertical para 18 milímetros no desbaste. Devido a isso e por se tratar de apenas meia pirâmide demorou apenas 4 minutos e 30 segundos.

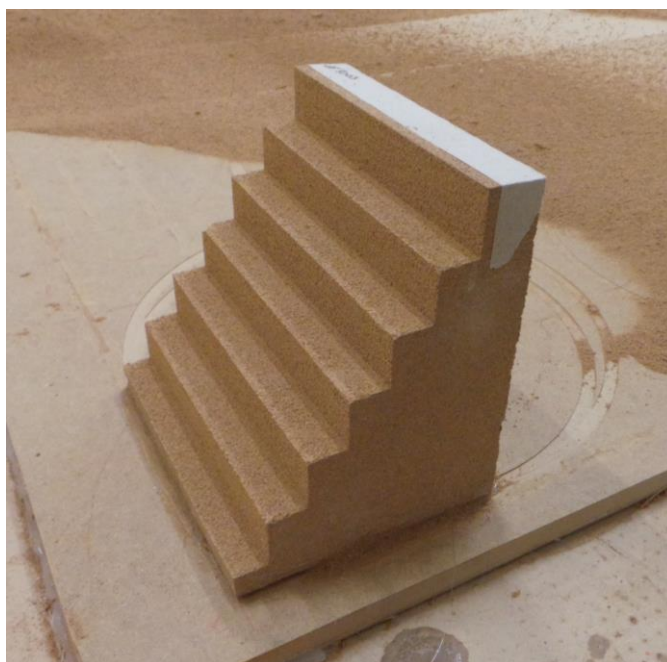


Figura 65 - Corpo de teste em cortiça 8003 após desbaste.

Resultados

O feedrate maior possível em que se obteve acabamento aceitável foi o referente ao avanço de 5000 milímetros por minuto, o que corresponde a um feedrate de 0,083 milímetros por dente.

Cortiça 9436 e 8303

Para estas cortiças, devido à sua maior dureza teve que se alterar as estratégias aplicadas. Podem ser observadas na Tabela 10.



Figura 66 - Corpo de teste em cortiça 9436 após desbaste.

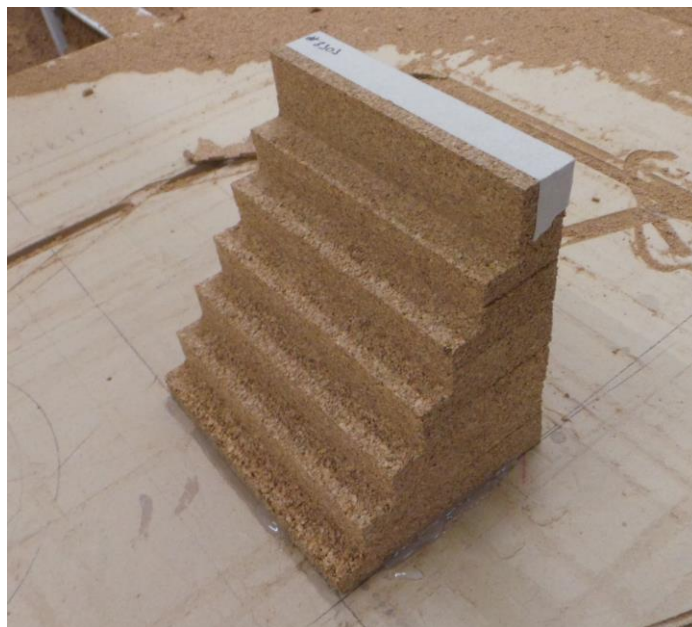


Figura 67 - Corpo de teste em cortiça 8303 após desbaste.

Tabela 10 - Estratégias utilizadas para testar as cortiças 9436 e 8303.

Nome do percurso		Desbaste	Teste acabamento	
Ferramenta		Topo D20	Topo D20	
Estratégia	Tipo	Desbaste do modelo	Swarf	
	Tolerância (mm)	0,1	0,1	
	Sobre-espessura (mm)	5	0	
	Passo (mm)	Lateral	18	-
		Vertical	10	-
	Ligações	Curta	Arco circular	Arco circular
		Longa	Rasante	Rasante
	Entradas	Rampa	Rampa	
Saídas	Rampa	Rampa		
Velocidade (mm/min)	Avanço	2000	2000 a 12000 (incrementos de 2000)	
	Mergulho	1000	1000	
	Rasante	8000	8000	
Duração		11 minutos	< 1 minuto	

Resultados

Na cortiça 9436 o feedrate maior possível em que se obteve acabamento aceitável foi o referente ao avanço de 2000 milímetros por minuto, o que corresponde a um feedrate de 0,033 milímetros por dente, enquanto que na cortiça 8303 o feedrate foi o referente ao avanço de 4000 milímetros por minuto, o que corresponde a um feedrate de 0,066 milímetros por dente.

Resultados gerais

Na tabela seguinte estão compilados os feedrates correspondentes às cortiças testadas.

Tabela 11 - Compilação dos resultados obtidos.

Cortiça	Feedrate (mm/dente)
8122	0,13
8003	0,083
9436	0,033
8303	0,066

Esta tabela permite saber rapidamente, caso se utilizem ferramentas com diferente número de dentes, qual a velocidade de avanço para se conseguir obter um acabamento aceitável. Para tal basta aplicar a fórmula da Figura 57 multiplicando o feedrate pelo número de dentes e pelas rotações por minuto utilizadas, obtendo-se a velocidade de avanço.

Conclusão e continuidade do trabalho proposto pela empresa

O trabalho proposto pela empresa é um trabalho a ter continuidade. Os testes não foram mais abrangentes devido à grande quantidade de tipos diferentes de cortiça presentes no mercado e devido à falta de disponibilidade de tempo de utilização da célula robótica. Os testes efetuados foram apenas referentes aos tipos de cortiça apresentados e os resultados obtidos foram categorizados segundo inspeção visual e táctil do dissertando, pelo que podem não ser concordantes com testes que possam vir a ser efetuados por outros devido à possibilidade de divergência de critérios.

Os resultados foram obtidos apenas com uma fresa de topo com 25 milímetros de diâmetro (e inicialmente com uma idêntica mas com 20 milímetros de diâmetro). Escolheu-se esta fresa devido a ser a fresa disponível na empresa que apresenta melhor comportamento para trabalhos de desbaste e, devido a isso, seria interessante saber o seu comportamento em tarefas de acabamento, para assim se poder fazer desbaste e acabamento com a mesma fresa (se o perfil do modelo assim o permitir).

Sugestões de melhoria

Para haver um estudo mais aprofundado será necessário efetuar testes com outros tipos de fresas, como fresas toroidais e fresas esféricas visto estas poderem apresentar resultados diferentes devido ao perfil de corte diferente. Outro ponto para aprofundar a qualidade do estudo será efetuar corpos de teste de perfis com curvatura para se obterem dados referentes a esse tipo de maquinação. Por último para completar o estudo dever-se-á abranger os testes à quantidade maior possível de cortiças existentes no mercado.

Conclusão geral

Esta dissertação em ambiente empresarial permitiu ao dissertando a aplicação dos conhecimentos obtidos previamente em CAD e CAM, proporcionando assim uma experiência prática que não poderia ser obtida de outra forma.

Tive uma aprendizagem prática de utilização da célula robótica e da fresadora CNC que me permitem executar maquinações de uma forma praticamente autónoma.

Devido a tudo isto sinto que fiquei mais preparado para o mercado de trabalho.

Referências bibliográficas

- [1] Norcam, Engenharia e design industrial [Online]. Available: <http://www.norcam.pt/home/a-norcam/> [Accessed: Nov-2014]
- [2] Yaskawa Motoman Robotics, ES165D/ES200D Robots [Online]. Available: www.motoman.com/datasheets/ES165D_ES200D.pdf [Accessed: Nov-2014]
- [3] Yaskawa Motoman Robotics, DX100 Robot/System Controller [Online]. Available: www.motoman.com/datasheets/DX100%20Controller.pdf [Accessed: Nov-2014]
- [4] Optimum Maschinen - Germany, Opti BF 46 Vario [Online]. Available: http://www.optimum-machines.com/fileadmin/Produkte/Optimum/Erlaeuterungen/GB/3338453_GB_08.pdf [Accessed: Nov-2014]

Anexos

Estas imagens estão presentes nos anexos ou por mostrarem a localização das teclas todas do controlador referidas anteriormente (no caso da Figura 68) ou então por ser necessário ter a imagem em tamanho muito grande para se conseguir ver os detalhes descritos (no caso da Figura 69 e Figura 70).



Figura 68 - Fotografia da zona dos botões no controlador.

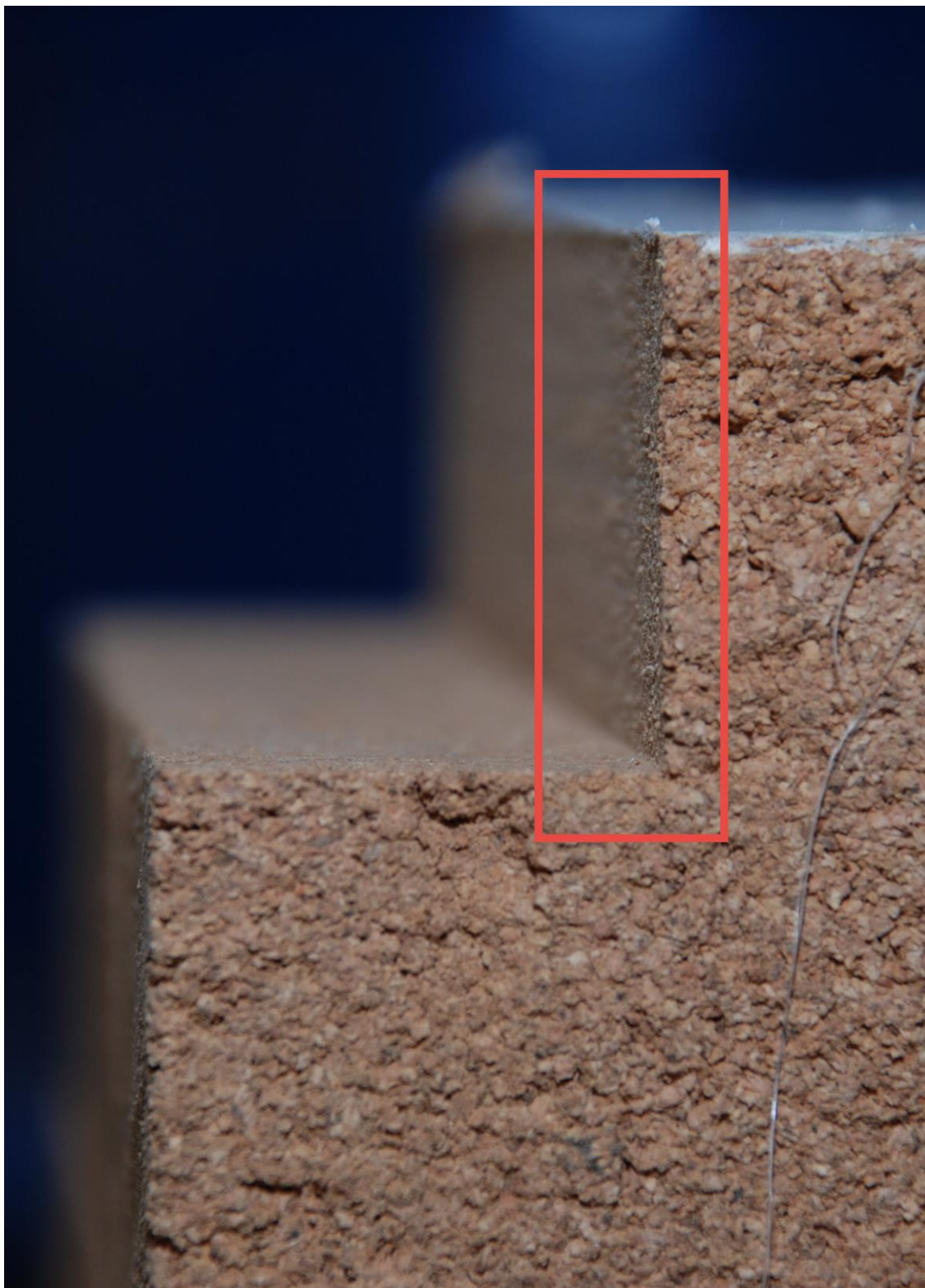


Figura 69 - Teste de maquinação no sentido concordante.

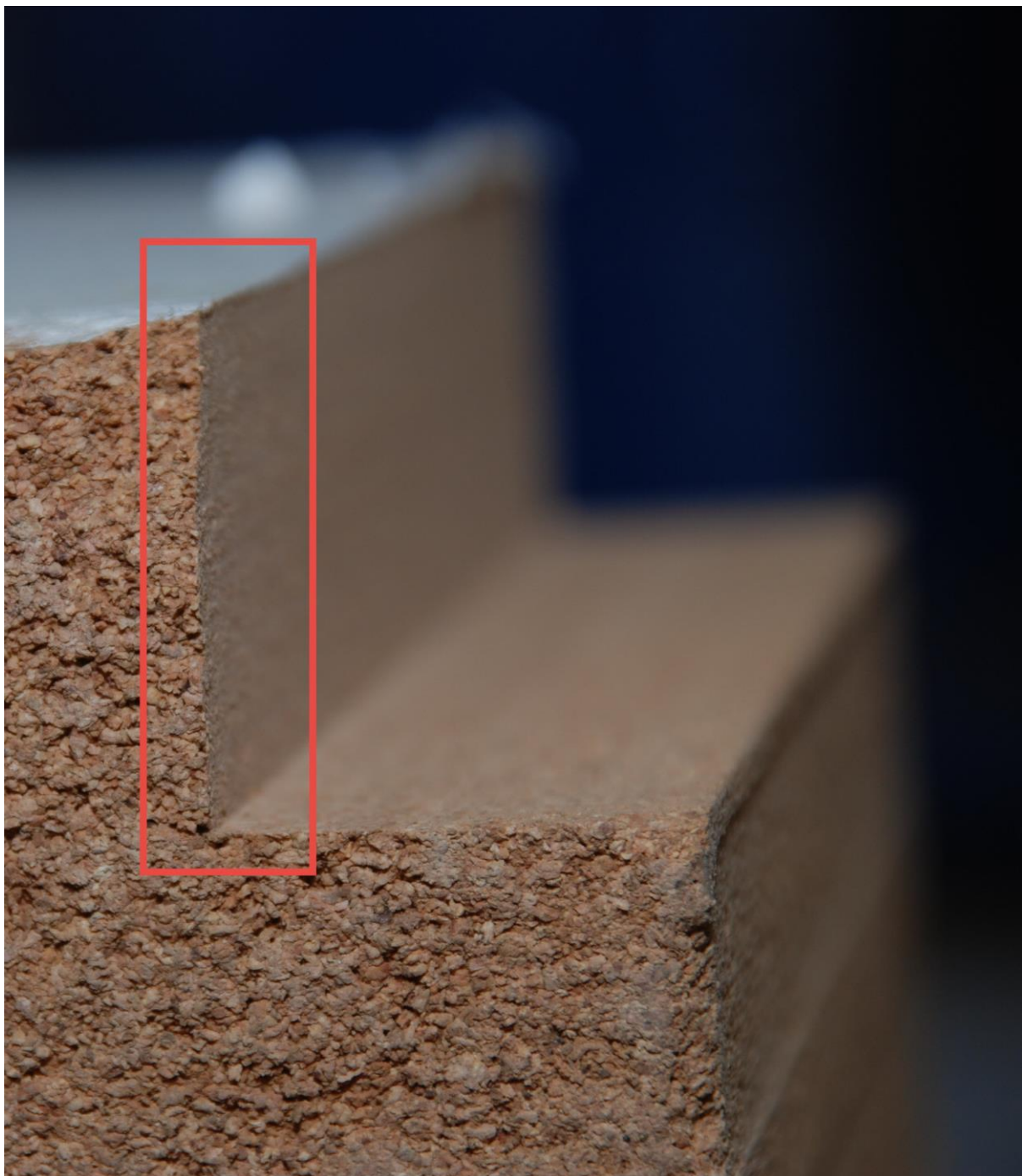


Figura 70 - Teste de maquinação no sentido discordante.