

 M 2014

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE COMPONENTES PARA CALÇADO EM CÉLULA ROBÓTICA

JOÃO BERNARDO DE VASCONCELLOS PORTO ULRICH FERREIRA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Agradecimentos

Ao Professor Vitor Martins Augusto, por ter aceite ser meu orientador e por me ter proporcionado o contacto com o ambiente industrial e empresarial.

À Norcam, pela forma como fui recebido por todos os seus colaboradores e por me ter disponibilizado todos os meios necessários para a realização deste trabalho.

Ao Engº Alexandre Pinto Basto e ao Engº Bruno Couto, da Norcam, pela sua disponibilidade, colaboração e por toda a aprendizagem que me proporcionaram.

À Vancal por ter disponibilizado a sua célula robótica.

Resumo

A realização deste trabalho foi proporcionada por um estágio em ambiente empresarial na área da maquinagem robotizada, tendo em vista a produção de Componentes para Calçado. Ao longo da sua realização foi possível consolidar e aprofundar a aprendizagem realizada durante o trabalho de seminário.

As metodologias desenvolvidas neste trabalho foram no sentido de contribuir para uma avaliação da viabilidade de produção de fôrmas na empresa Vancal - Componentes para Calçado. Inicialmente foi efetuada uma otimização da célula robótica da Vancal, tendo para isso sido efetuada a calibração do *spindle* do robô, o desenvolvimento de um sistema de fixação para a produção de fôrmas e a introdução de outro sistema: uma prensa. Seguidamente foram projetadas duas peças teste: o cinzeiro e a peça de xadrez, tendo sido realizada a maquinagem da última. Finalmente foi desenvolvida a metodologia para a reprodução de fôrmas para calçado, que inclui operações de engenharia inversa, de modelação e de maquinagem robotizada.

Considero que o produto deste trabalho é uma boa base de sustentação técnica, para que a Vancal, possa avaliar, no seu todo, a viabilidade da produção de fôrmas na empresa.

Abstract

This stage work was done in a business environment in the area of robotic machining in order to produce components for footwear. Throughout its achievement was possible to consolidate and deepen the learning achieved during the seminar work.

The methods developed in this work were in order to contribute to an evaluation of the feasibility of producing shoe lasts in the company Vancal - Componentes para Calçado. Initially it was performed an optimization of the Vancal robotic cell having been made a robot spindle calibration, the development of a clamping system for the production of shoe lasts and the introduction of another system: a press. Then two test pieces were designed: the ashtray and the chess piece, but only the machining of the latter was performed. Finally was developed a methodology for the reproduction of shoes lasts, including reverse engineering modeling and robotic machining operations.

I believe that the product of this work is a good base of technical support for the Vancal, to assess, as a whole, the feasibility of producing shoe lasts in the company.

Índice

Resumo	i
Abstract	ii
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	viii
Objetivo	1
As empresas	2
Vancal	2
Norcam	3
Enquadramento	4
Trabalho realizado	4
Estrutura da célula robótica da Vancal	4
Otimização da célula robótica da Vancal	5
Calibração do Spindle	5
Desenvolvimento e instalação de sistemas de fixação para maquinagem de componentes para calçado	8
Peças Teste	10
Modelação e programação da maquinagem da peça: “Cinzeiro”	10
Produção da peça de Xadrez	11
Deteção de erros e configuração do pós-processador do robô da Vancal	18
Caracterização da indústria do calçado	19
Fôrmas para calçado	19
O pé humano	19
Definição	20
Materiais utilizados na produção	21
A importância das tecnologias CAD/CAM na indústria do calçado	21
Processo de fabrico da fôrma	23
Desenvolvimento de métodos para a digitalização e reprodução de fôrmas para calçado	25
Desenvolvimento dos métodos de digitalização e modelação da fôrma	27

<i>Método de digitalização da fôrma com o MicroScribe</i> _____	28
Desenvolvimento do método de reprodução de fôrmas _____	41
Produção de protótipos de fôrmas _____	50
Desenvolvimento de metodologia para conversão automática de uma malha triangulada em superfícies CAD _____	51
Desenvolvimento de um método alternativo para definir o plano de trabalho da peça_	52
Conclusões _____	55
Referências Bibliográficas _____	56
Anexos _____	57
Anexo 1 _____	57
Anexo 2 _____	58

Índice de figuras

Figura 1 – Fachada da empresa Vancal.	2
Figura 2 – Exemplos de produtos fabricados pela Vancal.	2
Figura 3 – Logótipos de alguns dos produtos comercializados pela Norcam.	3
Figura 4 – Célula robótica da Vancal.	4
Figura 5 – Célula robótica virtual.	5
Figura 6 – Representação da determinação do eixo de rotação da ferramenta. O ponto P_c representa o comprimento da ponteira curta e o P_l o da ponteira longa.	6
Figura 7 – Representação do processo de calibração do spindle.	7
Figura 8 – Dados da calibração do spindle do robô da Vancal.	7
Figura 9 – Folha de procedimento para calibração de um spindle.	8
Figura 10 – Imagem renderizada do sistema de fixação para maquinagem de fôrmas e maquetes modelado no PowerSHAPE.	9
Figura 11 – Imagem renderizada da prensa modelada no PowerSHAPE.	10
Figura 12 – Imagem renderizada do cinzeiro modelado no PowerSHAPE.	10
Figura 13 – Representação das estratégias de maquinagem: a.1) estratégia de desbaste; a.2) simulação da estratégia de desbaste; b.1) estratégia de acabamento; b.2) simulação da estratégia de acabamento.	11
Figura 14 – Modelo da peça de xadrez: a) Curvas que definem o seu perfil; b) modelo da peça.	12
Figura 15 – Amplitude de movimentação dos eixos do robô depois de definido um vetor de direção, durante simulação da estratégia de desbaste.	14
Figura 16 – Etapas da maquinagem da primeira peça de xadrez: a) no final do desbaste; b) no final do acabamento por cópia; c) peça acabada.	15
Figura 17 – Defeitos obtidos na maquinagem da primeira peça.	15
Figura 18 – Peça de xadrez nº2: a) vistas da peça acabada; b) defeitos obtidos.	16
Figura 19 – Peça de xadrez nº3.	17
Figura 20 – Detecção de erro no parâmetro do pós-processador que limita o número de linhas nos programas de maquinagem.	18
Figura 21 – Erro detetado num programa pós-processado.	19
Figura 22 – Representação de uma fôrma [4].	20
Figura 23 – Representação dos constituintes da fôrma: corpo e biqueira.	21
Figura 24 – Diferentes materiais utilizados na produção de fôrmas para calçado: a) Madeira; b) Plástico (PEHD); c) Alumínio.	21
Figura 25 – Exemplo de um percurso de maquinagem gerado a partir do processo de digitalização virtual [8].	25
Figura 26 – Ciclo de desenvolvimento dos métodos de digitalização e reprodução de fôrmas.	26
Figura 27- Fluxograma do desenvolvimento e automatização da produção de fôrmas para calçado.	27
Figura 28- Fotografia da fôrma com os alvos antes da digitalização com o MicroScribe.	29
Figura 29- Representação do modelo de arames obtido após digitalização com o MicroScribe.	30

<i>Figura 30 -Exemplos de desvios verificados nos locais onde deveria haver interceção dos pontos das curvas da fôrma, neste caso entre a curva desenhada ao longo da planta e as extremidades dos anéis.</i>	30
<i>Figura 31- Exemplo de curva que deveria ser planificada. Em cima está representada uma vista de topo e em baixo está representada uma vista lateral da mesma curva.</i>	31
<i>Figura 32- Exemplo de curva que deveria ser suavizada.</i>	31
<i>Figura 33 - Superfícies que constituem a fôrma. À esquerda está uma vista isométrica do lado esquerdo da fôrma. À direita está uma vista isométrica do lado direito da fôrma.</i>	32
<i>Figura 34 - Avaliação da suavidade das superfícies que constituem a fôrma.</i>	32
<i>Figura 35 - Vistas da fôrma depois de colocados os alvos para a digitalização com o Z-Scanner.</i>	33
<i>Figura 36- Representação do modelo obtido através da digitalização com o Z-Scanner.</i>	34
<i>Figura 37- Representação do modelo da fôrma em formato stl depois de reparado no PowerSHAPE.</i>	34
<i>Figura 38 - Anéis formados pela projeção de linhas no modelo triangulado da fôrma.</i>	35
<i>Figura 39 - Falhas ocorridas na criação das superfícies na zona da Biqueira (à esquerda) e do calcanhar (à direita).</i>	36
<i>Figura 40 – Superfícies da zona da biqueira e do calcanhar criadas a partir de linhas projetadas transversalmente relativamente aos anéis.</i>	36
<i>Figura 41 – Fôrma resultante da nova configuração da projeção de linhas.</i>	36
<i>Figura 42 – Ilustração da metodologia de criação das superfícies da fôrma em forma de manga.</i>	37
<i>Figura 43 – Ilustração da redução do número de anéis e da sua divisão.</i>	37
<i>Figura 44 – Modelo da fôrma nº1.</i>	38
<i>Figura 45 – Representação do método de digitalização da fôrma.</i>	38
<i>Figura 46 – Modelo da fôrma nº2.</i>	39
<i>Figura 47 - Ilustração dos alvos (a vermelho) definidos na fôrma para digitalização com o MicroScribe.</i>	39
<i>Figura 48 – Fotografia dos meios utilizados na digitalização com o MicroScribe.</i>	40
<i>Figura 49 - Modelo da fôrma nº3.</i>	40
<i>Figura 50 - Fluxograma do desenvolvimento do método de reprodução de fôrmas.</i>	42
<i>Figura 51 - Posicionamento da fôrma na célula robótica da Norcam.</i>	44
<i>Figura 52 – Percursos de maquinagem da operação de desbaste e respetiva simulação no view mil.</i>	45
<i>Figura 53 - Percursos de maquinagem da operação de acabamento e respetiva simulação no view mil.</i>	45
<i>Figura 54 – Representação das etapas de preparação de uma célula robótica.</i>	46
<i>Figura 55 – Operações de maquinagem da fôrma: a) Início da operação de desbaste; b) Fôrma no final da estratégia de desbaste; c) Operação de acabamento; d,e,f) Vistas da fôrma acabada.</i>	47
<i>Figura 56 – Estratégias de desbaste: a) lado direito; b) lado esquerdo.</i>	48
<i>Figura 57 – Vistas da fôrma nº 2.</i>	48
<i>Figura 58 – Determinação do plano de trabalho do bloco.</i>	49
<i>Figura 59 – Etapas da produção da fôrma nº 3: a) durante a operação de desbaste; b) depois da operação de acabamento; c) fôrma acabada.</i>	50
<i>Figura 60 – Fluxograma da produção de protótipos de fôrmas.</i>	50

Figura 61 - Representação do método de projeção de linhas para modelação da fôrma. _____ 52

Figura 62 – Código da macro criada para projeção automática das linhas da grelha. _____ 52

Figura 63 – Representação da medição do erro após definir um plano de trabalho de um bloco. _____ 53

Figura 64 – Representação da rotação do plano de trabalho através do ajuste das coordenadas dos pontos X_1 e Y_1 . _____ 53

Índice de tabelas

<i>Tabela 1 – Estratégias e parâmetros utilizados na programação da maquinagem do cinzeiro.</i>	11
<i>Tabela 2 – Tabela resumo dos parâmetros utilizados na programação da maquinagem da primeira peça.</i>	12
<i>Tabela 3 - Resumo dos parâmetros utilizados na programação da maquinagem da segunda peça.</i>	16
<i>Tabela 4 - Resumo dos parâmetros utilizados na programação da maquinagem da terceira peça.</i>	17
<i>Tabela 5 – Ferramenta utilizada na maquinagem das fôrmas nº 1 e nº 2.</i>	43
<i>Tabela 6 - Parâmetros utilizados na maquinagem da fôrma nº 1.</i>	44
<i>Tabela 7 - Ferramenta utilizada na maquinagem da fôrma nº 3.</i>	49

Objetivo

O objetivo deste estágio foi o desenvolvimento de novas aplicações para a célula robotizada para maquinagem da empresa Vancal, assim como a familiarização com o ambiente empresarial e industrial.

Anteriormente ao estágio foi realizado um trabalho de seminário, no qual foi abordada a programação de robôs para maquinagem. O objetivo desse trabalho foi a preparação para o estágio através da aprendizagem das aplicações CAD/CAM PowerSHAPE, PowerMILL e PowerMILL Robot Interface, assim como fazer uma síntese bibliográfica de assuntos relacionados com a maquinagem robotizada. Este estágio deverá ser visto como uma continuação do trabalho de seminário.

As empresas

A realização deste estágio foi dividida entre duas empresas: a Vancal e a Norcam.

Vancal

A Vancal (ver figura 1) é uma empresa que se insere em dois sectores de atividade: a produção de componentes para calçado e a impressão digital.



Figura 1 – Fachada da empresa Vancal.

A Vancal - Componentes para Calçado, foi fundada em 1986 e iniciou a sua atividade com a produção de viras. Mais tarde, diversificou a oferta com a produção de saltos, solas e forras, entre outros componentes (na figura 2 encontram-se alguns dos componentes fabricados pela Vancal). Em 2005, fruto de um investimento para a personalização dos seus componentes, foi iniciada a Vancal - impressão digital.

Recentemente, a Vancal alargou o seu parque de máquinas, tendo adquirido uma célula robótica para dar resposta a uma encomenda de produção de solas para calçado.



Figura 2 – Exemplos de produtos fabricados pela Vancal

As principais matérias-primas utilizadas na Vancal são o poliuretano (TPU), a borracha termoplástica (TPR), e produtos naturais como o couro e o aglomerado de couro.

Norcam

A Norcam - Engenharia e Design Industrial, foi criada em 1991 e é uma empresa que se dedica à comercialização, implementação e desenvolvimento de soluções industriais CAD/CAM/CAE, prototipagem rápida, digitalizadores tridimensionais e outros meios tecnológicos avançados.

Para responder às solicitações dos seus clientes, a Norcam conta com um conjunto de especialistas nas áreas de *design* industrial, CAD/CAM/CAE e CNC.

A Norcam dispõe de um vasto leque de produtos entre os quais:

Delcam - soluções CAD/CAM e metrologia

3D Systems - impressoras 3D;

Creaform - *scanners* 3D portáteis;

Finite solutions - simulação de fundição;

Metronor - equipamentos de medição portátil para grandes volumes;

Revware - braços MicroScribe para digitalização;

Entre outros.



Figura 3 – Logótipos de alguns dos produtos comercializados pela Norcam.

Enquadramento

Conforme acima referido, a célula robótica da Vancal foi instalada para dar resposta a uma encomenda de um cliente, não havendo nenhum plano estratégico concreto para a sua rentabilização após a execução da mencionada encomenda. Assim, e no sentido de contribuir para a rentabilização do investimento, durante o estágio foi dada continuação à aprendizagem de utilização do robô através do desenvolvimento de alguns projetos, tendo culminado com a produção de fôrmas para calçado.

Uma parte deste trabalho foi realizada na Norcam, uma vez que na Vancal não havia mão-de-obra qualificada para operar a célula robótica e a solução CAD/CAM existentes na empresa.

Trabalho realizado

Estrutura da célula robótica da Vancal

Quando foi iniciado este trabalho de estágio a célula robótica da Vancal era constituída pelo robô Motoman MH50 (ver dados técnicos no anexo 1), por uma mesa e por uma célula de segurança (ver figura 4).



Figura 4 – Célula robótica da Vancal

Para além desta célula a Vancal dispunha também de uma célula virtual (ver figura 5), que permitia simular os percursos de maquinagem num ambiente mais realista, assim como detetar colisões e problemas de cinemática do robô durante a maquinagem.

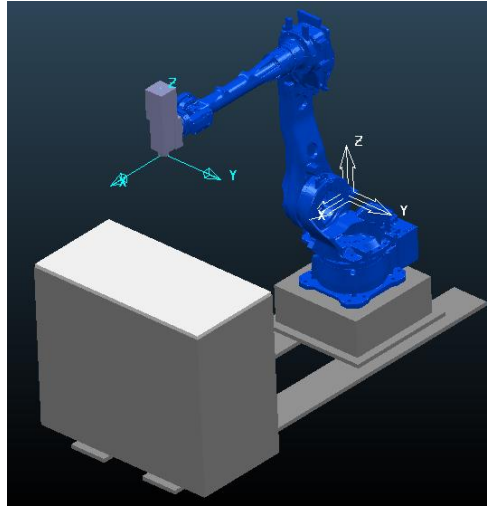


Figura 5 - Célula robótica virtual.

A célula robótica virtual anteriormente representada é constituída por uma pasta que inclui um conjunto de ficheiros:

- Ficheiros “.dmt”, onde está o modelo CAD de cada um dos componentes da célula;
- Ficheiro “.mtd”, onde está o código que contém todas as informações sobre os eixos da célula robótica.
- Ficheiro “.Robconfig”, que permite fazer o pós-processamento dos programas de maquinagem;

Otimização da célula robótica da Vancal

A primeira etapa da utilização da célula robótica foi destinada à sua otimização. O primeiro passo foi calibrar o *spindle*, seguidamente foi desenvolvido um sistema de fixação para maquinar fôrmas para calçado e maquetes e por último foi colocado outro sistema de fixação (uma prensa), no sentido de flexibilizar a célula.

Calibração do Spindle

Definição

É a partir da calibração do *spindle* que é definido o eixo de rotação da ferramenta e é a partir desse eixo que são definidas as coordenadas do ponto central da ponta da ferramenta (ver figura 6).

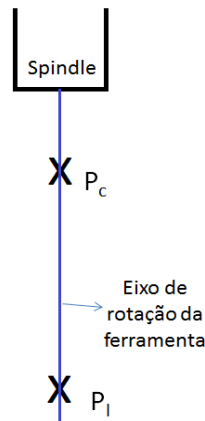


Figura 6 – Representação da determinação do eixo de rotação da ferramenta. O ponto P_c representa o comprimento da ponteira curta e o P_l o da ponteira longa.

Para definir o eixo de rotação são necessárias três ponteiras, uma curta e uma longa, de comprimentos conhecidos e uma outra ponteira utilizada apenas como referência. As ponteiras são utilizadas para definir os dois pontos pela qual passa a reta que define o eixo de rotação da ferramenta. Estes pontos são definidos através do contacto entre uma das ponteiras, curta ou longa, que juntamente com o porta-ferramentas está fixa ao spindle e a ponteira de referência que está fixa num local pertencente ao volume de trabalho do robô. Para definir o segundo ponto, repete-se a operação com a ponteira que não foi seleccionada na primeira operação.

Quando executada com sucesso, a calibração do spindle permite melhorar a precisão com que é realizada a maquinagem, assim como simplificar o procedimento de calibração de cada ferramenta, visto que desta forma é suficiente conhecer o comprimento da ferramenta relativamente à superfície de contacto entre o porta-ferramentas e o *spindle*. Contudo a correta calibração do spindle tem um elevado grau de dependência do operador devido à necessidade de uma análise visual do alinhamento entre os vértices das ponteiras.

Calibração do spindle da Vancal

Para realizar a calibração do spindle do robô da Vancal foram utilizadas três ponteiras: uma curta, uma longa e outra utilizada como ponto de referência (ver figura 7).

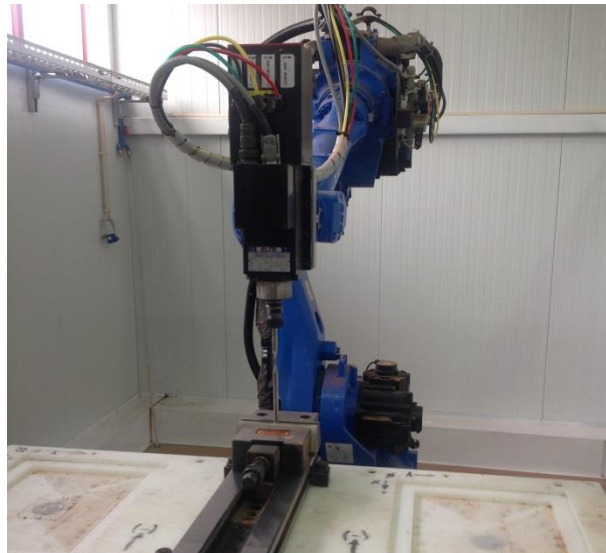


Figura 7 – Representação do processo de calibração do spindle.

Geralmente a ponteira curta é utilizada para definir o plano de trabalho dos blocos para maquinar. Assim, no sentido de gerir os recursos disponíveis, utilizou-se primeiro a ponteira longa para que a ponteira curta pudesse ficar acoplada no porta-ferramentas.

Na figura 8 pode visualizar-se o ficheiro “.Robsc” onde podem ser consultados os dados de calibração do spindle, nomeadamente o comprimento das ponteiras utilizadas em milímetros (“short probe length” corresponde à ponteira curta e “long probe length” corresponde à ponteira longa), as coordenadas dos pontos Pc e Pl representados na figura 6 e ainda notas que tenham sido registadas.

```
JBF_08102013.Robsc - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<SpindleCalibration>
  <ShortProbe Length="116.32">
    <Meas1 X="-257.562" Y="-1.985" Z="85.12" />
    <Meas2 Used="True" X="-257.317" Y="-1.959" Z="85.162" />
    <Meas3 Used="True" X="-257.63" Y="-2.034" Z="85.096" />
  </ShortProbe>
  <LongProbe Length="271.16" LengthUsed="True">
    <Meas1 X="-412.069" Y="-2.881" Z="85" />
    <Meas2 Used="True" X="-412.236" Y="-3.089" Z="84.633" />
    <Meas3 Used="True" X="-411.988" Y="-3.011" Z="84.767" />
  </LongProbe>
  <Toolworkplane Reverse="True" AxisDefined="Y" I="0" J="-1" K="0" Direction="ZX" />
  <Note><![CDATA[Altura das Ponteiras medidas em contraplacado.]]></Note>
</SpindleCalibration>
```

Figura 8 – Dados da calibração do spindle do robô da Vancal.

Folha de procedimento para calibração do spindle

Depois de efetuar a calibração do spindle da célula robotizada da Vancal foi criada uma folha com o procedimento de calibração (figura 9). Esta folha foi criada com o objetivo de

iniciar um *dossier* constituído pelas principais operações executadas no robô para configuração da célula.

Calibração do Spindle

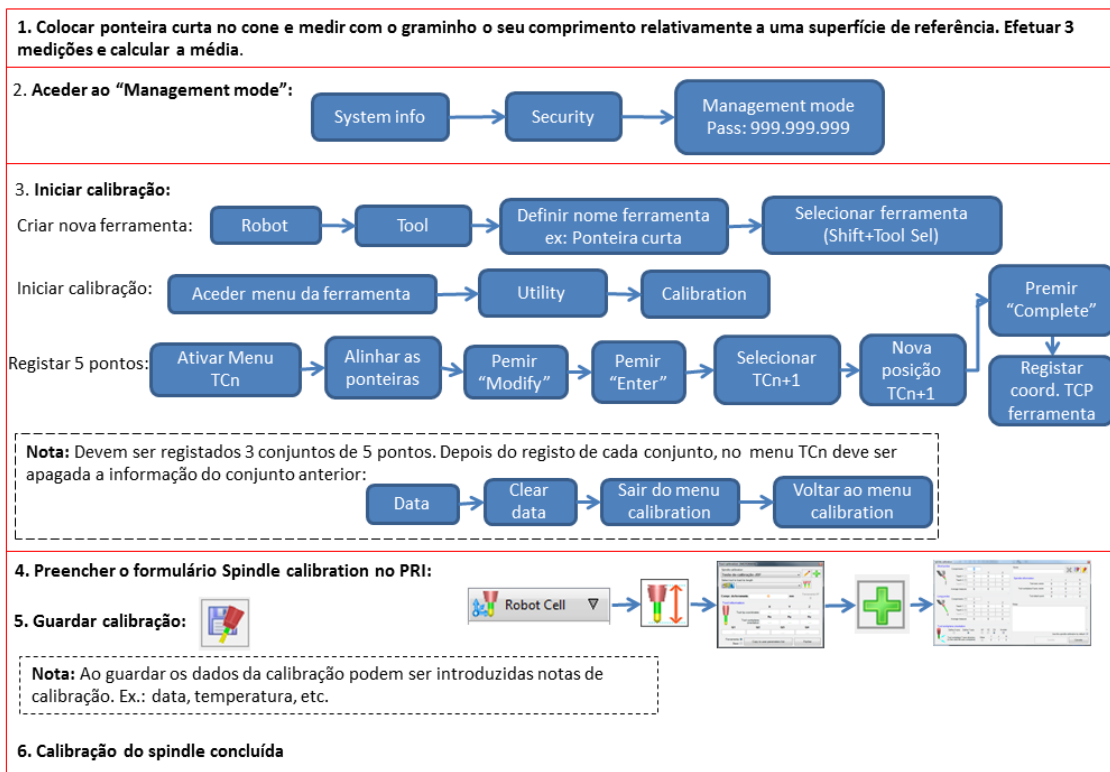


Figura 9 – Folha de procedimento para calibração de um *spindle*.

Desenvolvimento e instalação de sistemas de fixação para maquinagem de componentes para calçado

Sistema de fixação para maquinagem de fôrmas e maquetes

Foi desenvolvido um sistema de fixação amovível para colocar na mesa da célula, com o objetivo de facilitar a maquinagem de fôrmas para calçado e maquetes. Os requisitos estipulados para o seu desenvolvimento foram:

- Permitir maquinar componentes com diferentes dimensões;
- Evitar colisões com o sistema de fixação;
- Evitar a vibração excessiva do sistema durante as operações de maquinagem;
- Facilidade de fixação das peças.

Na figura 10 está uma imagem do sistema de fixação desenvolvido de acordo com os requisitos estabelecidos.

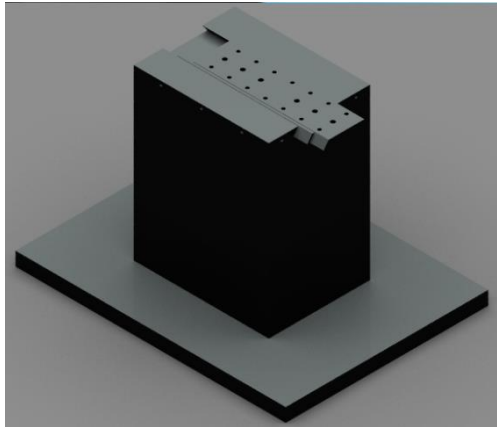


Figura 10 – Imagem renderizada do sistema de fixação para maquinagem de fôrmas e maquetes modelado no PowerSHAPE.

De forma a permitir a fixação de blocos de diferentes dimensões foi desenvolvida uma base amovível com vários pontos de aperto, sendo que o facto de ser amovível, facilita o aperto dos blocos. As dimensões do sistema foram calculadas de forma a permitir um bom alcance das ferramentas ao bloco e a salvaguardar a rigidez necessária para evitar a sua vibração. Outra das características do sistema de fixação é o facto de ser amovível, motivo pela qual dispõe de uma base retangular, que permite instalá-lo e removê-lo com facilidade da mesa da célula.

Este sistema de fixação foi modelado no PowerSHAPE com o objetivo de o introduzir na célula virtual do PowerMILL.

Instalação da prensa na célula robótica

Antes de ser iniciado este trabalho de estágio, a Vancal já tinha adquirido uma prensa, pelo que esta foi aproveitada para flexibilizar a célula. A prensa foi instalada no centro da mesa da célula alinhada com o plano de trabalho “*world*” do robô. Na figura 11 está representado o modelo CAD da prensa.

Assim como o sistema de fixação referido anteriormente, a prensa foi modelada no PowerSHAPE com o objetivo de a introduzir na célula virtual.

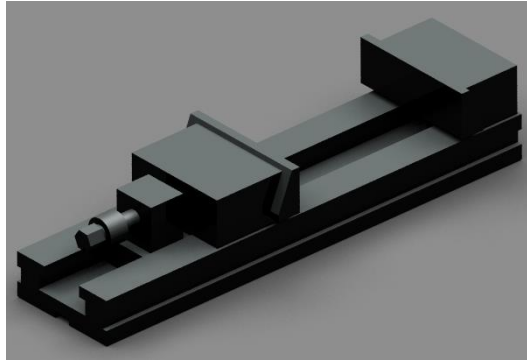


Figura 11 – Imagem renderizada da prensa modelada no PowerSHAPE.

Peças Teste

Conforme foi referido anteriormente, a Vancal não possuía um plano para a rentabilização do robô nem dispunha de mão-de-obra com conhecimento para operar a célula robótica. Por este motivo houve uma primeira fase de adaptação e aprendizagem, que se iniciou com a modelação e programação da maquinagem de um cinzeiro e depois da produção de uma peça de xadrez.

Modelação e programação da maquinagem da peça: “Cinzeiro”

A modelação e a programação da maquinagem desta peça teve como objetivo relembrar os conhecimentos básicos de programação no PowerMILL.

A modelação do cinzeiro no PowerSHAPE foi efetuada utilizando sólidos primitivos e recorrendo a operações booleanas, através dos quais se obteve o modelo representado na figura 12.

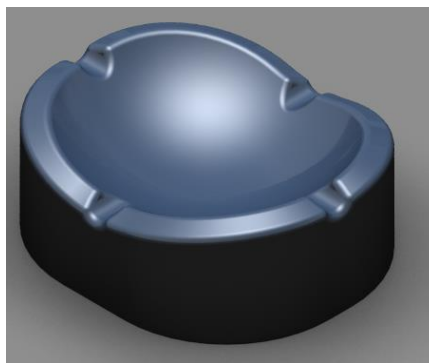


Figura 12 – Imagem renderizada do cinzeiro modelado no PowerSHAPE.

Depois de modelado o cinzeiro, exportou-se o modelo para o PowerMILL e procedeu-se à programação da maquinagem. A maquinagem desta peça foi programada com duas estratégias, uma de desbaste e outra de acabamento. Os parâmetros utilizados na programação estão apresentados na tabela resumo que se segue.

Tabela 1 – Estratégias e parâmetros utilizados na programação da maquinação do cinzeiro.

Operação	Ferramenta	Estratégia	Passo (mm)	Velocidade (mm/min)	Duração (min)
Desbaste	Esférica Ø 10 mm	Offset all	Lateral: 5 Vertical: 5	Avanço: 3000 Mergulho:1500	25
Acabamento	Esférica Ø 10 mm	Z constante otimizado	Lateral: 1	Avanço: 2500 Mergulho:1500	17

Os percursos programados e a respetiva simulação podem ser visualizados na figura que se segue.

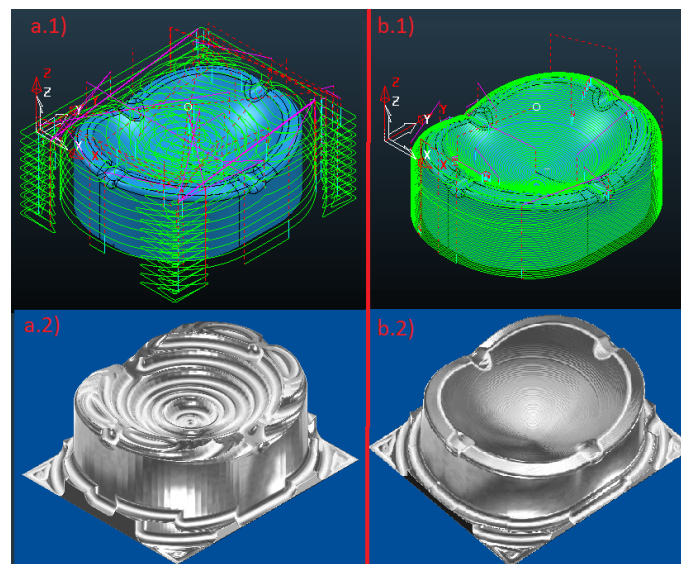


Figura 13 – Representação das estratégias de maquinação: a.1) estratégia de desbaste; a.2) simulação da estratégia de desbaste; b.1) estratégia de acabamento; b.2) simulação da estratégia de acabamento.

Produção da peça de Xadrez

Neste tópico é abordada a produção de uma peça de xadrez, desde a sua modelação no PowerSHAPE até à sua maquinação na célula robótica. Para obter a peça final foram produzidas três peças, sendo que as alterações efetuadas incidiram principalmente nos parâmetros de programação da maquinação.

Antes de iniciar a modelação da peça foi definido que seria utilizado um bloco de mogno (madeira) com as seguintes dimensões: 100 mm x 100mm x 210 mm. O sistema de fixação escolhido foi a prensa.

Uma vez que esta peça de xadrez é de revolução, a modelação foi iniciada com o desenho de um perfil a partir do qual se fez uma revolução, que deu origem à peça representada na figura 14.

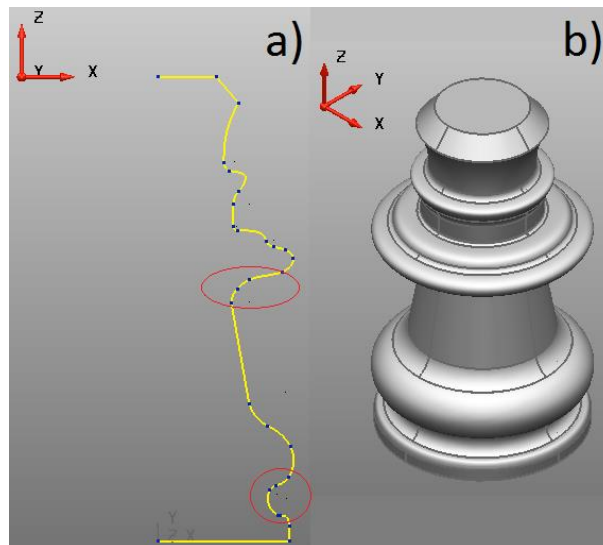


Figura 14 – Modelo da peça de xadrez: a) Curvas que definem o seu perfil; b) modelo da peça.

Na figura estão assinaladas duas regiões que indicam potencial dificuldade de acesso à ferramenta. Esta previsão foi feita com base na distância entre as zonas referidas e o sistema de fixação, e as dimensões do *spindle* com a ferramenta acoplada. Assim optou-se por utilizar raios de curvatura maiores, para que o acesso fosse facilitado.

Depois de concluir a modelação foi iniciada a programação da maquinagem da primeira peça, cujos parâmetros utilizados são apresentados na tabela que se segue.

Tabela 2 – Tabela resumo dos parâmetros utilizados na programação da maquinagem da primeira peça.

Peça		1					
Ferramenta	Tipo	Esférica					
	Ø (mm)	10	10	2			
Operação		Desbaste	Acabamento				
Estratégia	Estratégia (referência)	cópia (Drast)	cópia (Arast)	superfície (Asup)	padrão (etiqueta)	padrão (FVC)	
	Passo (mm)	Lateral	4	0.8	1	1	1
		Vertical	4	-			
	Eixo da ferramenta	Eixo da ferr.	vertical	Lead/Lean	Lead/Lean	vertical	Towards line
		inclinação	-	8°	15	-	-
	Entradas		Rampa				
Saídas		-	Rampa				
Ligações		Rasante					
Velocidade (mm/min)	Avanço	1000					
	Mergulho	500					
Duração		3h14min	3h41min	3min	2min	2min	

Para maquinar esta peça dividiu-se o bloco em duas partes iguais e executaram-se as estratégias de desbaste e de acabamento com uma cinemática de 3+2 eixos. Isto significa que a duração apresentada para essas estratégias é relativa à soma de duas partes. A razão para a escolha de estratégias 3+2 eixos é apresentada nos parágrafos que se seguem.

No caso do desbaste, a taxa de material removido é elevada e por isso o esforço a que a estrutura do robô está sujeita é maior, particularmente o esforço exercido nas suas juntas. Por esta razão, a probabilidade de desvios da trajetória do percurso aumenta, para além de haver um maior desgaste da cadeia cinemática do robô. Posto isto, poderiam ser utilizadas pelo menos duas soluções diferentes, uma seria reduzir a taxa de remoção de material pela redução do passo utilizado na estratégia e a outra seria reduzir a amplitude de movimentação dos eixos do robô. Como a primeira hipótese de resolução causaria um maior prejuízo na duração da operação de maquinagem, optou-se por utilizar uma cinemática 3+2 eixos.

No caso da maquinagem robotizada, o número de eixos referidos num determinado tipo de cinemática (como por exemplo 3+2 eixos) é referente apenas ao movimento da ferramenta, pois, independentemente da cinemática utilizada, todos os eixos do robô se movimentam. No entanto, o tipo de cinemática e a amplitude de movimentação dos eixos estão relacionados.

Relativamente às estratégias de acabamento, a razão para a escolha da cinemática 3+2 eixos é semelhante à exposta para a estratégia de desbaste. Geralmente, a tolerância definida numa estratégia de acabamento é inferior à definida numa estratégia de desbaste, o que implica um maior controlo do movimento da ferramenta. Os desvios de trajetória aumentam em função do número e da amplitude de movimentação dos eixos do robô, que por sua vez são reduzidos quando se utiliza uma cinemática do tipo 3+2 eixos.

Os valores de velocidade, e por consequência a duração da maquinagem, indicados na tabela foram os definidos no PowerMILL. No entanto, o controlador do robô, também permite controlar a velocidade relativamente à estipulada no PowerMILL num intervalo de 0 até 150%. Desta forma, nas estratégias de acabamento padrão foi utilizada apenas 20% da velocidade, aumentando por isso a respetiva duração para 10 minutos (cada estratégia). A velocidade foi reduzida para evitar a vibração da estrutura do robô causada pelas mudanças de direção repentinas.

Para além do controlo da cinemática do robô através do tipo de estratégia também é utilizada para esse efeito a aplicação PowerMILL Robot Interface (PRI). No caso da

maquinagem desta peça só foi necessário utilizar um vetor para restringir a orientação do eixo de rotação da ferramenta (ver figura 15).

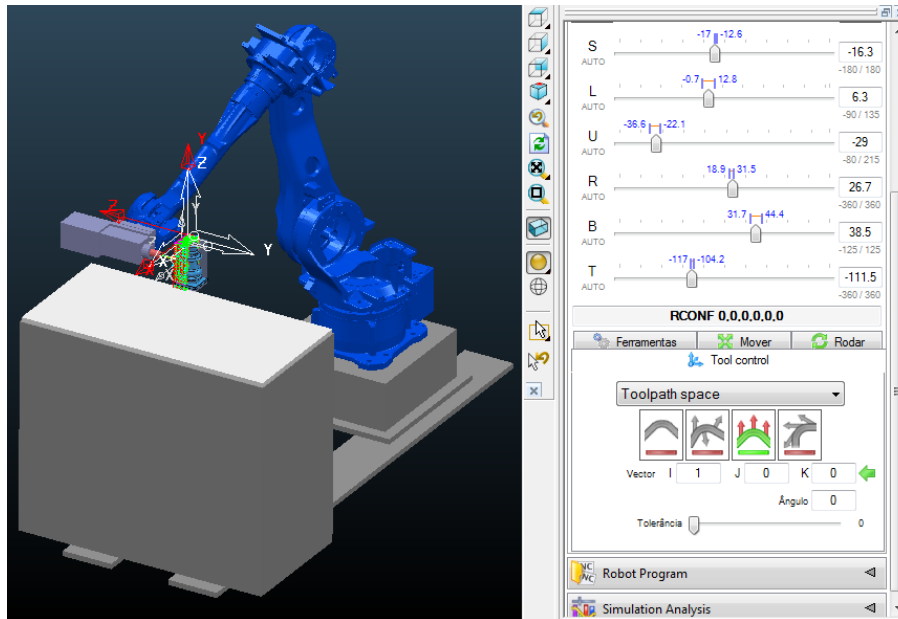


Figura 15 – Amplitude de movimentação dos eixos do robô depois de definido um vetor de direção, durante simulação da estratégia de desbaste.

A amplitude do movimento de cada eixo pode ser vista na parte superior direita da imagem onde estão definidos os intervalos para cada eixo. Mais abaixo pode-se visualizar o Vetor (i,j,k) definido para este percurso.

No final da programação das estratégias e da sua simulação, fez-se o pós-processamento e iniciou-se a preparação da célula robótica. Esta preparação consistiu em calibrar a ferramenta antes de a acoplar no *spindle* e em apertar o bloco no sistema de fixação para definir o seu plano de trabalho.

Após a preparação da célula e já com os programas pós-processados e inseridos no controlador, iniciou-se a maquinagem da peça. Na figura seguinte pode visualizar-se a peça depois de concluídas as etapas de desbaste e de acabamento.

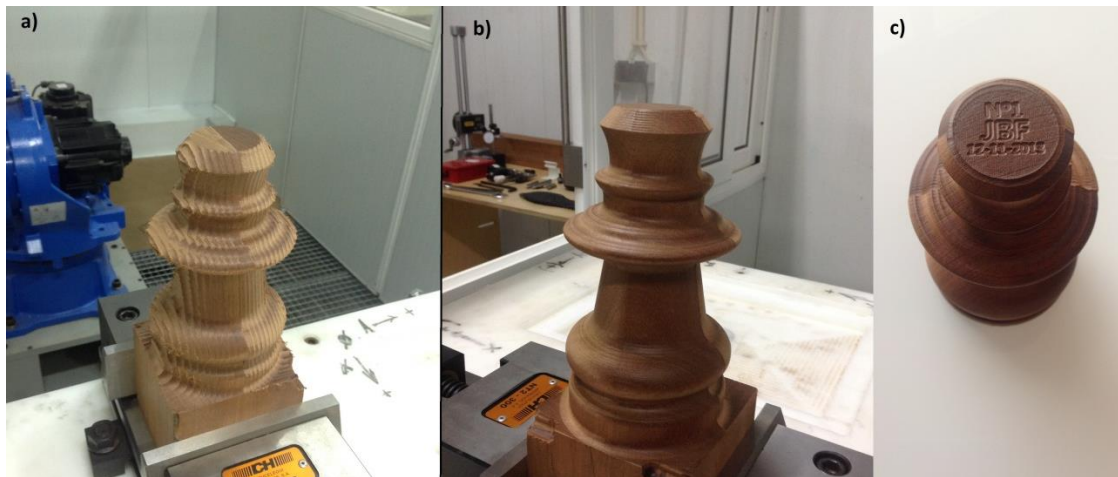


Figura 16 - Etapas da maquinagem da primeira peça de xadrez: a) no final do desbaste; b) no final do acabamento por cópia; c) peça acabada.

No final do processo de maquinagem constatou-se que a peça apresentava alguns defeitos, que poderiam estar relacionados com as estratégias utilizadas e com desvios inerentes ao processo de calibração do *spindle* (ver figura 17).

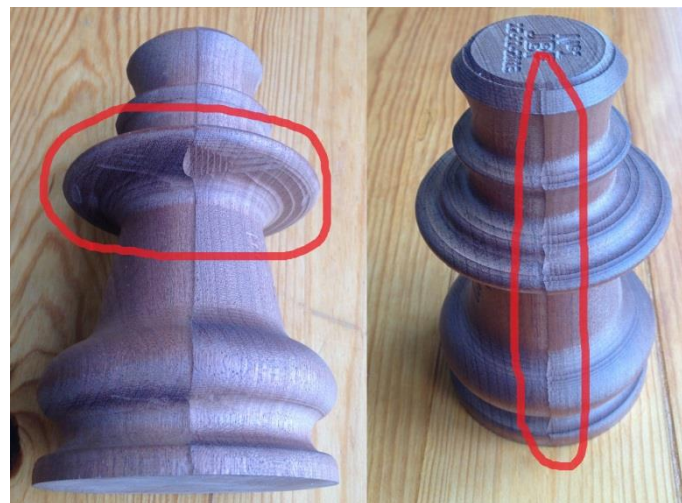


Figura 17 – Defeitos obtidos na maquinagem da primeira peça

Depois de concluída a produção e a análise da primeira peça, iniciou-se a produção da segunda. No sentido de melhorar a qualidade do seu acabamento, os parâmetros de programação das estratégias de maquinagem sofreram algumas alterações. Houve também alteração dos padrões utilizados na personalização da peça, passando por isso a utilizar mais uma estratégia padrão do que na produção da peça anterior.

Na tabela 4 estão registadas as estratégias e os principais parâmetros utilizados, estando destacados aqueles que foram alvo de alterações.

Tabela 3 - Resumo dos parâmetros utilizados na programação da maquinagem da segunda peça.

Peça		2					
Operação		Desbaste	Acabamento				
Ferramenta	Tipo	Esférica	Esférica				
	∅	10	10	2			
Estratégia	Estratégia	cópia (Drast)	cópia (Arast)	superfície (Asup)	padrão (logoV)	padrão (logoVid)	padrão (logoVcc)
	Passagem perpendicular	-	30°	-			
	Passo	Lateral	4	0.8	1		
		Vertical		-			
	Eixo da ferramenta	Eixo da ferr.	vertical	Lead/Lean		vertical	
		inclinação	-	11°	15°	-	
	Entradas	Saídas	Arco	Arco	movimento estendido	Rampa	
Ligações	Rasante						
Velocidade	Avanço	1000					
	Mergulho	500					
Duração		3h7min	3h23min	4min	2min	1min	1min

As etapas que se seguiram à definição das estratégias foram semelhantes às realizadas na produção da peça anterior, sendo por isso apenas apresentadas imagens da peça acabada (ver figura 18).

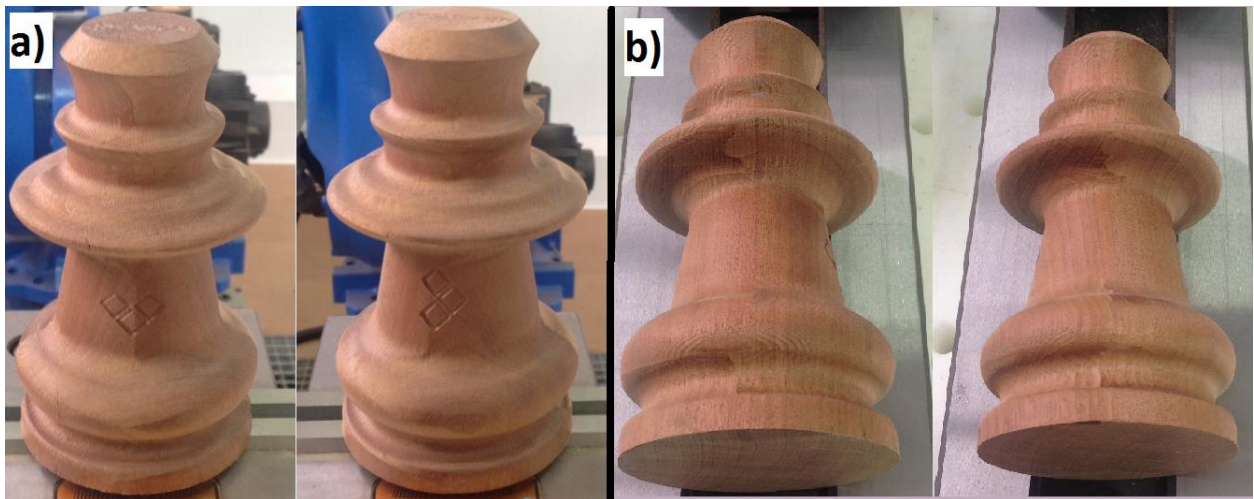


Figura 18 – Peça de xadrez nº2: a) vistas da peça acabada; b) defeitos obtidos.

Conforme se pôde comprovar pelas imagens apresentadas anteriormente, houve uma melhoria substancial na qualidade do acabamento da peça. Ainda assim, foi maquinada a

terceira e última peça, com objetivo de tentar corrigir alguns defeitos que permaneceram na maquinagem da segunda peça.

As alterações efetuadas nos parâmetros das estratégias de maquinagem estão registadas na tabela que se segue.

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros utilizados na programação da maquinagem da terceira peça.

Peça		3							
Operação		Desbaste	Semi acabamento			Acabamento			
Ferramenta	Tipo	Esférica	Esférica		Esférica				
	Ø	10	10		10	2			
Estratégia	Estratégia	cópia (Drast)	cópia (SArast)	superfície (SAsup)	cópia (Arast)	superfície (Asup)	padrão (logoV)	padrão (logoVid)	padrão (logoVcc)
	Ângulo	-	-		45°	-			
	Passagem	-	30°	-	30°	-			
	Passo	Lateral	5	0,8	1	0.8	1		
		Vertical		-					
	Eixo ferr.	Eixo ferr.	vertical	Lead/Lean		Lead/Lean		vertical	
		inclinação	-	11°	15°	8°	15	-	
	Entradas		Arco	Arco	mov. estendid	Arco	mov. estendido	Rampa	
Saídas									
Ligações	Curtas	Rasante	Rasante		Arco	Rasante			
	Longas				Rasante				
Velocidade	Avanço	1000							
	Mergulho	500							
Duração		1h17min	1h12min	4min	3h38min	4min	2min	1min	1min

Conforme se pôde ver na tabela anterior houve a introdução de uma estratégia de semi-acabamento. Esta estratégia permitiu não só reduzir o esforço exercido pela ferramenta, como reduzir a duração da maquinagem da peça em 19 minutos.

Na figura abaixo representada pode visualizar-se o resultado da maquinagem da terceira peça.



Figura 19 – Peça de xadrez nº3

Resta ainda referir que o resultado obtido foi muito positivo, no entanto seria necessário proceder a algumas otimizações no sentido de reduzir a duração total da maquinagem da peça.

Deteção de erros e configuração do pós-processador do robô da Vancal

Embora não tenha sido referido anteriormente, durante a maquinagem da peça de xadrez verificaram-se alguns erros no controlador do robô.

Uma das medidas tomadas foi analisar os programas pós-processados, para verificar o motivo do erro. Durante essa verificação foi detetado o excesso de linhas no programa, pelo que se procedeu à configuração do pós-processador reduzindo o limite de linhas por programa (ver figura 20).

```
31 <Axis ADDRESS="E" HOME="6.1" />
32 <Axis ADDRESS="F" />
33 </Setup>
34 <Setup Name="esq">
35 <Axis ADDRESS="A" PRIORITY="STATIC" HOME="-15" />
36 <Axis ADDRESS="B" HOME="-0.8" />
37 <Axis ADDRESS="C" HOME="-4.7" />
38 <Axis ADDRESS="D" />
39 <Axis ADDRESS="E" HOME="3.9" />
40 <Axis ADDRESS="F" />
41 </Setup>
42 </Setups>
43 <!-- -->
44 <!-- -->
45 <!-- Robot PostProcessor -->
46 <ScaleFactors E1="1" E2="1" />
47 <CoordinateTransformE1 VALUE="False" AXIS="Z" />
48 <!-- -->
49 <!-- RapidMoves = "JointMove" or "LinearMove" => rapid moves of a toolpath -->
50 <!-- JoinMoves = "JointMove" or "LinearMove" => join moves between toolpaths -->
51 <PostProcessor Split="9000" RapidMoves="LinearMove" JoinMoves="JointMove">
52 <!-- -->
53 <StartJob><![CDATA[JOB
54 //NAME !JobName!JobIndex!
55 //POS
56 //NPOS !NumberOfPoints!,0,0,0,0
57 //USER !udp_User!
58 //TOOL !udp_Tool!
59 //POSTYPE USER
```

Figura 20 - Deteção de erro no parâmetro do pós-processador que limita o número de linhas nos programas de maquinagem

Ainda assim, mesmo depois de efetuada a correção do erro, o controlador continuou a detetar erros nos programas. Foi feita novamente uma análise aos programas até que se detetou a existência de linhas de intervalo entre as linhas de código dos programas (ver figura 21).

```
5545 MOVL C2756 V=17
5546 MOVL C2757 V=17
5547 MOVL C2758 V=17
5548 MOVL C2759 V=17
5549 MOVL C2760 V=17
5550 MOVL C2761 V=17
5551 MOVL C2762 V=17
5552 MOVL C2763 V=17
5553 MOVL C2764 V=17
5554 MOVL C2765 V=17
5555 MOVL C2766 V=17
5556 MOVL C2767 V=17
5557 MOVL C2768 V=17
5558 MOVL C2769 V=17
5559 MOVL C2770 V=50
5560
5561 END
5562
```

Figura 21 – Erro detetado num programa pós-processado.

Apesar de ter sido detetado o problema, não se conseguiu detetar a causa, mesmo depois de analisar o pós-processador. No entanto, foi possível ultrapassar este problema através da edição dos programas e eliminando manualmente as linhas em branco.

Caracterização da indústria do calçado

A indústria do calçado é um sector de atividade tradicional, que é dominado por pequenas e médias empresas, onde a maioria dos processos são levados a cabo manualmente. Na produção de calçado são realizadas tarefas complexas e por isso difíceis de automatizar sendo esse o principal motivo para atualmente o seu processo de produção ser pouco automatizado. Para além disso há alguns entraves à introdução de novas tecnologias como a CAD/CAM, visto que os operários que participam no desenvolvimento do produto (por exemplo produção de protótipos de fôrmas) são considerados “artesãos” e consideram que este tipo de tecnologia limita a sua criatividade [1].

Na indústria do calçado há um grande desafio no sentido de satisfazer as crescentes necessidades dos consumidores em termos de ergonomia, conforto e moda. O rápido crescimento dos fabricantes internacionais de calçado levou a competitividade para um patamar global, quer se trate de produção em massa ou até mesmo personalizada.

Fôrmas para calçado

O pé humano

O pé humano é um sistema complexo constituído por ossos, ligamentos, tendões e músculos sob um revestimento de pele, que permite desempenhar a função de suporte e de locomoção. Alterações deste sistema em situações estáticas ou dinâmicas podem resultar em alterações anatómicas, ou seja da forma exterior do pé. Para além disso existem enormes variações entre as populações, géneros e idades [2].

Definição

A fôrma (ver figura 22) é um molde utilizado na indústria do calçado, cuja função é dividida entre o projeto do calçado e a sua produção. Na fase de projeto, a fôrma auxilia o modelista a adequar o desenho à estrutura anatômica e biomecânica do pé. Na fase de produção, a fôrma é utilizada nos procedimentos de montagem e de acabamento. Relativamente à sua conceção, a fôrma é desenvolvida a partir das medidas médias do pé humano, de acordo com o tipo de calçado a ser fabricado [3].



Figura 22 – Representação de uma fôrma [4].

A fôrma pode ser classificada em diferentes tipos, de acordo com o grupo a que se destinam (mulheres, homens, crianças, etc.), segundo a sua biqueira (afiada, quadrada, arredondada, etc.), segundo a sua articulação (podendo ser ou não articulada) e ainda segundo o sistema de montagem (por exemplo a fôrma poderá ser reforçada em função do tipo de calçado em que é utilizada, ou ser reforçada com uma chapa metálica para evitar o seu desgaste e contribuir para o processo da montagem do cabedal tacheado ou com pregos.) [1], [3].

A fôrma é um objeto industrial determinante para o desenvolvimento do *design* do calçado e pode ser dividida em 2 partes: o corpo e a biqueira (ver figura 23). O corpo estende-se desde a base do metatarso até ao tornozelo e é essencial para um bom ajuste do produto final ao pé. As suas dimensões devem estar de acordo com as dimensões médias da população a que o produto se destina e, geralmente a tolerância aceite no sector do calçado é de $\pm 0,5$ mm. Por sua vez, a biqueira é como o próprio nome indica a parte da frente da fôrma até à base do metatarso. Esta região tem uma maior liberdade de *design*, uma vez que é principalmente aqui que incidem as alterações impostas pelas tendências da moda [5].

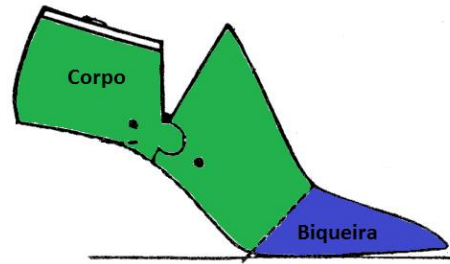


Figura 23 – Representação dos constituintes da fôrma: corpo e biqueira.

Geralmente os fabricantes de calçado não dispensam as fôrmas mais antigas, visto que uma fôrma com um “bom corpo” poderá ser utilizada para fazer o *design* de uma nova, continuando a respeitar os critérios de ergonomia. Por este motivo, as fôrmas são reutilizadas procedendo-se à separação do corpo e da biqueira, desenvolvendo-se assim uma nova fôrma a partir desse mesmo corpo.

Materiais utilizados na produção

O primeiro material utilizado na produção de fôrmas e dos seus protótipos foi a madeira, que era densa e geralmente de plátano ou de faia. Nos dias de hoje continua a ser utilizada mas essencialmente na produção de protótipos, visto que na produção em série é utilizado polietileno de alta densidade. Este polímero passou a ser utilizado devido à sua maior resistência mecânica relativamente à madeira. Há ainda um terceiro material também utilizado, o alumínio. Contudo, este é utilizado apenas em operações que possam danificar as fôrmas poliméricas sendo por isso necessário utilizar um material com maior resistência [1], [6]. Na figura 24 estão representados exemplos de fôrmas produzidas nos materiais acima referidos.



Figura 24 – Diferentes materiais utilizados na produção de fôrmas para calçado: a) Madeira; b) Plástico (PEHD); c) Alumínio.

A importância das tecnologias CAD/CAM na indústria do calçado

Atualmente os métodos de *design* para a produção em série baseiam-se no comprimento, largura e perímetro de algumas secções do pé, características estas que se revelam

insuficientes para responder às exigências da produção de um calçado confortável e ajustado. Acrescente-se ainda que o escalonamento dos respectivos tamanhos é desenvolvido durante o processo de produção, levando a que na maioria dos casos o cliente final seja envolvido apenas no ato da compra, o que por vezes resulta na sua insatisfação, especialmente quando a anatomia do seu pé não se assemelha à padronizada. Assim, para aumentar o nível de satisfação dos clientes mais exigentes e de forma a ganhar vantagens competitivas existe a necessidade de criar um sistema capaz de produzir calçado personalizado e com um *design* atrativo [2].

As tecnologias CAD/CAM têm um papel preponderante na resposta a estas novas exigências do mercado e por isso têm vindo a ser desenvolvidas soluções ao nível da prototipagem, do *design* e da maquinagem das fôrmas. O *design* desempenha o principal papel no processo produtivo, no entanto é também o principal obstáculo ao seu desenvolvimento.

No sentido de ultrapassar este desafio têm sido desenvolvidos trabalhos que propõem a reutilização das fôrmas no desenvolvimento do *design*, ou seja, o *design* das fôrmas é realizado a partir de modelos já existentes que são digitalizados e recorrendo à utilização de *softwares* CAD são modificados de acordo com o objetivo pretendido [5]. Há também autores que propõem metodologias de modelação para alteração do *design* das fôrmas, como por exemplo métodos de *design* paramétrico para a personalização de fôrmas. Este trabalho consiste na definição de curvas paramétricas criadas a partir de um modelo triangulado que permitem fazer alterações controladas da geometria das superfícies da fôrma [7].

Assim, tem havido a tentativa de encontrar soluções que facilitem este processo tentando integrar a engenharia inversa e as tecnologias CAD/CAM. As tentativas de melhoria têm sido no sentido de desenvolver o *design* a partir de fôrmas já existentes utilizando para isso metodologias de reconstrução de superfícies 3D. Estas metodologias consistem em criar superfícies partindo de nuvens de pontos obtidas a partir da digitalização das fôrmas. Depois da digitalização a geometria da fôrma é alterada

Os equipamentos de engenharia inversa permitem obter nuvens de pontos a partir das quais se faz a reconstrução de superfícies 3D obtendo o modelo desejado.

A reconstrução de superfícies 3D é uma metodologia de *design* baseada na reutilização de superfícies de um determinado modelo CAD para criar um novo. No âmbito do *design* de fôrmas, é realizada a sua digitalização da qual se obtém um conjunto de pontos a partir do qual se modela e modifica a sua geometria.

Processo de fabrico da fôrma

O processo de fabrico das fôrmas começa com o seu *design*, que geralmente é iniciado a partir de fôrmas já existentes. Assim, este processo consiste num processo de reconstrução e modificação dos modelos. Atualmente têm sido desenvolvidos alguns trabalhos no sentido de facilitar os métodos de reconstrução e de produção de fôrmas, recorrendo a tecnologias integradas CAD/CAM.

Produção em série

Na primeira metade do século XX surgiram inúmeras máquinas no mercado do calçado, com capacidade para produzir um par de fôrmas (a do lado esquerdo e a do lado direito) em apenas 5 minutos com uma precisão de $\pm 0,1$ mm. Estas máquinas eram constituídas por dois tornos, um para copiar o modelo original e outro para produzir a cópia através do desbaste com um disco de corte de um modelo em bruto. O torno cópia dispunha de um apalpador metálico com dimensão e posição relativa semelhantes às do disco de corte. Assim o modelo original da fôrma era fixado no torno cópia através das suas extremidades e um modelo em bruto era inserido no torno de corte. Quando a máquina era ligada, o apalpador tocava a superfície da fôrma e o seu movimento em espiral era transmitido através de um conjunto de braços até ao disco de corte, obtendo-se assim o modelo copiado. A utilização destas máquinas permitia obter superfícies e regiões com pequenos raios de curvatura, suaves. Seguidamente o operador retirava do torno o modelo copiado e removia manualmente o material excedente na região da biqueira e do calcanhar, obtendo-se assim a fôrma acabada [8].

Este processo era simples, robusto e preciso, sendo que o principal problema em termos de precisão era o acabamento manual de remoção das extremidades para fixação da fôrma. Contudo, os produtores de fôrmas para calçado utilizaram estas máquinas durante mais de 50 anos, devido à sua precisão e simplicidade de operar [8].

Com o passar dos anos as exigências do mercado aumentaram e a tecnologia CAD/CAM desempenha um papel fundamental na resposta aos atuais requisitos. Cada vez mais há a necessidade de inovar e apresentar novos produtos sendo para isso necessário ser-se mais rápido e dispor de tecnologia que acompanhe esta evolução.

Atualmente o maior desafio da produção de fôrma encontra-se do lado do *design* e da apresentação de protótipos, sendo que relativamente ao processo de maquinagem da fôrma não houve grandes alterações. O *design* da fôrma é a base de desenvolvimento do *design* de um modelo de calçado.

Mais recentemente, surgiram as máquinas com controlo numérico. Estas eram controladas a partir de computadores, embora fossem muito semelhantes às máquinas utilizadas anteriormente. O seu princípio de funcionamento era muito semelhante: havia um digitalizador mecânico que tocava a superfície da fôrma original e no computador eram registados os pontos do centro da ferramenta (o percurso da ferramenta). Finalmente, a máquina NC fazia a leitura dos pontos registados, ou seja do percurso [8].

Geralmente o processo de fabrico de fôrmas para calçado utilizando tecnologia CNC inclui 3 etapas. A primeira é a recolha de informação, em que um modelo físico ou um protótipo é medido com um apalpador com o objetivo de adquirir um conjunto de pontos tridimensionais correspondentes à sua informação geométrica. Na maioria das vezes esta informação é guardada automaticamente por um computador enquanto o apalpador se desloca ao longo da fôrma. A segunda etapa é o tratamento matemático dos dados obtidos, em que o conjunto de pontos tridimensionais está dividido em segmentos, cada um dos quais representa uma única entidade geométrica que pode ser matematicamente representada por várias superfícies. O tratamento dos dados é uma parte crucial no processo de maquinagem CNC. Este tratamento consiste na compensação do raio do apalpador, na manipulação dos dados para os tamanhos standardizados e na compensação do raio da ferramenta. A compensação dos raios do apalpador e da ferramenta é particularmente importante, uma vez que afeta diretamente a precisão e a suavidade do perfil produzido e por isso a precisão e eficácia dos produtos. A terceira etapa é o processo de maquinagem, cuja trajetória da ferramenta foi previamente calculada na etapa anterior[9].

Digitalização virtual

A digitalização virtual consiste num método para gerar percurso de maquinagem, baseado no processo tradicional que utiliza os tornos copiadores (pantógrafos). Na primeira etapa deste método é realizada uma digitalização virtual que produz o percurso de maquinagem constituído pelos pontos do centro da ferramenta obtidos através da simulação do contacto da ferramenta com a superfície da fôrma. Este processo pode ser dividido em vários passos, sendo o primeiro a definição do movimento da ferramenta, que através de uma velocidade angular constante gera um percurso em espiral com um determinado passo. O segundo é a obtenção de um modelo discreto da superfície da fôrma, tornando assim o algoritmo mais simples e rápido. Depois é realizada a simulação do movimento da ferramenta, fazendo um modelo virtual da ferramenta. Finalmente é realizado o processo de digitalização virtual a partir do qual é obtida a trajetória do percurso de maquinagem

(ver exemplo figura 25). Uma das principais desvantagens deste processo é o tempo necessário para a sua execução [5], [8].

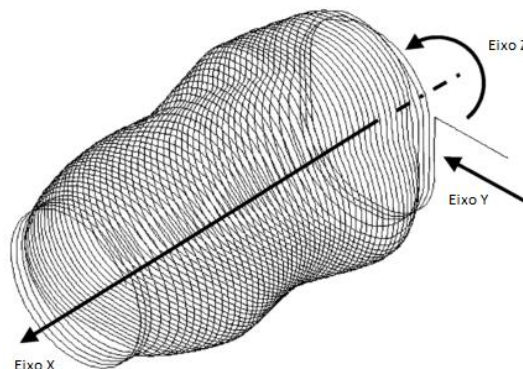


Figura 25 – Exemplo de um percurso de maquinagem gerado a partir do processo de digitalização virtual [8]

Produção do protótipo

Antes de ser iniciada a produção em série da fôrma, geralmente é produzido um protótipo. Tradicionalmente, quando estes ainda eram produzidos em madeira, o método utilizado para a sua produção era manual e consistia na composição de uma fôrma a partir de secções de várias outras. Assim, eram definidos os pontos por onde as fôrmas deveriam ser cortadas, de acordo com a compatibilidade do comprimento e da largura das várias partes, sendo depois cortadas com uma serra. Depois estas partes eram coladas e as juntas resultantes lixadas manualmente de forma a obter um modelo o mais suave possível. Este processo era validado por tentativa erro pelo operário, que de acordo com a sua experiencia, determinava se a fôrma estava acabada em função de uma avaliação visual e ao toque [1].

Atualmente ainda são produzidos protótipos manualmente, mas são cada vez mais utilizados métodos de prototipagem rápida.

Desenvolvimento de métodos para a digitalização e reprodução de fôrmas para calçado

Para dar resposta à necessidade de criar novas aplicações para a célula robótica da Vancal, foram desenvolvidos métodos de digitalização e reprodução de fôrmas para calçado, para que, no futuro, a empresa possa vir a produzir protótipos de fôrmas. A produção de protótipos na célula robótica constitui uma alternativa inovadora face ao atual processo de produção.

O desenvolvimento dos métodos de digitalização e reprodução de fôrmas para calçado acima referido foi executado de forma cíclica, sendo que na etapa de digitalização da

fôrma foi integrada uma terceira etapa, a modelação. O ciclo de desenvolvimento encontra-se na figura abaixo representada.

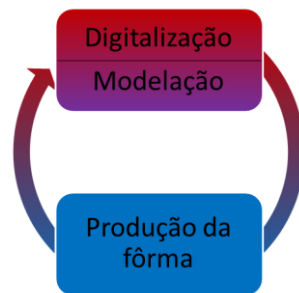


Figura 26 – Ciclo de desenvolvimento dos métodos de digitalização e reprodução de fôrmas

Seguidamente serão apresentados os fluxogramas representativos das etapas do ciclo de desenvolvimento, sendo primeiramente apresentado o da digitalização e modelação e só depois o da reprodução da fôrma.

Desenvolvimento dos métodos de digitalização e modelação da fôrma

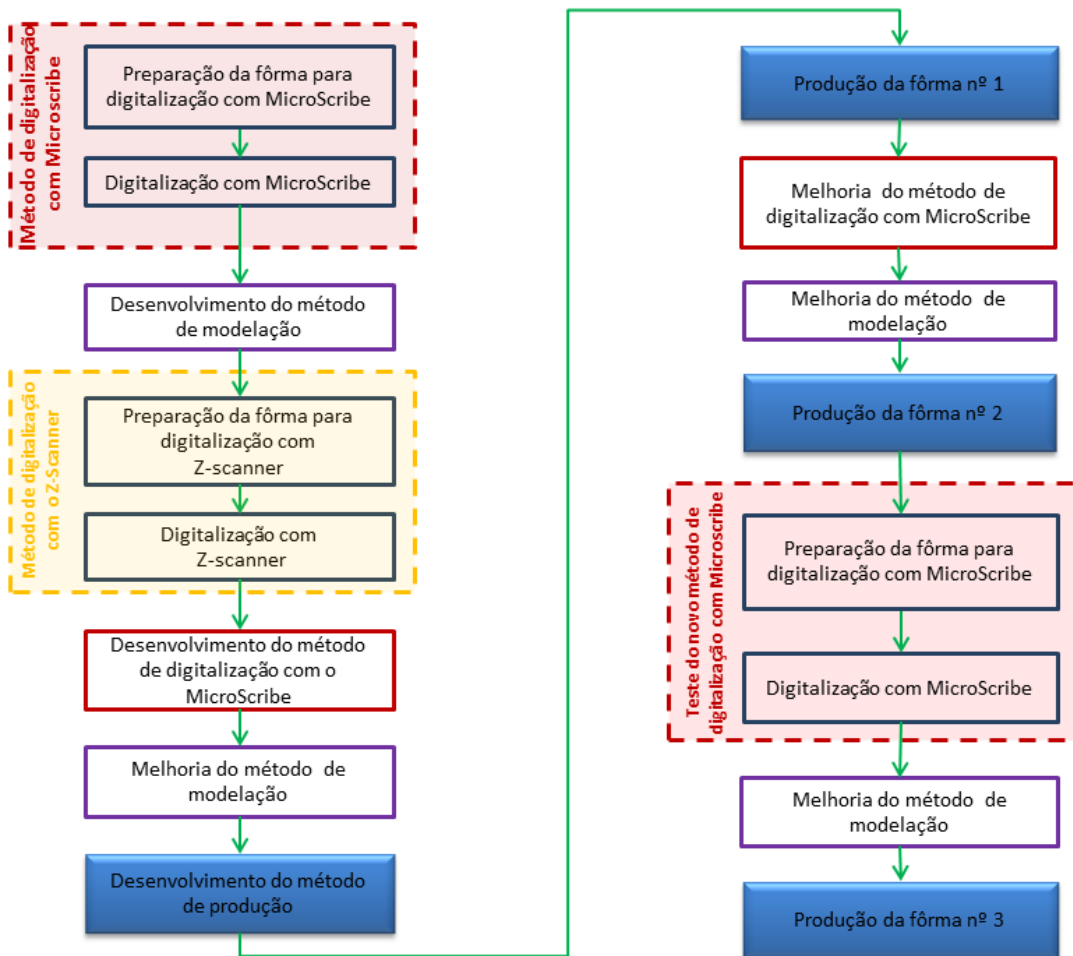


Figura 27- Fluxograma do desenvolvimento e automatização da produção de fôrmas para calçado

O desenvolvimento dos métodos de digitalização e modelação da fôrma, de acordo com o fluxograma acima apresentado, foi realizado em várias etapas. Inicialmente foi realizada a digitalização da fôrma com o MicroScribe, que é o equipamento de digitalização 3D de que a Vancal dispõe. No entanto, o procedimento utilizado tornou a sua modelação no PowerSHAPE demorada e ineficaz, pelo que foi necessário repensar este método.

Seguidamente, tendo em vista a melhoria do processo recorreu-se à utilização de outro equipamento: o Z-Scanner. O resultado desta digitalização foi um modelo da fôrma no formato stl. O modelo neste formato foi utilizado para tornar o passo de desenvolvimento do método de digitalização com o MicroScribe mais rápido.

O passo de desenvolvimento do método de digitalização com o MicroScribe consistiu em definir linhas de referência que auxiliam a digitalização dos pontos necessários para o passo seguinte: a modelação.

A melhoria do método de modelação consistiu em criar as superfícies o mais suavemente possível a partir dos pontos digitalizados.

A etapa seguinte foi o desenvolvimento do método de produção cuja descrição será abordada mais à frente, com base noutra fluxograma.

Finalmente foi produzida a fôrma nº1, a partir da qual foi feita uma avaliação do trabalho realizado até então e foram redefinidos os objetivos para a continuação do desenvolvimento dos métodos.

A melhoria dos métodos até à produção da fôrma nº2 foi a continuação do trabalho realizado para a produção da primeira fôrma, na medida em que a execução deste trabalho de engenharia inversa implicou a aquisição de experiência. Entenda-se como aquisição de experiência, a capacidade de fazer a correta análise da forma do modelo e assim definir eficazmente os métodos de digitalização e de modelação.

A última etapa deste processo foi a aplicação dos métodos desenvolvidos para a digitalização com o MicroScribe e para a modelação da fôrma, tendo tudo isto culminado com a produção da fôrma nº 3.

Método de digitalização da fôrma com o MicroScribe

O MicroScribe é um aparelho de fácil utilização, mas do ponto de vista da modelação, a fôrma é uma peça complexa, o que dificulta a sua digitalização. Assim, antes de a iniciar, foi pesquisada informação para esse efeito, contudo a informação encontrada foi insuficiente, o que dificultou este desafio. Desta forma, juntamente com a informação encontrada, tentou-se encontrar a melhor forma de proceder.

O primeiro passo desta etapa foi preparar a fôrma para a digitalização, isto é, foram traçadas linhas na sua superfície que auxiliaram a posterior marcação dos alvos (pontos marcados em zonas estratégicas da fôrma a partir dos quais se desenharam as curvas que definem a sua geometria). Na figura 28 está representado um exemplo das configurações de alvos definidos durante a fase de preparação da fôrma.



Figura 28- Fotografia da fôrma com os alvos antes da digitalização com o MicroScribe.

Procurou-se que o número e a distribuição dos alvos marcados fossem suficientes para garantir a geometria da curva com um erro cordal aceitável. Houve também a intenção de definir pontos de interceção entre as linhas de forma a garantir pontos de referência que facilitem a modelação da fôrma.

Depois de marcados os alvos, realizou-se a digitalização propriamente dita. Inicialmente, para tornar o processo de desenvolvimento mais rápido, apenas foram definidos os alvos necessários para a modelação da parte de frente do corpo, que corresponde à região do peito-do-pé. A primeira digitalização foi realizada sem fixar a fôrma a um suporte, o que obrigou a definir planos de trabalho que permitissem a correspondência das várias curvas desenhadas. As curvas foram desenhadas a partir da digitalização dos alvos, ou seja, com a ponta da caneta do MicroScribe percorreram-se todos os alvos marcados ao longo de cada uma das linhas traçadas na superfície da fôrma. Simultaneamente, no PowerSHAPE à medida que eram digitalizados os alvos eram criadas curvas *bezier* semelhantes aquelas que haviam sido traçadas na fôrma. No final da digitalização obteve-se o modelo de arames representado na figura 29.

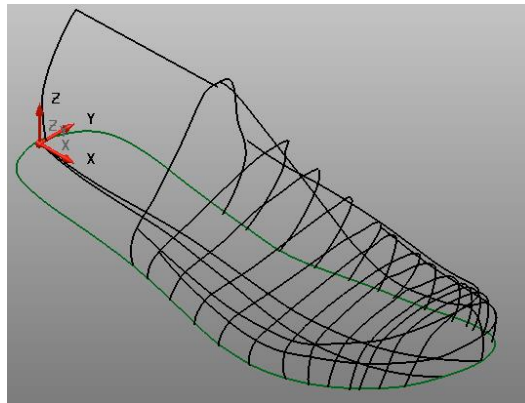


Figura 29-Representação do modelo de arames obtido após digitalização com o MicroScribe

O passo da modelação foi o que sucedeu à digitalização da fôrma. Contudo, antes da modelação fez-se uma pequena análise à qualidade das curvas do modelo de arames. Esta análise foi realizada porque as superfícies que definem a fôrma são tanto mais suaves quanto mais suave forem as curvas do modelo de arames. Durante esta operação foram detetados desvios nos pontos de interceção das curvas, assim como a necessidade de as planificar e suavizar. Na figura 30 está representada uma vista da fôrma onde é possível visualizar exemplos dos desvios acima referidos.

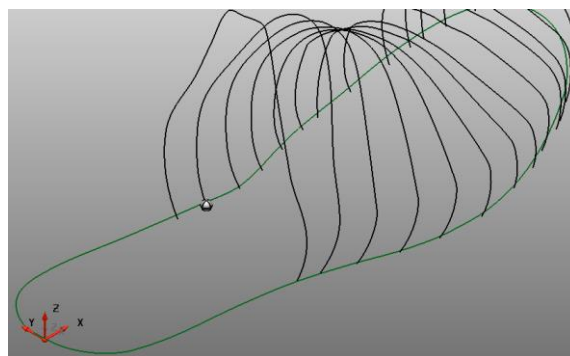


Figura 30- Exemplos de desvios verificados nos locais onde deveria haver interceção dos pontos das curvas da fôrma, neste caso entre a curva desenhada ao longo da planta e as extremidades dos anéis.

O raio da esfera que se encontra na ponta de uma das curvas é igual a 1,97 mm e foi utilizado para medir o desvio entre essa curva e a da planta. Esta medição foi realizada com o intuito de conhecer a ordem de grandeza dos desvios, visto que nesta fase o principal objetivo era criar um primeiro modelo da fôrma e depois refletir acerca das melhorias a efetuar no processo. A necessidade de suavização das curvas está demonstrada através do exemplo apresentado na figura 31.

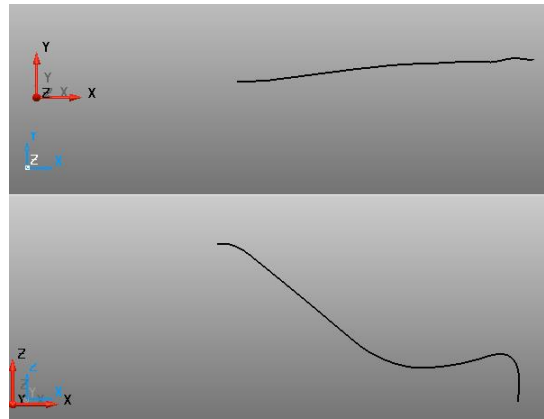


Figura 31- Exemplo de curva que deveria ser planificada. Em cima está representada uma vista de topo e em baixo está representada uma vista lateral da mesma curva.

Embora através da vista lateral da curva não seja possível demonstrar a necessidade de a planificar, com a vista de topo essa necessidade é evidente, já que se pode confirmar que esta se trata de uma curva 3D. O facto de planificar a curva permite que a sua suavização seja realizada com maior facilidade e que as superfícies criadas sejam também mais suaves. Outro exemplo é ainda demonstrado na figura 32 através da análise das tangencias de cada ponto, onde se pode verificar a necessidade de suavizar a curva da planta.

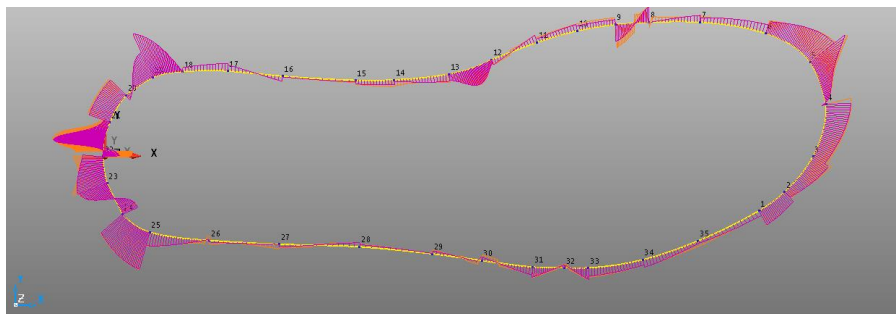


Figura 32 - Exemplo de curva que deveria ser suavizada.

A modelação das curvas que compõem o modelo de arames foi a fase mais demorada, tendo sido feitas as seguintes operações:

- Movimentação controlada dos pontos de interceção para que fiquem coincidentes;
- Planificação das curvas;
- Suavização das curvas;
- Renumeração e reordenamento dos pontos das curvas;

Depois de concluídas as operações anteriores foi pensada a forma como deveriam ser criadas as superfícies. Como já foi referido, a fôrma tem uma geometria complexa, não sendo por isso possível que esta fosse modelada utilizando uma única superfície.

Na figura 33 estão representadas as superfícies que constituem a fôrma, depois de efetuadas as alterações no modelo de arames. Cada uma das superfícies está delimitada por linhas amarelas, à exceção das linhas verticais na base da fôrma, visto que essas pertencem a uma única superfície. O tipo de superfícies criadas foi *Power Surfaces*, que se caracterizam pela facilidade e variedade de entidades editáveis.

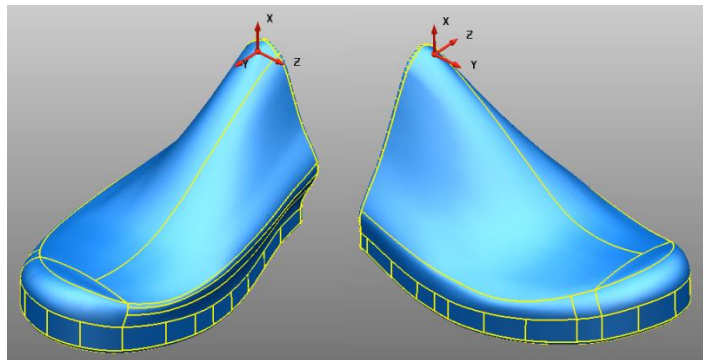


Figura 33 - Superfícies que constituem a fôrma. À esquerda está uma vista isométrica do lado esquerdo da fôrma. À direita está uma vista isométrica do lado direito da fôrma.

Na figura 34 está representada a fôrma com um sombreamento que facilita a avaliação da suavidade das superfícies. De uma forma geral, as superfícies encontravam-se suaves, contudo nas regiões em que a curvatura é de menor raio verificaram-se alguns vincos.

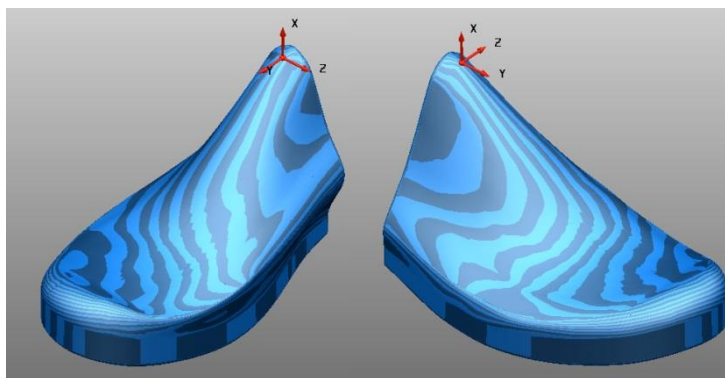


Figura 34 - Avaliação da suavidade das superfícies que constituem a fôrma.

Depois de concluída a modelação da parte da frente da fôrma foi realizada uma análise do processo e da qualidade do modelo obtido, antes de avançar para o resto da modelação da fôrma. Desta análise resultou que a estratégia utilizada na modelação não era

suficientemente simples para torná-la eficiente. A abordagem utilizada para a modelação não foi a ideal tendo em consideração a geometria em questão, o que provocou alguns desvios geométricos do modelo, assim como a utilização de um tempo excessivo para o objetivo pretendido.

A etapa seguinte foi tentar corrigir os erros da abordagem anterior e assim conseguir responder ao objetivo proposto.

Método de digitalização da fôrma com o Z-Scanner

Para repensar o processo de digitalização e modelação da fôrma com o MicroScribe mais celeremente, foi utilizado outro equipamento: o Z-Scanner. O Z-Scanner tem a vantagem de poder criar modelos em formato stl, permitindo assim dispor de um modelo CAD da fôrma para desenvolver o processo de digitalização com o MicroScribe.

A digitalização da fôrma com o Z-Scanner foi efetuada em vários passos. O primeiro foi colar os alvos na superfície da fôrma respeitando as restrições necessárias ao seu correto funcionamento. Assim, foram evitadas as regiões com ângulos de curvatura superiores e próximos de 90° , assim como, se tentaram colar os alvos de modo a permitir que o *scanner* conseguisse focar no mínimo 4 alvos durante o processo de digitalização. A disposição em que foram colados os alvos na superfície da fôrma está representada na figura 35.



Figura 35 - Vistas da fôrma depois de colocados os alvos para a digitalização com o Z-Scanner.

O segundo passo foi ajustar os parâmetros do *software* do Z-Scanner permitindo a obtenção de um modelo cuja malha tivesse qualidade suficiente para dar resposta ao objetivo pretendido.

Depois, digitalizaram-se primeiro os alvos colados na superfície da fôrma e seguidamente a sua superfície, tendo-se obtido o modelo representado na figura 36. Conforme se pode visualizar na figura, o modelo apresenta algumas descontinuidades provocadas pela própria

fôrma, como é o caso dos furos existentes nas faces laterais e no topo, e por alguma falha que possa ter ocorrido durante o processo de digitalização.

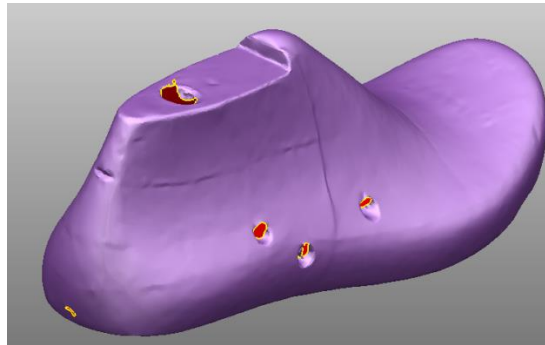


Figura 36 - Representação do modelo obtido através da digitalização com o Z-Scanner.

Antes de se poderem definir as linhas para marcação dos alvos utilizados na digitalização com o MicroScribe, foi necessário reparar o modelo obtido. A reparação do modelo foi realizada no PowerSHAPE, utilizando as ferramentas de modelação de malhas trianguladas. Na figura 37 está representado o modelo depois de ter sido reparado.

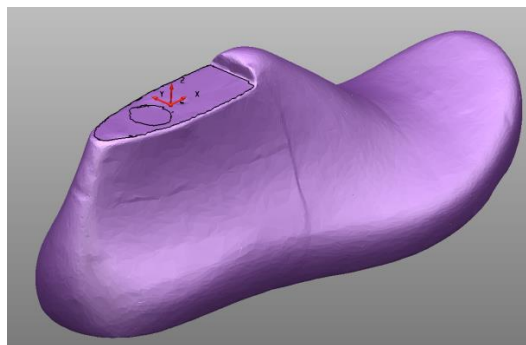


Figura 37 - Representação do modelo da fôrma em formato stl depois de reparado no PowerSHAPE.

Etapas de melhoria da digitalização com o MicroScribe e respetiva modelação

Com a obtenção do modelo da fôrma no formato stl deixou de ser utilizado o MicroScribe para desenvolver o método de digitalização. Em alternativa, a digitalização dos alvos (com o MicroScribe) a partir dos quais se modelaram as curvas *bezier*, foi simulada no PowerSHAPE. Esta simulação consistiu em importar o modelo stl para o PowerSHAPE e criar curvas diretamente na sua malha triangulada. Estas curvas serviram para representar as curvas obtidas a partir da digitalização com o MicroScribe.

A simulação tinha como principal vantagem a sua celeridade, no entanto, como simulação que é, possui algumas desvantagens, nomeadamente a não reprodução dos erros associados à digitalização com o MicroScribe. Um exemplo dos referidos erros é a variação da exatidão na digitalização dos pontos, provocada por diversos fatores como a estrutura do

próprio equipamento ou a forma como o utilizador posiciona a ponteira na superfície da fôrma.

O primeiro passo desta etapa de melhoria foi reanalisar a geometria da fôrma tentando assim perceber uma abordagem mais adequada, tanto para a sua digitalização como para a sua modelação.

Seguidamente foi iniciada a simulação no PowerSHAPE e a subsequente modelação. Esta etapa desenvolveu-se de modo iterativo, ou seja, foram realizadas várias tentativas de simulação da digitalização e de modelação até ser obtido um resultado aceitável.

Fruto do desenvolvimento destes métodos foi desenvolvida simultaneamente uma metodologia de conversão de malhas trianguladas em superfícies CAD, que é descrita noutra tópicos deste trabalho.

O primeiro conjunto de curvas para modelação da fôrma está representado na figura 38. Estas curvas foram obtidas a partir de linhas projetadas na superfície da malha triangulada da fôrma. Relativamente à digitalização com o MicroScribe, a principal diferença foi a utilização de curvas verticais relativamente ao plano XY. Assim, foram criadas superfícies sem necessidade de planificar as curvas que teriam de ser submetidas a uma posterior suavização.

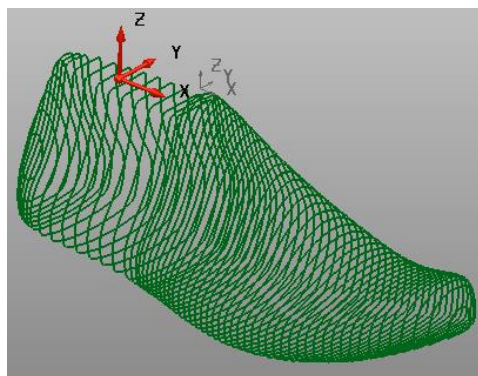


Figura 38 - Anéis formados pela projeção de linhas no modelo triangulado da fôrma.

Efetivamente, houve uma melhoria relativamente à qualidade das superfícies criadas, contudo havia um conjunto de falhas que deveriam ser colmatadas. A zona da biqueira e do calcanhar não estavam corretamente definidas (ver figura 39) e o número de anéis utilizados era excessivo (ver figura 38), uma vez que reproduzir todos eles na digitalização com o MicroScribe tornaria o processo demasiado moroso.

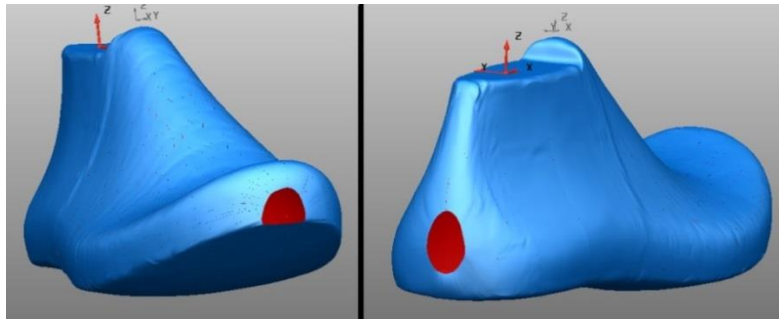


Figura 39 - Falhas ocorridas na criação das superfícies na zona da Biqueira (à esquerda) e do calcanhar (à direita).

Para modelar a zona da biqueira e do calcanhar foram definidas linhas transversais relativamente às utilizadas para formar os anéis demonstrados na figura 38. Conforme demonstrado na figura 40, a reorientação das linhas permitiu criar eficazmente as superfícies.

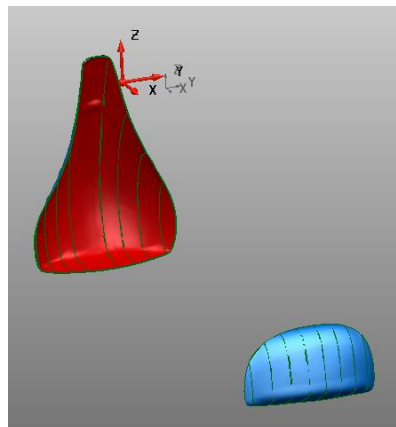


Figura 40 – Superfícies da zona da biqueira e do calcanhar criadas a partir de linhas projetadas transversalmente relativamente aos anéis.

Assim, foi obtida a primeira fôrma a partir do método de projeção de linhas cujas superfícies apresentavam boa qualidade (ver figura 41). No entanto, manteve-se o problema do número excessivo de linhas, que foi objeto de melhoria do passo seguinte.

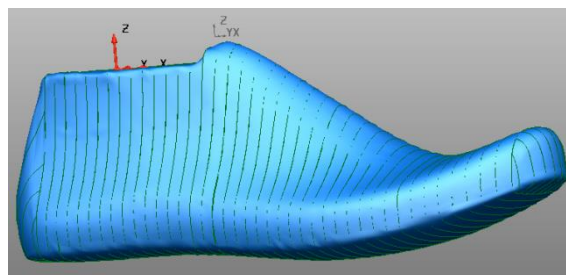


Figura 41 – Fôrma resultante da nova configuração da projeção de linhas

Sendo assim, não só se reduziu o número de curvas, como para além disso se alterou o método de criação das superfícies. Até então, todas as superfícies, excetuando as da biqueira e do calcanhar, foram criadas em forma de manga conforme é ilustrado na figura 42. Porém, daí para a frente essas superfícies passaram a estar divididas por uma linha que atravessa a fôrma longitudinalmente desde a biqueira até ao calcanhar (ver figura 43).

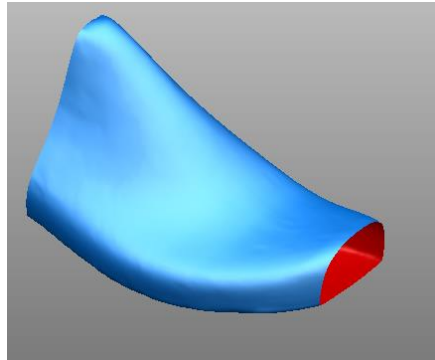


Figura 42 – Ilustração da metodologia de criação das superfícies da fôrma em forma de manga.

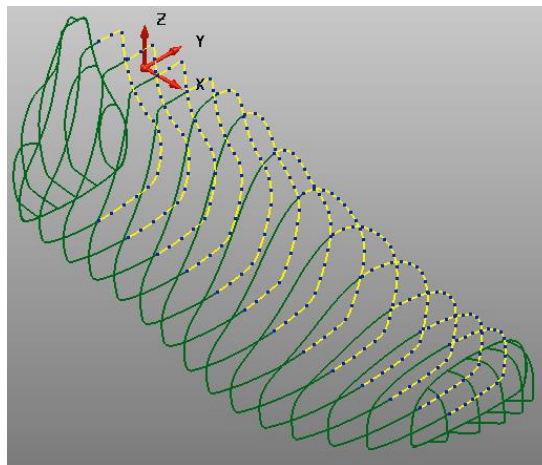


Figura 43 – Ilustração da redução do número de anéis e da sua divisão

Finalmente foi realizado o modelo que deu origem à produção da primeira fôrma, ao qual foram adicionados o suporte para maquinagem e o plano de trabalho de exportação para o PowerMILL. O suporte foi criado a partir de uma curva desenhada na zona onde este iria ficar posicionado e a partir da qual foi feita uma extrusão de comprimento igual a 50 mm. O plano de trabalho foi definido de modo a orientar o modelo para a posição pretendida, neste caso com a planta voltada para cima e com o calcanhar voltado para o robô. A orientação dos eixos do plano de trabalho de exportação foi a mesma do plano de trabalho “world” do robô. Na figura 44 está representado o modelo da fôrma nº1 utilizado para a programação da sua maquinagem.

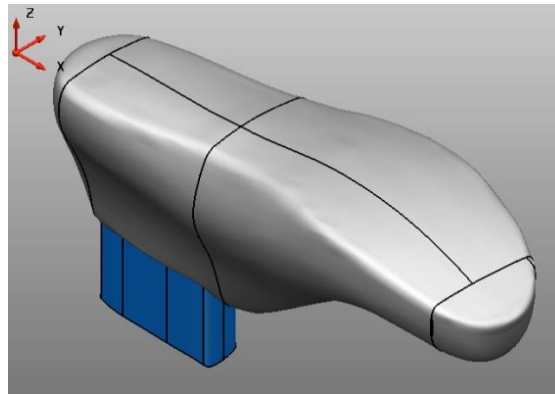


Figura 44 – Modelo da fôrma nº1

Após a conclusão da modelação foi desenvolvido o método de reprodução da fôrma.

A produção da primeira fôrma foi o ponto de partida para iniciar uma nova etapa de desenvolvimento da sua digitalização e modelação.

Desta vez, a alteração do processo de desenvolvimento consistiu em dividir a fôrma num maior número de partes, para que esta fosse constituída por um conjunto de superfícies mais pequenas, evitando assim as deformações verificadas nas zonas de menor raio de curvatura do modelo da fôrma nº1. Na figura 45 está representado o novo método utilizado.

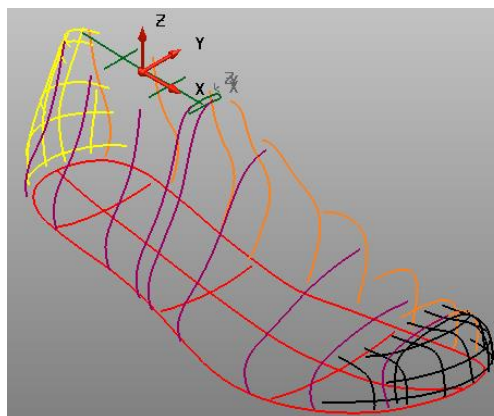


Figura 45 – Representação do método de digitalização da fôrma

As superfícies da fôrma foram criadas a partir do modelo de arames apresentado na figura 45, sendo depois estendidas para permitir o corte das superfícies. O corte foi realizado de modo interativo, ou seja, as superfícies foram cortadas umas com as outras nas linhas que definiam a sua interceção. O resultado obtido é apresentado na figura 46, onde se podem visualizar as linhas amarelas que representam a fronteira de cada uma das superfícies criadas

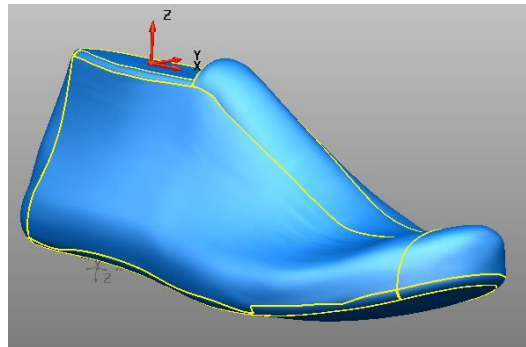


Figura 46 – Modelo da fôrma nº2.

A produção da segunda fôrma encerrou o processo de desenvolvimento da digitalização e da modelação recorrendo ao modelo stl obtido com o z-scanner.

Teste do novo método de digitalização com o MicroScribe

Durante todo o processo de desenvolvimento foi produzida apenas mais uma fôrma, produção esta que serviu para testar os conhecimentos desenvolvidos e adquiridos até então.

Apesar de esta etapa ter sido reservada para testar as metodologias de digitalização e de modelação desenvolvidas até ao momento, ainda foram introduzidas novas alterações.

O modo como foram definidos os alvos para a digitalização foi novamente objeto de alterações. Os alvos e as respetivas linhas que os definem são apresentados na figura 47. Ao definir os alvos, procurou-se utilizar o menor número necessário dos mesmos para descrever corretamente a geometria da fôrma. O número de linhas que definem os alvos aumentou, uma vez que se optou por dividir a geometria da fôrma num maior número de superfícies, evitando-se assim que estas descrevessem áreas com raios reduzidos de curvatura.



Figura 47 - Ilustração dos alvos (a vermelho) definidos na fôrma para digitalização com o MicroScribe

É ainda de referir que para facilitar a operação de digitalização com o MicroScribe foi desenvolvido um suporte para a fôrma (ver figura 48).



Figura 48 – Fotografia dos meios utilizados na digitalização com o MicroScribe.

O processo de modelação também foi alterado, já que ao contrário do que tinha sido feito nas outras etapas, em que a modelação apenas era iniciada depois de estarem digitalizados todos os alvos, desta vez iam-se modelando as superfícies à medida que as suas linhas laterais e longitudinais iam sendo criadas. Outra das diferenças foi o facto de terem sido criadas superfícies de ligação nas zonas com raios de curvatura mais reduzidos. Na figura 49 está representado um exemplo das superfícies referidas assim como das linhas laterais e longitudinais que a definem. Estas superfícies foram criadas a partir do prolongamento de linhas pertencentes às superfícies adjacentes e das suas fronteiras, para que se obtivesse uma maior suavidade na zona de ligação das superfícies.

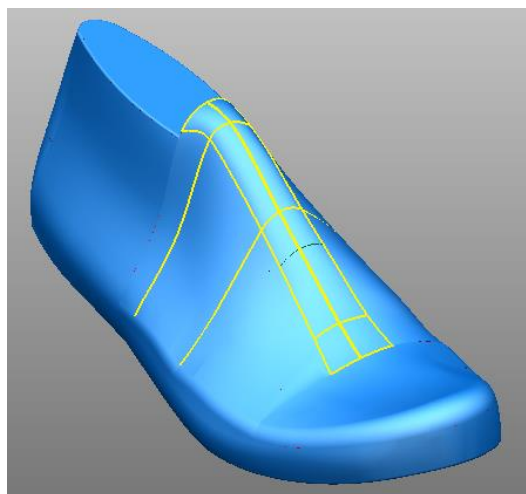


Figura 49 - Modelo da fôrma nº3

A utilização deste método de digitalização de modelação revelou-se mais adequado, no entanto, como é possível visualizar na figura anterior, existem zonas com vincos que poderiam ser suavizadas. Contudo, devem ser consideradas as limitações inerentes à cinemática do robô, que levam a que o modelo não seja reproduzido com a mesma tolerância com que é modelado. Para além disso o diâmetro da ferramenta a utilizar também influencia o resultado obtido, uma vez que alguns dos detalhes com raio inferior ao da ferramenta não são reproduzidos na maquinagem da fôrma.

A descrição do desenvolvimento do método de digitalização e de modelação da fôrma foi concluído com o início da produção da terceira fôrma.

Desenvolvimento do método de reprodução de fôrmas

Na figura 50 está representado o fluxograma do método de reprodução de fôrmas, no qual é possível visualizar o caminho percorrido desde o final da primeira etapa de desenvolvimento dos métodos de digitalização e de modelação até à maquinagem da fôrma nº 3.

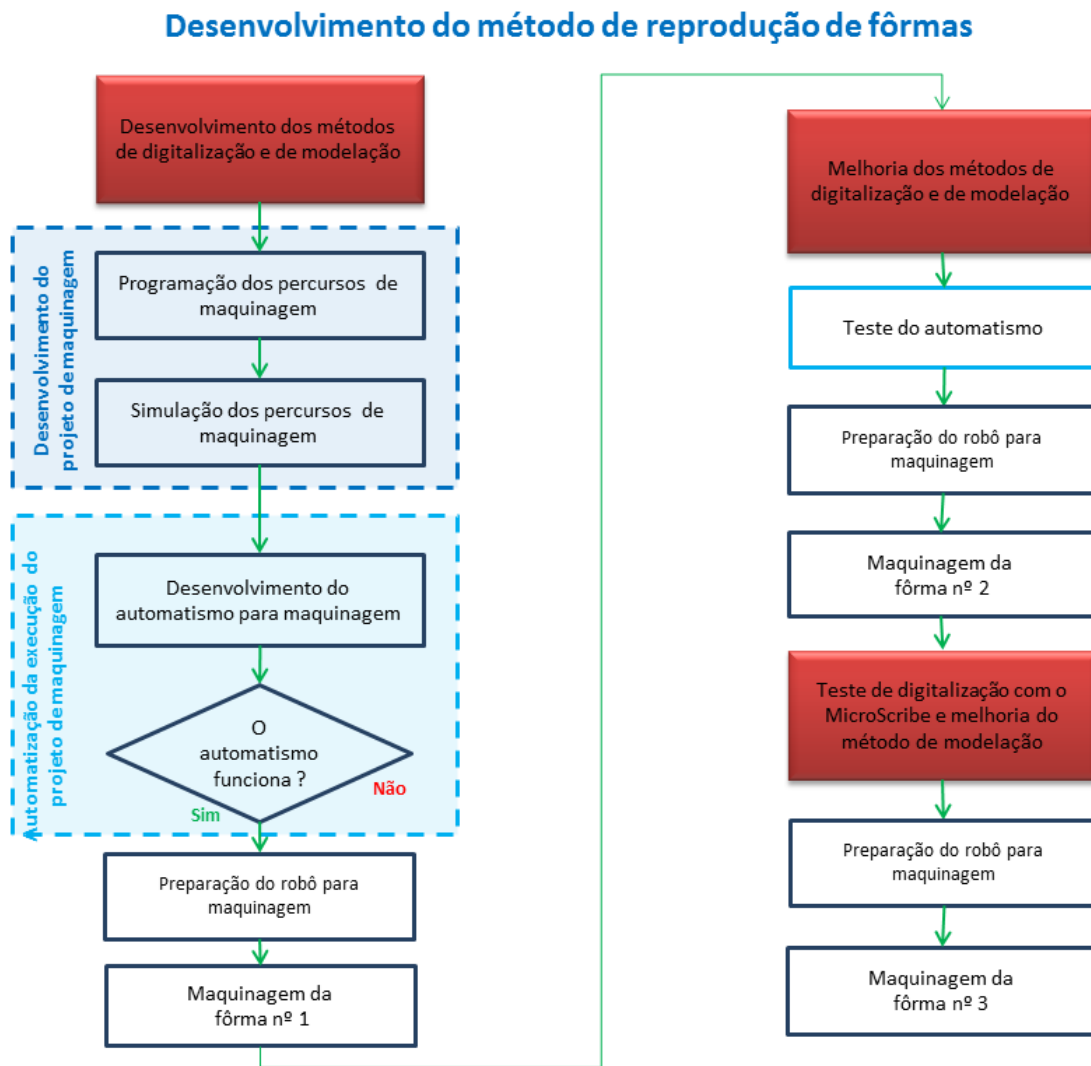


Figura 50 - Fluxograma do desenvolvimento do método de reprodução de fôrmas.

O início do desenvolvimento das etapas de reprodução de fôrmas foi realizado na sequência do desenvolvimento inicial dos métodos de digitalização e de modelação.

A etapa de desenvolvimento do projeto de maquinação da fôrma foi iniciada com a seleção, programação e simulação dos percursos no PowerMILL.

O processo de automatização consistiu em criar uma macro no PowerMILL, que permitisse gerar automaticamente o projeto de maquinação da fôrma.

Na etapa de preparação da célula robótica para maquinação, colocou-se o bloco no sistema de fixação e definiu-se o seu plano de trabalho. Seguidamente procedeu-se à calibração da ferramenta e definiu-se também o seu plano de trabalho. Concluída esta etapa maquinação-se a primeira fôrma.

Seguiu-se uma nova etapa de desenvolvimento dos métodos de digitalização e de modelação, após os quais se realizou um novo teste ao automatismo criado, tendo sido detetadas algumas falhas.

Para maquinar a fôrma nº2, antes de se preparar a célula robótica, foi efetuada uma alteração à programação dos percursos de desbaste.

Finalmente, foi realizada a última etapa que consistiu em maquinar a fôrma nº3 na célula robótica da Vancal.

Desenvolvimento do projeto de maquinagem


O desenvolvimento do projeto de maquinagem foi constituído por vários passos até se chegar à maquinagem da peça propriamente dita. Inicialmente foi selecionado o material e a ferramenta a utilizar, passando depois à definição das estratégias de maquinagem e respetivas simulações. Seguidamente pós processaram-se os programas e preparou-se a célula robótica, tendo-se no final executado a maquinagem da peça.

O material utilizado para a produção da primeira e da segunda fôrma foi EPS (Poliestireno expandido), por ser um material macio e por isso indicado para a maquinagem robotizada, para além do seu custo ser baixo relativamente a outros materiais, como por exemplo o *necuron*.

A seleção das ferramentas para maquinar as duas primeiras fôrmas foi limitada ao *stock* de ferramentas existente na Norcam. As dimensões da ferramenta selecionada estão apresentadas na tabela que se segue, sendo que as dimensões do porta-ferramentas serviram apenas de referência para as simulações dos percursos de maquinagem.

Tabela 5 – Ferramenta utilizada na maquinagem das fôrmas nº 1 e nº 2.

Peça		Fôrma nº 1; Fôrma nº 2
Tipo		Esférica
Ponta (mm)	diametro	10
	comprimento	45
haste (mm)	Ø superior	10
	Ø inferior	10
	comprimento	140
Porta ferramentas (mm)	Ø superior	50
	Ø inferior	50
	comprimento	90



O passo que se seguiu foi definir o posicionamento da peça relativamente ao robô, assim como o seu sistema de fixação. Ao posicionar a peça tentou facilitar-se o acesso da ferramenta a todas as suas regiões sem movimentar os eixos do robô excessivamente (figura 51).

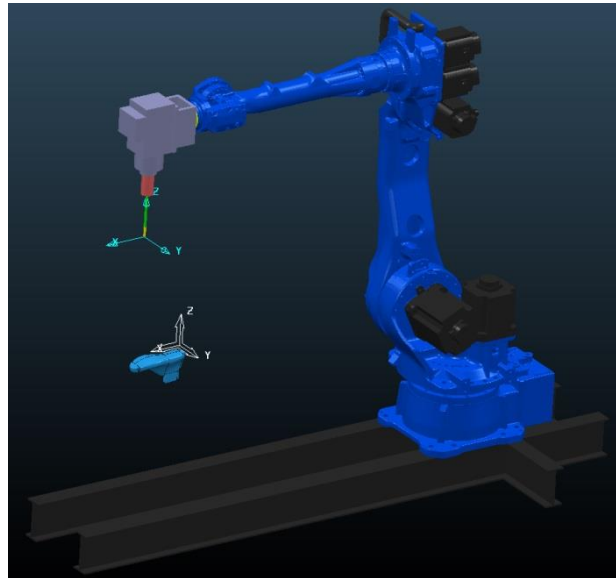


Figura 51 - Posicionamento da fôrma na célula robótica da Norcam.

Depois de encontrada a solução para posicionar a peça, definiu-se o tipo e a estratégia de maquinação para cada operação. O tipo de estratégia utilizada nas operações de desbaste e de acabamento foi 3+2 eixos, pelos mesmos motivos que levaram a esta escolha na maquinação da peça de xadrez. As estratégias utilizadas e os respetivos parâmetros estão apresentados na tabela 8.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na maquinação da fôrma nº 1.

Peça		Fôrma nº 1		
Operação		Desbaste (esq + drt)	Acabamento (esq+drt)	
Estratégia	Estratégia	offset all	Z constante otimizado	
	Tolerância (mm)	0.1		
	Espessura (mm)	1	0	
	Passo (mm)	Lateral	10	1
		Vertical	8	-
	Eixo da ferramenta	vertical		
Ligações	rasante			
Velocidade (mm/min)	Avanço	1000		
	Mergulho	500		
Duração		2h	1h10min	

Os parâmetros registados na tabela anterior, assim como a duração de cada operação são referentes a um conjunto de duas estratégias, uma para o lado esquerdo e outra para o lado direito da peça (ver figuras 52 e 53).

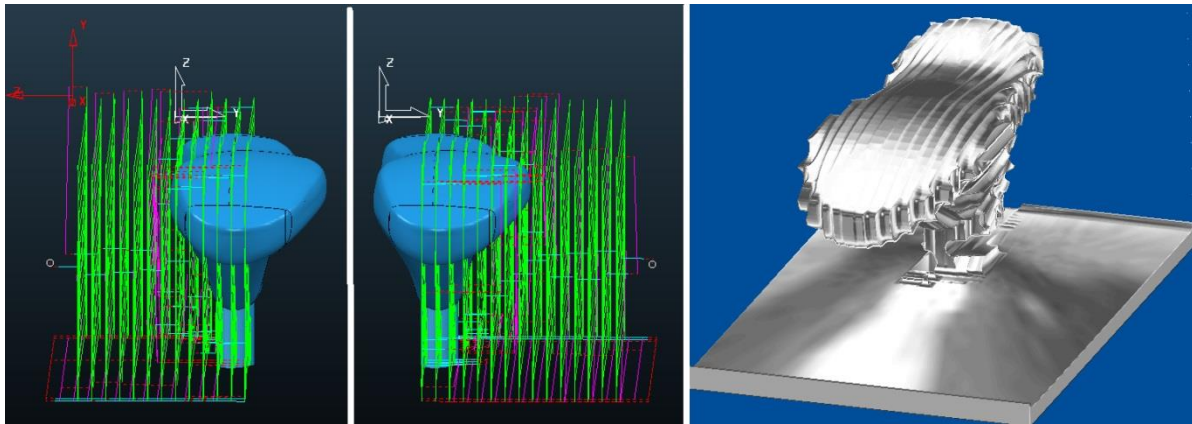


Figura 52 – Percursos de maquinagem da operação de desbaste e respetiva simulação no *view mil*.

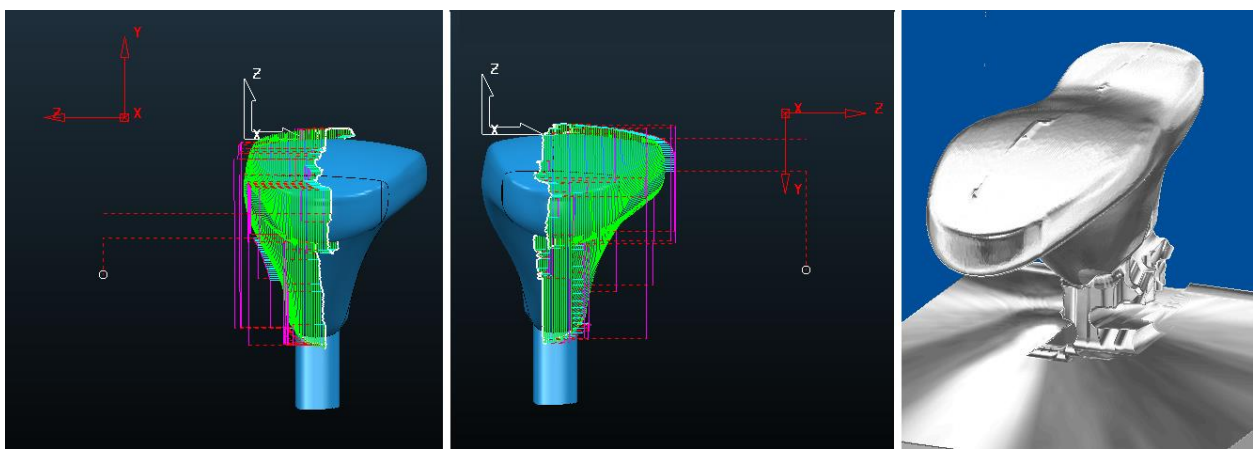


Figura 53 - Percursos de maquinagem da operação de acabamento e respetiva simulação no *view mil*.

O passo que se seguiu foi o controlo da cinemática do robô e a simulação da maquinagem na célula robótica virtual, recorrendo ao PRI. A simulação dos percursos nesta aplicação permitiu analisar não só a cinemática do robô, nomeadamente a ocorrência de singularidades e alcance de limite de eixos, como a ocorrência de colisões na célula. O correto posicionamento do bloco e a seleção das estratégias facilitou o controlo da cinemática do robô, pelo que apenas foi necessário utilizar um vetor para restringir a direção do eixo de rotação da ferramenta.

Depois de concluídos os passos acima descritos foi iniciada a etapa de automatização do projeto de maquinagem.

Automatização do projeto de maquinagem

O processo de automatização foi iniciado com a realização de uma lista que incluía a sequência de passos necessários para executar o projeto de maquinagem, como por exemplo: definir o bloco, os planos de trabalho para cada estratégia, os percursos, etc. Depois, programou-se uma macro no PowerMILL para executar os passos registados na lista.

A programação foi validada por tentativa erro, ou seja a macro foi sendo testada à medida que iam sendo programados novos passos, até a sua programação estar concluída.

O código de programação da macro encontra-se no anexo 2.

No final do processo de automatização os programas foram pós-processados e introduzidos no controlador do robô.

Preparação da célula robótica para maquinagem

A preparação da célula foi a última etapa antes de iniciar a maquinagem da fôrma e consistiu em proceder à calibração da ferramenta e em definir o plano de trabalho do bloco.

A operação de calibração da ferramenta é realizada depois de esta estar acoplada no porta-ferramentas e consiste em medir a distância entre a sua ponta e a superfície do porta-ferramentas (que fica em contacto com o *spindle*) relativamente a uma superfície de referência (ver figura 54). Depois de se realizar três vezes essa medição e de se obter a sua média, esta foi introduzida no PRI que determinou as coordenadas da ponta da ferramenta. Este cálculo é efetuado relativamente ao seu eixo de rotação, que é determinado através do processo de calibração do *spindle*.

O plano de trabalho da ferramenta foi definido com base nas coordenadas de três pontos-chave que permitem determinar os três eixos do plano de trabalho.

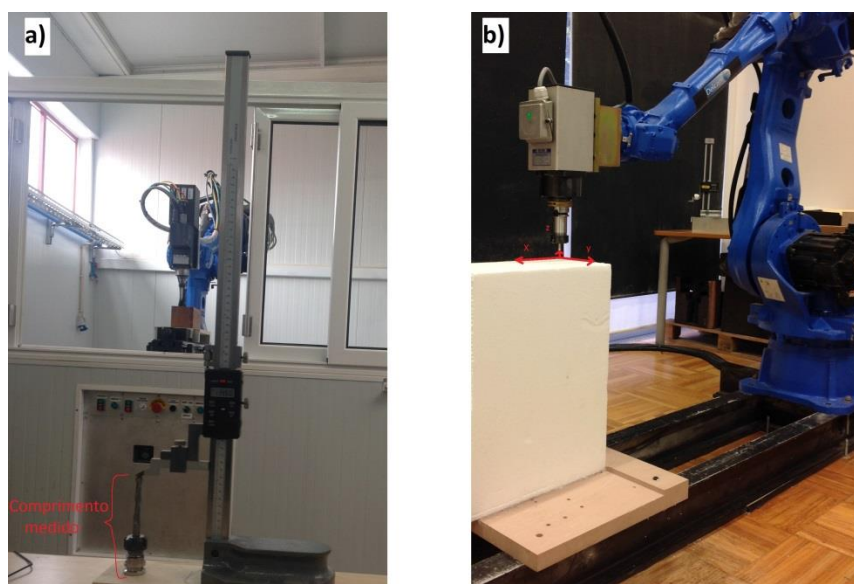


Figura 54 – Representação das etapas de preparação de uma célula robótica.

Finalmente, os dados de calibração e as coordenadas do plano de trabalho são inseridos no controlador do robô, encontrando-se assim a célula pronta para iniciar a maquinação da fôrma.

Maquinação da fôrma nº1

A maquinação da fôrma nº 1 foi a última etapa do primeiro ciclo de desenvolvimento do método de reprodução de fôrmas para calçado.

Na figura que se segue estão representadas as etapas de maquinação e a fôrma acabada.

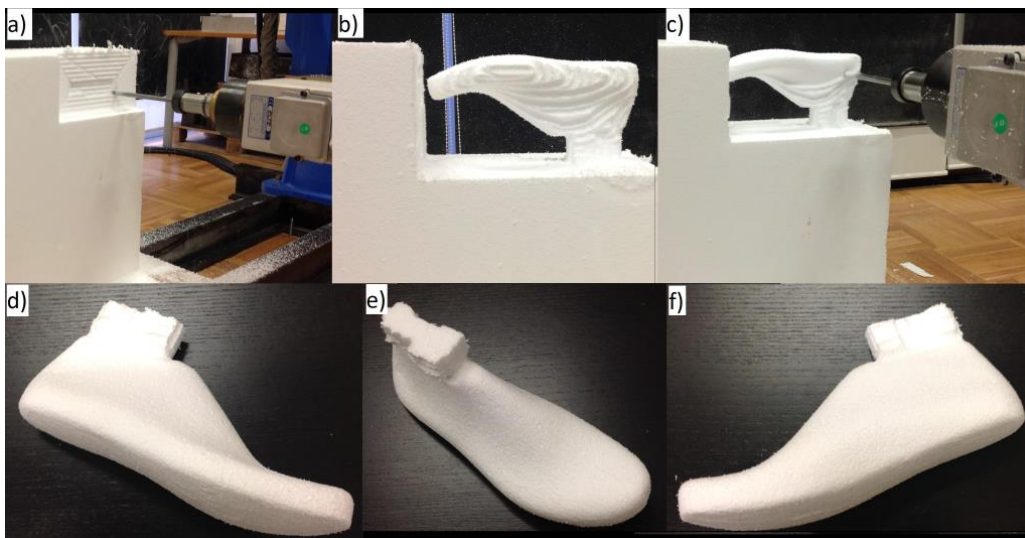


Figura 55 – Operações de maquinação da fôrma: a) Início da operação de desbaste; b) Fôrma no final da estratégia de desbaste; c) Operação de acabamento; d,e,f) Vistas da fôrma acabada.

Teste do automatismo

No final da produção da primeira peça foi retomado o processo de desenvolvimento dos métodos de digitalização e de modelação da fôrma, mais concretamente a etapa de melhoria. Depois de concluída esta etapa, obteve-se o modelo da fôrma nº2 com o qual se realizou o teste da macro anteriormente programada no PowerMILL.

Embora a macro tenha funcionado corretamente na produção na primeira fôrma, o mesmo não se verificou neste caso. A causa dos erros ocorridos envolveu entidades definidas através da seleção direta com o rato (*software picking*), por exemplo a definição de planos de trabalho nos vértices do bloco. Contudo, não foi possível executar as correções necessárias, embora o caminho a seguir fosse, numa primeira fase, fazer um levantamento de todas as operações que introduziram erros na macro e encontrar métodos alternativos para realizar as mesmas operações.

Preparação da célula para maquinação

Esta etapa de preparação foi idêntica à executada na produção da fôrma nº 1.

Maquinagem da fôrma nº 2

O objetivo desta etapa foi fazer uma avaliação da qualidade das superfícies necessária para garantir o rigor geométrico da fôrma, no entanto foi realizada uma alteração nas estratégias de desbaste.

Para a estratégia de desbaste foi criado um modelo maquinado (*stock model*) com base na estratégia do lado direito, que serviu de referência para proceder ao desbaste do lado esquerdo (ver figura 56). Neste caso, a estratégia de desbaste para o lado esquerdo da fôrma foi calculada, como sendo de re-desbaste. A principal vantagem desta alteração foi a redução do tempo da operação de desbaste em trinta minutos.

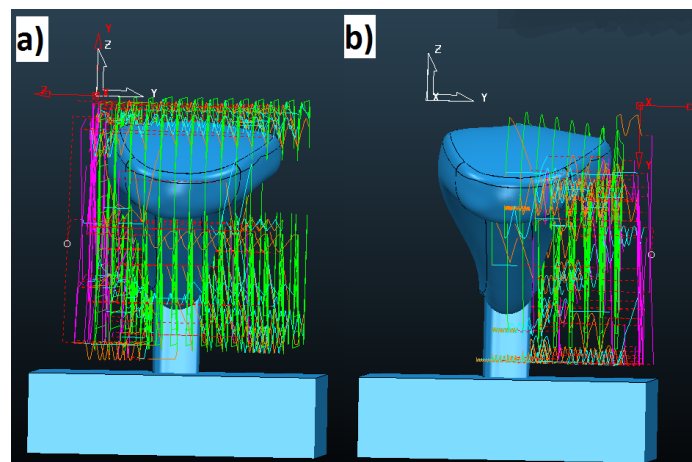


Figura 56 – Estratégias de desbaste: a) lado direito; b) lado esquerdo.

Na figura 57 podem visualizar-se imagens da fôrma depois de maquinada.



Figura 57 – Vistas da fôrma nº 2

Conforme se pôde visualizar na figura anterior, existem alguns defeitos na superfície da fôrma, contudo esses defeitos foram atribuídos à vibração da peça durante as operações de maquinagem.

Maquinagem da fôrma nº 3

A maquinagem da fôrma nº 3 foi realizada na célula robótica da Vancal e foram introduzidas algumas alterações no processo, nomeadamente o material, a fresa e o sistema de fixação.

O material utilizado foi mogno (madeira), que tem a vantagem de ser mais rígido do que o EPS, levando a uma menor vibração da peça durante as operações de maquinagem.

Para a maquinagem da peça foi utilizada uma ferramenta esférica, cujas dimensões estão registadas na tabela 9.

Tabela 7 - Ferramenta utilizada na maquinagem da fôrma nº 3.

Peça		Fôrma nº 3
Tipo		
Ponta (mm)	diametro	10
	comprimento	65
haste (mm)	Ø superior	10
	Ø inferior	10
	comprimento	18
Porta ferramentas (mm)	Ø superior	30
	Ø inferior	30
	comprimento	50



Para fixar o bloco foi concebido um suporte onde este foi aparafusado e posteriormente colocado na prensa, conforme se pode ver na figura 58.

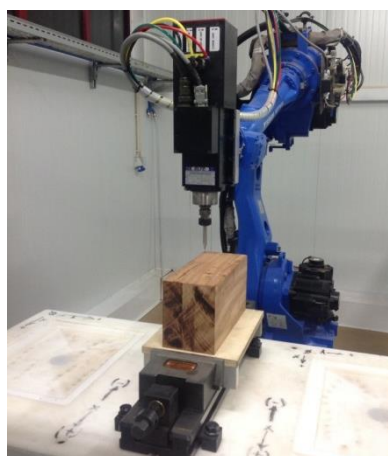


Figura 58 – Determinação do plano de trabalho do bloco.

As estratégias utilizadas para maquinar a fôrma nº3 foram as mesmas que para maquinar a nº 2, o desbaste em cópia e o acabamento z constante otimizado. No entanto, o passo lateral e vertical utilizado na estratégia de desbaste foi alterado para 5 mm.

As etapas subsequentes de preparação da maquinagem foram semelhantes às realizadas anteriormente, sendo por isso seguidamente apresentadas as imagens do processo de maquinagem da fôrma.

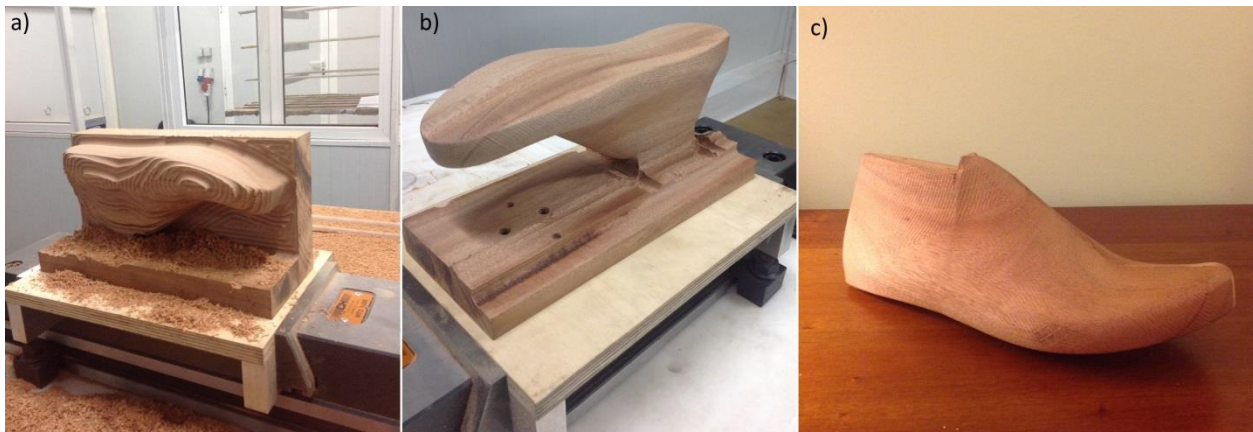


Figura 59 – Etapas da produção da fôrma nº 3: a) durante a operação de desbaste; b) depois da operação de acabamento; c) fôrma acabada.

Alguns dos defeitos obtidos na maquinagem da fôrma nº2 não se verificaram no final da maquinagem desta fôrma, no entanto a madeira permite visualizar com maior detalhe os defeitos superficiais, pelo que também se identificaram defeitos que anteriormente não eram visíveis. Contudo, considera-se que o resultado obtido é suficiente, visto que se prevê que submetendo a peça a uma breve etapa de acabamento manual o resultado obtido será excelente.

Produção de protótipos de fôrmas

No seguimento do desenvolvimento dos métodos anteriormente descritos é apresentado um fluxograma (ver figura 60) do processo de produção de protótipos de fôrmas.

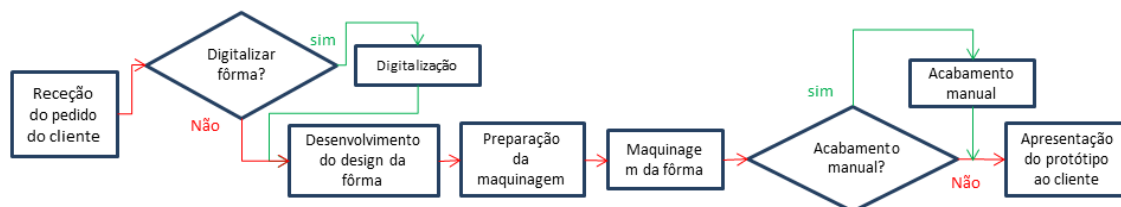


Figura 60 – Fluxograma da produção de protótipos de fôrmas

No passo “receção do pedido do cliente” são conhecidos os seus requisitos no que diz respeito à geometria da fôrma e a eventuais pedidos de personalização. Depois de

recebido o pedido verifica-se a necessidade de digitalizar algum modelo de fôrma, fornecido pelo cliente ou pertencente à biblioteca de fôrmas da Vancal. Seguidamente, inicia-se o processo de *design*, onde é modelada a fôrma de acordo com o pedido do cliente. No final deste processo é efetuada a preparação da maquinagem, que consiste em dois passos distintos. O primeiro é a programação da maquinagem que é primeiramente realizada no PowerMILL, através de uma macro que gera os percursos automaticamente (poderá ser necessário fazer alguns ajustes em função do modelo da fôrma) e seguidamente controla-se a cinemática do robô e pós processam-se os programas no PowerMILL Robot Interface. O segundo é a preparação da célula que consiste na colocação de um bloco para maquinar (que poderá ser uma pré-forma da fôrma) e na definição do seu plano de trabalho. Finalmente é maquinada a fôrma, operação a seguir à qual poderá haver ou não uma etapa de acabamento manual, sendo depois apresentado o protótipo ao cliente.

Desenvolvimento de metodologia para conversão automática de uma malha triangulada em superfícies CAD

O resultado da digitalização da fôrma com o Z-Scanner é uma malha triangulada obtida a partir de uma nuvem de pontos que constitui a superfície do objeto digitalizado. Essa malha pode posteriormente ser exportada num ficheiro com o formato “.stl”

Uma das principais vantagens de exportar o modelo no formato stl é a possibilidade de este ser utilizado diretamente em equipamentos de prototipagem rápida (por exemplo impressoras 3D), ou em *softwares* CAM. Em todo o caso, nas situações em que haja necessidade de modificar o modelo é possível editar a malha triangulada do modelo. No entanto as opções de edição quando comparadas com as disponíveis para a modelação de superfícies são limitadas, o que por sua vez também limita o processo de *design*. Foi este o motivo que levou ao desenvolvidor deste método que permite converter um modelo triangulado num modelo de superfícies.

Este método tem como base a definição de uma grelha formada por um conjunto de linhas que é projetada na superfície do modelo, obtendo-se assim um modelo de arames a partir do qual se podem criar as suas superfícies (ver figura 60).

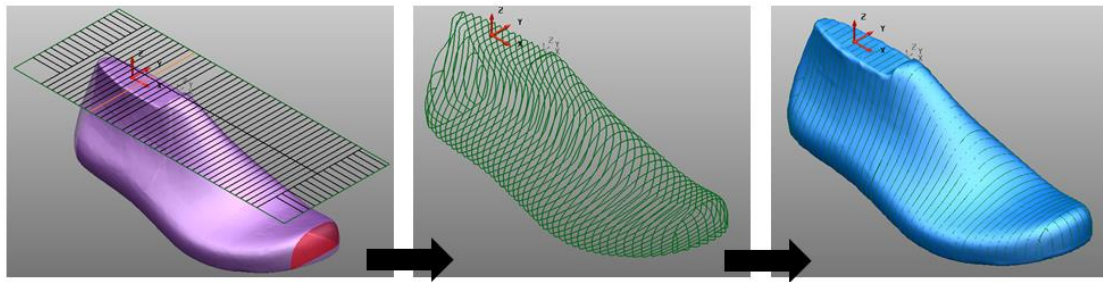


Figura 61 -Representação do método de projeção de linhas para modelação da fôrma

A direção das linhas da grelha está relacionada com a curvatura da fôrma, sendo por isso na sua maioria paralelas ao eixo y e apenas na zona da biqueira e do calcanhar paralelas ao eixo x. Depois de definidas as linhas da grelha, estas são projetadas e obtém-se o modelo de arames da fôrma. Finalmente, antes de serem criadas as superfícies faz-se a redistribuição dos pontos das curvas assim como a sua suavização. As superfícies são então criadas em várias secções, visto que não seria possível utilizar apenas uma superfície para definir a sua geometria.

Foi também programada uma macro no PowerMILL, que permite fazer a projeção automática das linhas na superfície do modelo. O código de programação desta macro encontra-se na figura abaixo representada.

```
1 PRINCIPALPLANE XY
2 VIEW EDIT TOP
3 SelectAll
4 create curve PROJECT
5 THRU
6 ACCEPT
```

Figura 62 – Código da macro criada para projeção automática das linhas da grelha.

Desenvolvimento de um método alternativo para definir o plano de trabalho da peça

Depois da aprendizagem dos métodos utilizados atualmente para definir os planos de trabalho dos blocos e depois de terem sido adquiridos alguns conhecimentos de operação do robô, foi desenvolvido um método alternativo bastante simples.

Este método baseia-se no método convencional para definir o plano de trabalho a partir de três pontos. Assim, define-se primeiro o ponto de origem do sistema de coordenadas, seguido do ponto X_1 que permite definir o eixo x e finalmente o ponto Y_1 que permite definir o eixo y e o plano XY, a partir do qual é definido o eixo Z. As coordenadas destes pontos são inseridas automaticamente no controlador do robô, que através de algoritmos

matemáticos executa as operações necessárias para definir o plano de trabalho representado na figura 63.

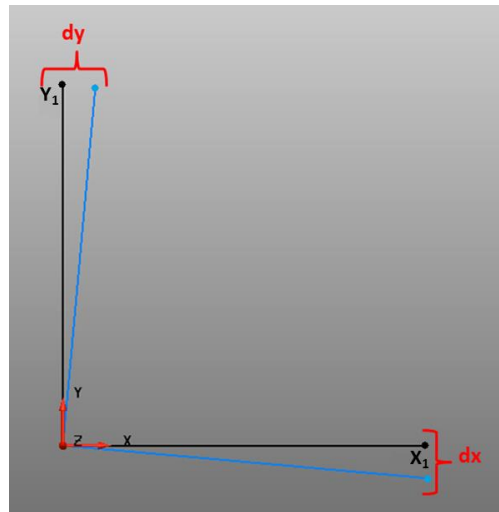


Figura 63 – Representação da medição do erro após definir um plano de trabalho de um bloco.

Depois do plano de trabalho estar definido, recorrendo a um comparador cujo comprimento deverá estar calibrado, mede-se o seu desvio segundo o plano XY nos eixos x e y que correspondem às variáveis dx e dy representadas na figura anterior. Obtidos os valores de dx e dy (que deveriam ser iguais) calcula-se a sua média, que é utilizada para ajustar os pontos X_1 e Y_1 registados no controlador. O ajuste destes pontos dá origem a dois novos pontos, que estão representados na figura 64 como X_2 e Y_2 .

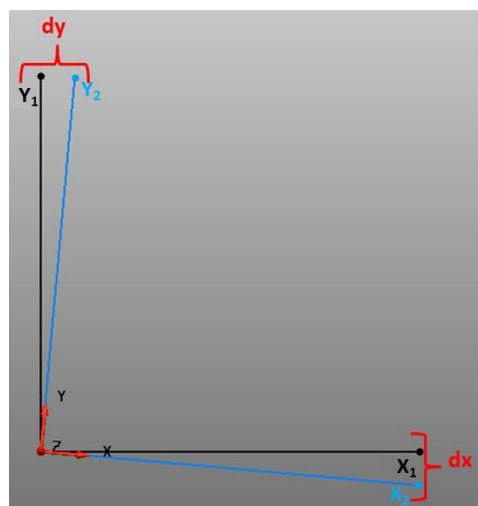


Figura 64 – Representação da rotação do plano de trabalho através do ajuste das coordenadas dos pontos X_1 e Y_1 .

Para este método poder ser utilizado, é necessário conhecer as coordenadas (x,y,z) dos pontos X_1 e Y_1 . Esta condição é garantida através de uma funcionalidade do controlador do robô que permite deslocar a ferramenta automaticamente até aos pontos X_1 e Y_1 .

Para aceder a esta funcionalidade do controlador do robô deverá entrar-se no menu para definir o “*user*” (plano de trabalho), seleccionar a coordenada do ponto pretendido e depois pressionar os botões “Shift + Interlock forward” que permitem posicionar o comparador automaticamente nessa coordenada.

Durante a realização deste trabalho não foi possível testar o método, uma vez que a referida funcionalidade do controlador não estava configurada no controlador da célula da Vancal.

Conclusões

A realização deste estágio proporcionou-me uma ampla aprendizagem a nível técnico e a nível pessoal.

A nível técnico, proporcionou-se a aprendizagem de utilização de equipamentos de engenharia inversa, como o MicroScribe e o Z-Scanner e foi consolidada a aprendizagem das aplicações CAD/CAM: PowerSHAPE, PowerMILL e PowerMILL Robot Interface. Tive também a possibilidade de operar de forma autónoma as células para maquinagem robotizada da Norcam e da Vancal. Assim, considero que durante este estágio foi desenvolvida com sucesso a capacidade para desenvolver e executar projetos em células robóticas para maquinagem.

A nível pessoal, o facto de ter passado por duas empresas tão diferentes como a Vancal e a Norcam, permitiu-me conhecer duas realidades distintas, devido às suas também diferentes áreas de negócio. Enquanto a Norcam se dedica principalmente à comercialização de aplicações CAD/CAM e ao seu suporte técnico, a Vancal insere-se numa área mais industrial. Desta forma, considero que a familiarização com o ambiente empresarial e industrial foi realizada com sucesso. Para além disso, durante todo o trabalho foi-me dada uma grande autonomia, o que se traduziu em mais aprendizagem nomeadamente na organização do meu trabalho e na definição de objetivos.

Com a realização deste trabalho, considero ter sido demonstrada a capacidade da célula robótica da Vancal para produzir fôrmas para calçado, ou até mesmo outro tipo de componentes. No entanto, considero também que existem ainda alguns aspetos que devem ser melhorados, nomeadamente no que diz respeito à definição dos parâmetros das estratégias de maquinagem, tendo em vista a redução da duração total da maquinagem e a melhoria da qualidade superficial da fôrma.

A utilização dos dois equipamentos de engenharia inversa, o MicroScribe e o Z-Scanner, permitiu concluir que o Z-Scanner é mais indicado para a digitalização de fôrmas. Esta afirmação é sustentada pelo facto da edição do modelo obtido com o Z-Scanner ser mais simples e por isso mais rápida do que com o MicroScribe, conseguindo-se ainda um modelo com menos desvios de forma, pelo facto da digitalização ser menos dependente da capacidade e experiência do operador.

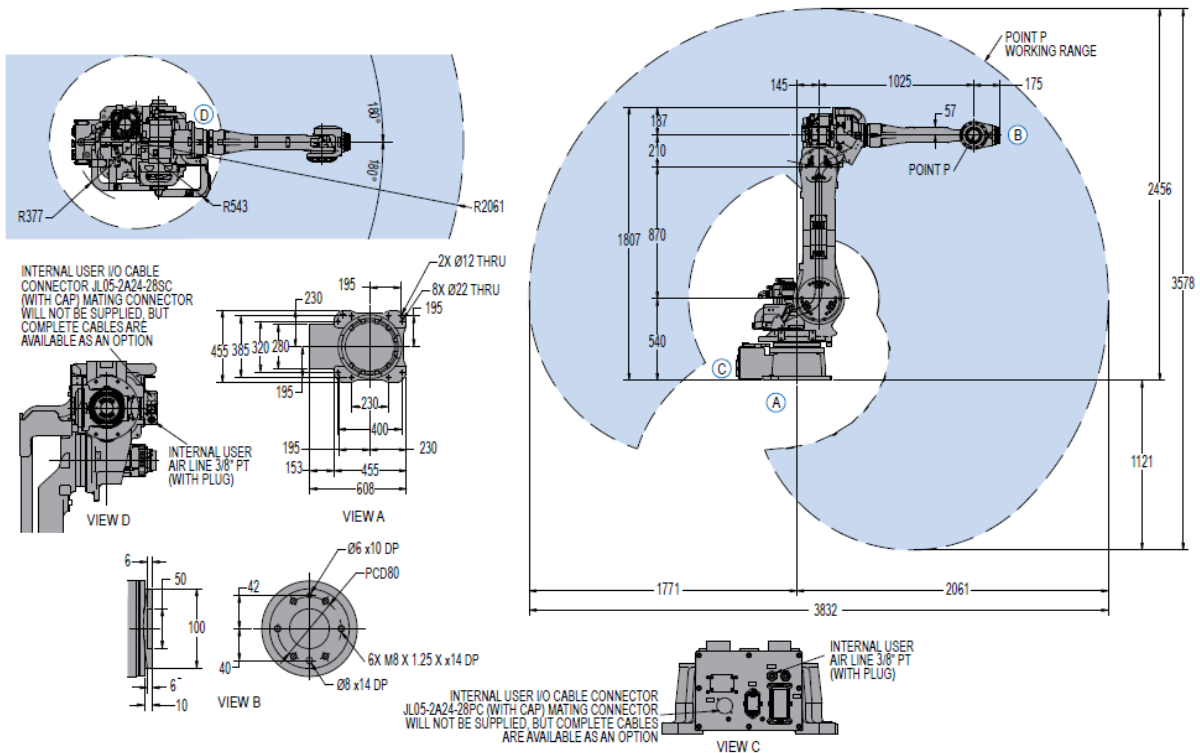
Referências Bibliográficas

- [1] F. J. Amorós-González, A. Jimeno-Morenilla, and F. Salas-Pérez, “A new surface joining technique for the design of shoe lasts,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 5-8, pp. 1821-1838, Apr. 2013.
- [2] Y. Zhang, A. Luximon, A. K. Pattanayak, and M. Zhang, “Shoe-last design exploration and customization,” *J. Text. Inst.*, vol. 103, no. 5, pp. 541-548, May 2011.
- [3] M. R. Schmidt, “Modelagem Técnica do Calçado.” 2007.
- [4] “3ds form shoes lasts.” [Online]. Available: <http://www.turbosquid.com/3d-models/3ds-form-shoes-lasts/676241>. [Accessed: 15-Feb-2014].
- [5] A. Jimeno-Morenilla, J. García-Rodríguez, S. Orts-Escolano, and M. Davia-Aracil, “3D-based reconstruction using growing neural gas landmark: application to rapid prototyping in shoe last manufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, no. 1-4, pp. 657-668, May 2013.
- [6] “what is a shoe last?” [Online]. Available: http://www.shoeschool.com/shoeschool/lasts/shoe_last_what.html. [Accessed: 02-Feb-2014].
- [7] J. Wang, H. Zhang, G. Lu, and Z. Liu, “Rapid parametric design methods for shoe-last customization,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 1-4, pp. 173-186, Jan. 2011.
- [8] a. M. Jimeno, J. M. G. Chamizo, and F. Salas, “Shoe Last Machining Using Virtual Digitising,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 17, no. 10, pp. 744-750, May 2001.
- [9] J. Hu, H. Shen, S. Zeng, and Y. Wang, “B-spline tool offset of a free-form curve in the shoe last high-speed machining CNC system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 30, no. 9-10, pp. 864-869, Jan. 2006.

Anexos

Anexo 1

Dados técnicos do robô Motoman MH50



ROBOT SPECIFICATIONS			
	MH50	MH50-35	
Structure	Articulated	Articulated	
Controlled Axes	6	6	
Payload	50 kg (110.3 lbs)	35 kg (77.2 lbs)	
Vertical Reach	3,578 mm (140.9")	4,448 mm (175.1")	
Horizontal Reach	2,061 mm (81.1")	2,538 mm (100")	
Repeatability	±0.07 mm (±0.003")	±0.07 mm (±0.003")	
Maximum Motion Range	S-Axis (Turning)	±180°	±180°
	L-Axis (Lower Arm)	+135°/-90°	+135°/-90°
	U-Axis (Upper Arm)	+251°/-170°	+296°/-160°
	R-Axis (Upper Arm Twist)	±360°	±360°
	B-Axis (Pitch/Yaw)	±125°	±125°
Maximum Speed	S-Axis	180°/s	180°/s
	L-Axis	178°/s	140°/s
	U-Axis	178°/s	178°/s
	R-Axis	250°/s	250°/s
	T-Axis	360°/s	360°/s
Approximate Mass	550 kg (1,212.8 lbs)	570 kg (1,256.9 lbs)	
Power Consumption	4 kVA	4 kVA	
Allowable Moment	R-Axis	216 N · m	147 N · m
	B-Axis	216 N · m	147 N · m
	T-Axis	147 N · m	78 N · m
Allowable Moment of Inertia	R-Axis	28 kg · m ²	10 kg · m ²
	B-Axis	28 kg · m ²	10 kg · m ²
	T-Axis	11 kg · m ²	4 kg · m ²
Internal User I/O Cable	23 conductors + ground	23 conductors + ground	
Internal User Air Line	3/8" pipe tap connection	3/8" pipe tap connection	

DX100 CONTROLLER SPECIFICATIONS**	
Dimensions (mm)	800 (w) x 1,000 (h) x 650 (d) (31.5" x 39.4" x 25.6")
Approximate Mass	250 kg max. (551.3 lbs)
Cooling System	Indirect cooling
Ambient Temperature	During operation: 0° to 45° C (32° to 113° F) During transit and storage: -10° to 60° C (14° to 140° F)
Relative Humidity	90% max. non-condensing
Primary Power Requirements	3-phase, 240/480/575 VAC at 50/60 Hz
Digital I/O	Standard I/O: 40 inputs/40 outputs consisting of 16 system inputs/16 system outputs, 24 user inputs/24 user outputs 32 Transistor Outputs, 8 Relay Outputs Max. I/O (optional): 2,048 inputs and 2,048 outputs
Position Feedback	By absolute encoder
Program Memory	JOB: 200,000 steps, 10,000 instructions C/O Ladder Standard: 15,000 steps Expanded: 20,000 steps
Pendant Dim. (mm)	169 (w) x 314.5 (h) x 50 (d) (6.7" x 12.4" x 2")
Pendant Weight	.998 kg (2.2 lbs)
Interface	One Compact Flash slot; One USB port (1.1)
Pendant Playback Buttons	Teach/Play/Remote Keypress selector Servo On, Start, Hold, and Emergency Stop Buttons
Programming Language	INFORM III, menu-driven programming
Maintenance Functions	Displays troubleshooting for alarms, predicts reducer wear
Number of Robots/Axes	Up to 8 robots, 72 axes
Multi Tasking	Up to 16 concurrent jobs, 4 system jobs
Fieldbus	DeviceNet Master/Slave, AB RIO, Profibus, Interbus-S, M-Net, CC Link, EtherNet IP/Slave
Ethernet	10 Base T/100 Base TX
Safety	Dual-channel Emergency Stop Pushbuttons, 3-position Enable Switch, Manual Brake Release Meets ANSI/RIA R15.06-1999, ANSI/RAISO 10218-1-2007 and CSA Z434-03

**See DX100 Controller data sheet (DS-989) for complete specifications

Anexo 2

Código de programação da macro realizada no PowerMILL.

```
CREATE TOOL ; BALLNOSED FORM TOOL
DIALOGS MESSAGE OFF
DIALOGS ERROR OFF
SIMULATE TOOL '1'
DIALOGS MESSAGE ON
DIALOGS ERROR ON
EDIT TOOL "1" DIAMETER "10"
EDIT TOOL "1" LENGTH "45.0"
EDIT TOOL "1" SHANK_COMPONENT ADD
EDIT TOOL "1" SHANK_COMPONENT UPPERDIA 10
EDIT TOOL "1" SHANK_COMPONENT LENGTH 140
EDIT TOOL "1" HOLDER_COMPONENT ADD
EDIT TOOL "1" HOLDER_COMPONENT UPPERDIA 50
EDIT TOOL "1" HOLDER_COMPONENT LOWERDIA 50
EDIT TOOL "1" HOLDER_COMPONENT LENGTH 90
EDIT TOOL "1" OVERHANG 185
TOOL ACCEPT
IMPORT TEMPLATE ENTITY TOOLPATH TMLTSELECTORGUI
"3D-Area-Clearance\Model-Area-Clearance.002.ptf"
SIMULATE TRACE CLEAR
RENAME TOOLPATH "1" "Roughing_left_side"
EDIT TPPAGE STRATEGYOFFSET
EDIT TPPAGE STRATEGYAREACLRCOM
EDIT PAR 'Thickness' "2.0"
EDIT PAR 'RadialDepthOfCut.UserDefined' '1' EDIT PAR 'Stepover' "8.0"
EDIT ZHEIGHTS AUTOMATIC STEPDOWN "8.0"
EDIT TPPAGE STRATEGYOFFSET
EDIT TPPAGE STRATEGYSTEPREDUCT
EDIT TPPAGE STRATEGYWALLFIN
EDIT TPPAGE CURVEPOINTDISTRB
EDIT PAR 'Filter.Type' 'redistribute'
EDIT PAR 'MaxDistanceBetweenPoints.Active' '1'
```

EDIT TPPAGE RAPIDMOVE
EDIT TOOLPATH SAFEAREA WORKPLANE "Esq"
EDIT TOOLPATH SAFEAREA RESET
EDIT TPPAGE CURVELEADSNLINKS
FORM LEADLINK
EDIT TOOLPATH LEADS PAGE LEADIN
EDIT TOOLPATH LEADS LEADIN RAMP
EDIT TOOLPATH LEADS LEADOUT COPY
PROCESS TPLEADINS
EDIT TOOLPATH LEADS LEADOUT COPY
PROCESS TPLEADS
LEADS ACCEPT
EDIT TPPAGE STARTPOINT
EDIT TPPAGE ENDPOINT
EDIT TOOLPATH "Roughing_left_side" CALCULATE
AreaClearMain ACCEPT
ACTIVATE WORKPLANE "Export"
DIALOGS MESSAGE OFF
DIALOGS ERROR OFF
SIMULATE TOOL '1'
DIALOGS MESSAGE ON
DIALOGS ERROR ON
DIALOGS MESSAGE OFF
DIALOGS ERROR OFF
SIMULATE TOOL '1'
DIALOGS MESSAGE ON
DIALOGS ERROR ON
CREATE STOCKMODEL ; FORM STOCKMODEL
FORM ACCEPT STOCKMODEL
EXPLORER SELECT StockModel "StockModel\1" NEW
EXPLORER SELECT Toolpath "Toolpath\Roughing_left_side" NEW
EDIT STOCKMODEL ; INSERT_INPUT TOOLPATH "Roughing_left_side" LAST
EDIT STOCKMODEL "1" CALCULATE_STATE INDEXED_STATE 0
EDIT STOCKMODEL "1" CALCULATE_STATE INDEXED_STATE 1

```
IMPORT TEMPLATE ENTITY TOOLPATH TEMPLSELECTORGUI
"3D-Area-Clearance\Model-Area-Clearance.002.ptf"
SIMULATE TRACE CLEAR
EDIT TPPAGE WORKPLANE
ACTIVATE WORKPLANE "Drt"
DIALOGS MESSAGE OFF
DIALOGS ERROR OFF
SIMULATE TOOL '1'
DIALOGS MESSAGE ON
DIALOGS ERROR ON
DIALOGS MESSAGE OFF
DIALOGS ERROR OFF
SIMULATE TOOL '1'
DIALOGS MESSAGE ON
DIALOGS ERROR ON
EDIT TPPAGE TOOL
EDIT TPPAGE STRATEGYAREACLRCOM
EDIT PAR 'AreaClearance.Rest.Active' '1'
EDIT TPPAGE STRATEGYREST
EDIT PAR 'AreaClearance.Rest.ReferenceType' 'stockmodel'
EDIT PAR 'StockModelState.StockModel' '1'
EDIT TPPAGE CURVEPOINTDISTRB
EDIT TPPAGE RAPIDMOVE
EDIT TOOLPATH SAFEAREA WORKPLANE "Drt"
RENAME TOOLPATH "1" "Roughing_right_side"
EDIT TOOLPATH SAFEAREA RESET
EDIT TPPAGE CURVELEADSNLINKS
EDIT TOOLPATH "Roughing_right_side" CALCULATE
AreaClearMain ACCEPT
CREATE BOUNDARY ; SILHOUETTE FORM BOUNDARY
RENAME BOUNDARY "1" "Silhueta_right_side"
EDIT BOUNDARY "Silhueta_right_side" THICKNESS "0"
FORM THICKNESS EDIT THICKNESS TAB COMPONENTS BOUNDARY
EXPLORER SELECT Level "Level\Suporte" NEW
```

EDIT LEVEL "Suporte" SELECT ALL
EDIT BOUNDARY ; THICKNESS ACQUIRE
EDIT BOUNDARY ; THICKNESS COMPONENTS COLLISION
THICKNESS APPLY
THICKNESS ACCEPT
EDIT BOUNDARY "Silhueta_right_side" PRIVATE NO
EDIT BOUNDARY "Silhueta_right_side" CALCULATE
EDIT BOUNDARY "Silhueta_right_side" ACCEPT BOUNDARY ACCEPT
ACTIVATE WORKPLANE "Esq"
CREATE BOUNDARY ; SILHOUETTE FORM BOUNDARY
RENAME BOUNDARY "1" "Silhueta_left_side"
EDIT BOUNDARY "Silhueta_left_side" THICKNESS "0"
EDIT BOUNDARY "Silhueta_left_side" PRIVATE NO
FORM THICKNESS EDIT THICKNESS TAB COMPONENTS BOUNDARY
EXPLORER SELECT Level "Level\Suporte" NEW
EDIT LEVEL "Suporte" SELECT ALL
EDIT BOUNDARY ; THICKNESS ACQUIRE
EDIT BOUNDARY ; THICKNESS COMPONENTS COLLISION
THICKNESS APPLY
THICKNESS ACCEPT
EDIT BOUNDARY "Silhueta_left_side" CALCULATE
EDIT BOUNDARY "Silhueta_left_side" ACCEPT BOUNDARY ACCEPT
IMPORT TEMPLATE ENTITY TOOLPATH TEMPLTSELECTORGUI
"Finishing\Optimised-Constant-Z-Finishing.ptf"
RENAME TOOLPATH "1" "Finishing_left_side"
EDIT PAR 'RadialDepthOfCut.UserDefined' '1' Edit Par 'Stepover' "1.0"
FORM THICKNESS EDIT THICKNESS TAB COMPONENTS TOOLPATH
EXPLORER SELECT Level "Level\Suporte" NEW
EDIT LEVEL "Suporte" SELECT ALL
EDIT TOOLPATH ; THICKNESS ACQUIRE
EDIT TOOLPATH ; THICKNESS COMPONENTS COLLISION
THICKNESS APPLY
THICKNESS ACCEPT
EDIT TPPAGE WORKPLANE

```
EDIT TPPAGE CURVELIMIT
EDIT PAR 'AllowToolOutsideBlock' '1'
EDIT TPPAGE OPTIMIZEDZ
EDIT TPPAGE CURVEPOINTDISTRB
EDIT PAR 'Filter.Type' 'redistribute'
EDIT PAR 'MaxDistanceBetweenPoints.Active' '1'
EDIT TPPAGE RAPIDMOVE
EDIT TOOLPATH SAFEAREA WORKPLANE "Esq"
EDIT TOOLPATH SAFEAREA RESET
EDIT TPPAGE CURVELEADSNLINKS
EDIT TOOLPATH "Finishing_left_side" CALCULATE
OptimizedZ ACCEPT
ACTIVATE WORKPLANE "Drt"
IMPORT TEMPLATE ENTITY TOOLPATH TMPLTSELECTORGUI
"Finishing\Optimised-Constant-Z-Finishing.ptf"
RENAME TOOLPATH "1" "Finishing_right_side"
FORM THICKNESS EDIT THICKNESS TAB COMPONENTS TOOLPATH
EDIT LEVEL "Suporte" SELECT ALL
EDIT TOOLPATH ; THICKNESS ACQUIRE
EDIT TOOLPATH ; THICKNESS COMPONENTS COLLISION
THICKNESS APPLY
THICKNESS ACCEPT
EDIT TPPAGE WORKPLANE
EDIT TPPAGE CURVELIMIT
ACTIVATE BOUNDARY "Silhueta_right_side"
EDIT TPPAGE CURVEPOINTDISTRB
EDIT TPPAGE RAPIDMOVE
EDIT TOOLPATH SAFEAREA WORKPLANE "Drt"
EDIT TOOLPATH SAFEAREA RESET
EDIT TPPAGE CURVELEADSNLINKS
EDIT TOOLPATH "Finishing_right_side" CALCULATE
OptimizedZ ACCEPT
EXPLORER SELECT Toolpath "Toolpath\Roughing_left_side" NEW
UNDRAW Toolpath "Roughing_left_side"
```

EXPLORER SELECT Toolpath "Toolpath\Roughing_left_side" NEW
DRAW Toolpath "Roughing_left_side"
EXPLORER SELECT Toolpath "Toolpath\Roughing_left_side" NEW
UNDRAW Toolpath "Roughing_left_side"
EXPLORER SELECT Toolpath "Toolpath\Roughing_right_side" NEW
UNDRAW Toolpath "Roughing_right_side"
EXPLORER SELECT Toolpath "Toolpath\Finishing_left_side" NEW
UNDRAW Toolpath "Finishing_left_side"
EXPLORER SELECT Toolpath "Toolpath\Finishing_right_side" NEW
UNDRAW Toolpath "Finishing_right_side"
EXPLORER SELECT StockModel "StockModel\1" NEW
UNDRAW StockModel "1"
UNDRAW BLOCK
EXPLORER SELECT Boundary "Boundary\Silhueta_right_side" NEW
DRAW Boundary "Silhueta_right_side"
EXPLORER SELECT Boundary "Boundary\Silhueta_right_side" NEW
UNDRAW Boundary "Silhueta_right_side"
ACTIVATE WORKPLANE "Export"
ROTATE TRANSFORM ISO2